



## RESUMEN

El estudio de la estabilidad de tensión ha cobrado una importancia crucial en los últimos años debido a que los sistemas eléctricos de potencia operan cada vez más cerca de sus límites de seguridad. Por esta razón, se han propuesto algunas metodologías para establecer las áreas débiles del sistema eléctrico, y con ello definir las acciones más apropiadas para garantizar la continuidad del servicio eléctrico. Sin embargo de aquello, la mayoría de metodologías propuestas requieren de grandes esfuerzos computacionales, razón por la cual pierden su aplicabilidad dentro del ambiente de la operación del sistema en tiempo real.

En el presente trabajo se propone el desarrollo de un nuevo índice de estabilidad de tensión, el cual es el resultado de la composición, en un sistema difuso, de otros índices propuestos en la literatura y ciertas variables del sistema. El indicador desarrollado se calcula para cada línea de transmisión del sistema eléctrico, y trata de superar la no-linealidad que presentan otros indicadores en cuanto a su capacidad para detectar áreas débiles del sistema y clasificar la severidad de contingencias. Además, el cálculo del indicador propuesto puede ser realizado en un tiempo muy corto, haciéndolo aplicable para la operación en tiempo real del sistema. Los resultados obtenidos se verifican con sistemas de prueba de la IEEE, utilizando el criterio *N-1*.

**PALABRAS CLAVES:** Estabilidad de tensión, Contingencias, Lógica Difusa, Sistema de Inferencia Difuso, Flujo de potencia continuado (CPF), Power System Analysis Toolbox (PSAT).



## ABSTRACT

Study of voltage stability has become crucial in recent years because the power systems operate closer to its security limits. For this reason, some methods to establish the weak areas of the electrical system have been proposed, in order to thus define the most appropriate actions to ensure continuity of electrical service. Notwithstanding, the most popular methodologies require large computational effort, making them very difficult apply in the operating environment of the real-time system.

In this work, the development of a new voltage stability index is proposed, which is the result of the composition, of some indices proposed in the literature and some variables of the system using a fuzzy system. The developed indicator is calculated for each transmission line, and tries to overcome the nonlinearity presented by other indicators to detect weak areas of the system and classify the severity of contingencies. The calculation of the proposed indicator can be done very fast making it applicable for real time operation. The results are verified using test IEEE systems IEEE, using the  $N-1$  criteria.

**KEY WORDS:** Voltage stability, Contingences, Fuzzy Logic, Fuzzy Inference System, Continuation power flow (CPF), Power System Analysis Toolbox (PSAT).



## ÍNDICE

<b>CAPÍTULO I: Introducción</b> .....	17
<b>CAPÍTULO II: Estabilidad de Tensión en los Sistemas Eléctricos de Potencia</b> .....	20
<b>2.1.</b> Conceptos básicos y definiciones.....	21
<b>2.2.</b> Clasificación de estabilidad.....	21
<b>2.2.1.</b> Estabilidad de ángulo.....	22
<b>2.2.1.1.</b> Estabilidad de ángulo de pequeña señal.....	22
<b>2.2.1.2.</b> Estabilidad de ángulo transitoria.....	23
<b>2.2.2.</b> Estabilidad de frecuencia.....	23
<b>2.2.3.</b> Estabilidad de tensión.....	24
<b>2.2.3.1.</b> Estabilidad de tensión de gran perturbación.....	25
<b>2.2.3.2.</b> Estabilidad de tensión de pequeña perturbación.....	25
<b>2.3.</b> Métodos de análisis de la estabilidad de tensión.....	26
<b>2.3.1.</b> Métodos analíticos.....	27
<b>2.3.1.1.</b> Métodos basados en flujos de potencia convencionales.....	28
<b>2.3.1.2.</b> Métodos basados en flujos de potencia continuos.....	29
<b>2.4.</b> El fenómeno del colapso de tensión.....	38
<b>2.4.1.</b> Caracterización general del colapso de tensión.....	40
<b>2.5.</b> Estado del Arte.....	41
<b>2.5.1.</b> Índices de Estabilidad de Tensión.....	42
<b>2.5.2.</b> Índices basados en el estado actual de sistema.....	43
<b>2.5.3.</b> Índices basados en grandes desviaciones respecto del estado actual del sistema.....	47
<b>2.5.3.1.</b> Margen de cargabilidad.....	47
<b>2.5.4.</b> Índices de estabilidad de tensión en la clasificación y ranking de contingencias.....	49
<b>CAPÍTULO III: Desarrollo del Sistema Difuso para la Obtención del Índice de Estabilidad de tensión propuesto</b> .....	52
<b>3.1.</b> Introducción.....	52
<b>3.2.</b> Descripción de los Índices de Estabilidad de tensión considerados como entradas candidatas.....	56
<b>3.2.1.</b> Índice del Vector Tangente ( $TVI$ ).....	56
<b>3.2.2.</b> Índice basado en flujos de potencia activa y reactiva ( $I_{pq}$ ).....	60
<b>3.2.3.</b> Pérdidas de potencia activa y reactiva.....	67
<b>3.2.4.</b> Niveles de tensión.....	69
<b>3.3.</b> Sistema de Inferencia Difuso para la obtención del índice propuesto.....	72
<b>3.3.1.</b> Cálculo de las entradas del sistema.....	73
<b>3.3.2.</b> Fusificación de las entradas.....	73
<b>3.3.3.</b> Determinación de las Reglas difusas.....	77
<b>3.3.4.</b> Método de implicación.....	79
<b>3.3.5.</b> Agregación de las salidas.....	80
<b>3.3.6.</b> Proceso de Defusificación.....	81



---

<b>CAPÍTULO IV: Resultados</b> .....	82
<b>4.1.</b> Consideraciones generales.....	82
<b>4.2.</b> Sistema IEEE 14 barras.....	83
4.2.1. Análisis del Sistema IEEE 14 barras a través del $I_{ETD}$ para funciones de pertenencia tipo Triangular.....	84
4.2.2. Análisis del Sistema IEEE 14 barras a través del $I_{ETD}$ para funciones de pertenencia tipo Trapezoidal.....	87
4.2.3. Análisis del Sistema IEEE 14 barras a través del $I_{ETD}$ para funciones de pertenencia tipo Gaussiana.....	90
<b>4.3.</b> Sistema IEEE 30 barras.....	94
<b>4.4.</b> Sistema IEEE 118 barras.....	98
<b>4.5.</b> Comparación de los resultados obtenidos a través del índice $I_{ETD}$ y los índices entradas del sistema de inferencia difuso.....	104
<b>CAPÍTULO V: Consideraciones Finales y Conclusiones</b> .....	109
<b>Referencias Bibliográficas</b> .....	112
APENDICE A: Lógica Difusa.....	114
APENDICE B: Descripción del Sistema IEEE de 14 barras.....	125
APENDICE C: Descripción del Sistema IEEE de 30 barras.....	127
APENDICE D: Descripción del Sistema IEEE de 118 barras.....	130
APENDICE E: Clasificación por Contingencias obtenida a través de los márgenes de cargabilidad para los sistemas: IEEE 14 barras, IEEE 30 barras e IEEE 118 barras.....	137

---

## ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

### ÍNDICE DE FIGURAS

#### Capítulo II

- Fig. 2.1** Clasificación de la estabilidad de los sistemas de potencia
- Fig. 2.2** Secuencia típica de cálculos en el método de continuación del flujo de potencia.
- Fig. 2.3** Sistema radial simple para obtención de las curvas P-V
- Fig. 2.4** Curva P-V para el sistema de la fig. 2.3 ( $\cos\phi=0.95$ )
- Fig. 2.5** Curvas P-V para el sistema de la fig. 2.3, para diferentes factores de potencia
- Fig. 2.6** Margen de estabilidad de tensión, caso base
- Fig. 2.7** Margen de estabilidad de tensión para contingencias
- Fig. 2.8** Curvas Q-V para el sistema de la fig. 2.3.
- Fig. 2.9** Curvas Q-V para el sistema de la fig. 2.3.
- Fig. 2.10** Proceso del colapso de tensión.
- Fig. 2.11** Definición del margen de cargabilidad

#### Capítulo III

- Fig. 3.1** Diagrama de flujo de la metodología utilizada para la obtención del índice difuso propuesto
- Fig. 3.2** Comportamiento del índice del vector tangente ( $TVI$ ).
- Fig. 3.3** Índice de estabilidad de tensión del vector tangente ( $TVI$ ) para todos los nodos del sistema IEEE 14 barras: a) caso base, b) carga media, c) carga crítica.
- Fig. 3.4** Modelo  $\pi$  de una línea de transmisión con compensación de potencia reactiva en la barra R
- Fig. 3.5** Comportamiento del índice de estabilidad de tensión  $I_{pq}$ .
- Fig. 3.6** Índice de estabilidad de tensión  $I_{pq}$  para todas las líneas del sistema IEEE 14 barras: a) caso base, b) carga media, c) carga crítica.
- Fig. 3.7** Variación de la clasificación de la línea Nro. 11 del sistema IEEE 14 barras, obtenida a través del índice de estabilidad  $I_{pq}$

- Fig. 3.8** Comportamiento de las pérdidas de potencia activa ( $P_{loss}$ ) y reactiva ( $Q_{loss}$ ) ante incremento de carga
- Fig. 3.9** Valores de  $P_{loss}$  y  $Q_{loss}$  para todas las líneas del sistema IEEE 14 barras: a) caso base, b) carga media, c) carga crítica
- Fig. 3.10** Tendencia de los niveles de tensión en las barras del sistema IEEE 14 barras ante aumento de carga
- Fig. 3.11** Niveles de tensión en las barras del sistema IEEE 14 barras: a) caso base, b) carga media, c) carga crítica
- Fig. 3.12** Diagrama de flujo de la metodología utilizada para la obtención del índice difuso propuesto
- Fig. 3.13** Captura de pantalla del Editor de la herramienta de Lógica Difusa de MATLAB
- Fig. 3.14** Funciones de pertenencia tipo triangular para los índices del sistema
- Fig. 3.15** Captura de pantalla del Sistema de Inferencia Difuso desarrollado

## Capítulo IV

- Fig. 4.1** Sistema IEEE 14 barras
- Fig. 4.2** Comportamiento del índice de estabilidad de tensión  $I_{ETD}$  para funciones de pertenencia tipo triangular
- Fig. 4.3** Índice de estabilidad de tensión  $I_{ETD}$  del sistema IEEE 14 barras en tres niveles de carga (caso base, carga media y carga crítica), para funciones de pertenencia tipo triangular
- Fig. 4.4** Comportamiento del índice de estabilidad de tensión  $I_{ETD}$  para funciones de pertenencia tipo trapezoidal
- Fig. 4.5** Índice de estabilidad de tensión  $I_{ETD}$  del sistema IEEE 14 barras en tres niveles de carga: caso base, carga media y carga crítica, para funciones de pertenencia tipo trapezoidal
- Fig. 4.6** Comportamiento del índice de estabilidad de tensión  $I_{ETD}$  para funciones de pertenencia tipo gaussiana
- Fig. 4.7** Índice de estabilidad de tensión  $I_{ETD}$  del sistema IEEE 14 barras en tres niveles de carga (caso base, carga media y carga alta-crítica), para funciones de pertenencia tipo gaussiana
- Fig. 4.8** Variación de la clasificación de los elementos más débiles del Sistema IEEE 14 barras, analizado a través del índice  $I_{ETD}$  para las funciones de pertenencia: a) triangular, b) trapezoidal, c) gaussiana

- Fig. 4.9** Sistema IEEE 30 barras
- Fig. 4.10** Variación de la clasificación de los elementos más débiles del Sistema IEEE 30 barras, analizado a través del índice  $I_{ETD}$  para función de pertenencia gaussiana
- Fig. 4.11** Sistema IEEE 18 barras
- Fig. 4.12** Índice de estabilidad de tensión  $I_{ETD}$  de los 20 elementos más críticos del sistema IEEE 118 barras
- Fig. 4.13** Variación de la clasificación de los elementos más débiles del Sistema IEEE 118 barras, analizado a través del índice  $I_{ETD}$  para la función de pertenencia gaussiana

## APENDICE A

- Fig. A.1** Función de pertenencia triangular
- Fig. A.2** Función de pertenencia trapezoidal
- Fig. A.3** Función de pertenencia gaussiana
- Fig. A.4** Función de pertenencia campana generalizada (Cauchy)
- Fig. A.5** Propiedades de los conjuntos difusos
- Fig. A.6** Operaciones sobre conjuntos difusos: a) Conjunto Difuso A Y B (Intersección); b) Conjunto difuso A O B (Unión) c) Conjunto difuso  $\bar{A}$  (negación de A)
- Fig. A.7** Fusificación
- Fig. A.8** Sistema de Inferencia Difuso
- Fig. A.9** Implicación y agregación de las salidas en los sistemas de inferencia difusos
- Fig. A.10** Defusificación

## APENDICE B

- Fig. B.1-** Diagrama unifilar del Sistema IEEE 14 barras

## APENDICE C

- Fig. C.1-** Diagrama unifilar del Sistema IEEE 30 barras



## APENDICE D

**Fig. D.1-** Diagrama unifilar completo del Sistema IEEE 118 barras

**Fig. D.2-** Diagrama unifilar de la parte principal del Sistema IEEE 118 barras



---

## ÍNDICE DE TABLAS

### Capítulo III

**Tabla 3.1** Niveles lingüísticos de los índices de estabilidad de tensión.

**Tabla 3.2** Reglas difusas definidas para el sistema de inferencia difuso.

### Capítulo IV

**Tabla 4.1** Resultados del Sistema IEEE 14 barras obtenidos a través del índice  $I_{ETD}$ , para funciones de pertenencia tipo triangular

**Tabla 4.2** Áreas débiles del sistema IEEE 14 barras obtenidas a través del  $I_{ETD}$  (funciones de pertenencia triangular)

**Tabla 4.3** Resultados del Sistema IEEE 14 barras obtenidos a través del índice  $I_{ETD}$ , para funciones de pertenencia tipo trapezoidal.

**Tabla 4.4** Áreas débiles del sistema IEEE 14 barras obtenidas a través del  $I_{ETD}$  (funciones de pertenencia trapezoidal)

**Tabla 4.5** Resultados del Sistema IEEE 14 barras obtenidos a través del índice  $I_{ETD}$ , para funciones de pertenencia tipo gaussiana

**Tabla 4.6** Áreas débiles del sistema IEEE 14 barras obtenidas a través del  $I_{ETD}$  (funciones de pertenencia gaussiana)

**Tabla 4.7** Resultados del Sistema IEEE 30 barras obtenidos a través del índice  $I_{ETD}$ , para funciones de pertenencia tipo triangular

**Tabla 4.8** Resultados del Sistema IEEE 30 barras obtenidos a través del índice  $I_{ETD}$ , para funciones de pertenencia tipo trapezoidal

**Tabla 4.9** Resultados del Sistema IEEE 30 barras obtenidos a través del índice  $I_{ETD}$ , para funciones de pertenencia tipo gaussiana

**Tabla 4.10** Áreas débiles del sistema IEEE 30 barras obtenidas a través del índice  $I_{ETD}$

**Tabla 4.11** Resultados del Sistema IEEE 118 barras obtenidos a través del índice  $I_{ETD}$ , para funciones de pertenencia tipo triangular

**Tabla 4.12** Resultados del Sistema IEEE 118 barras obtenidos a través del índice  $I_{ETD}$ , para funciones de pertenencia tipo trapezoidal

**Tabla 4.13** Resultados del Sistema IEEE 118 barras obtenidos a través del índice  $I_{ETD}$ , para funciones de pertenencia tipo gaussiana

**Tabla 4.14** Áreas débiles del sistema IEEE 118 barras obtenidas a través del índice  $I_{ETD}$



- Tabla 4.15** Comparación de la detección de áreas débiles respecto a la estabilidad de tensión a través de los índices entradas del sistema difuso e índice  $I_{ETD}$
- Tabla 4.16** Comparación de Resultados obtenidos a través del  $I_{ETD}$  y los índices entradas del Sistema Difuso para el sistema IEEE 14 barras
- Tabla 4.17** Comparación de Resultados obtenidos a través del  $I_{ETD}$  y los índices entradas del Sistema Difuso para el sistema IEEE 30 barras
- Tabla 4.18** Comparación de Resultados obtenidos a través del  $I_{ETD}$  y los índices entradas del Sistema Difuso para el sistema IEEE 118 barras

## APENDICE B

- Tabla B.1-** Datos de las Líneas del Sistema IEEE 14 barras
- Tabla B.2-** Datos de las Barras del Sistema IEEE 14 barras

## APENDICE C

- Tabla C.1-** Datos de las Líneas del Sistema IEEE 30 barras
- Tabla C.2-** Datos de las Barras del Sistema IEEE 30 barras

## APENDICE D

- Tabla D.1-** Datos de las Líneas del Sistema IEEE 118 barras
- Tabla D.2-** Continuación de los datos de las Líneas del Sistema IEEE 118 barras
- Tabla D.3-** Continuación de los datos de las Líneas del Sistema IEEE 118 barras
- Tabla D.4-** Datos de las Barras del Sistema IEEE 118 barras
- Tabla D.5-** Continuación de los datos de las Barras del Sistema IEEE 118 barras

## APENDICE E

- Tabla E.1-** Clasificación por contingencias de acuerdo a los márgenes de cargabilidad del Sistema IEEE 14 barras
- Tabla E.2-** Clasificación por contingencias de acuerdo a los márgenes de cargabilidad del Sistema IEEE 30 barras
- Tabla E.3-** Clasificación por contingencias de acuerdo a los márgenes de cargabilidad del Sistema IEEE 118 barras (50 contingencias más severas)



## UNIVERSIDAD DE CUENCA

Fundada en 1867

Yo, Eduardo Mauricio Samaniego Rojas, autor de la tesis "Detección de áreas débiles respecto a la estabilidad de tensión en tiempo real utilizando Lógica Difusa", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor/a.

Cuenca, 15 de Abril de 2013

Eduardo Mauricio Samaniego Rojas  
1103523856

---

*Cuenca Patrimonio Cultural de la Humanidad. Resolución de la UNESCO del 1 de diciembre de 1999*

Av. 12 de Abril, Ciudadela Universitaria, Teléfono: 405 1000, Ext.: 1311, 1312, 1316

e-mail [cdjbv@ucuenca.edu.ec](mailto:cdjbv@ucuenca.edu.ec) casilla No. 1103

Cuenca - Ecuador



**UNIVERSIDAD DE CUENCA**  
Fundada en 1867

Yo, Eduardo Mauricio Samaniego Rojas, autor de la tesis "Detección de áreas débiles respecto a la estabilidad de tensión en tiempo real utilizando Lógica Difusa", reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Magister en Sistemas Eléctricos de Potencia. El uso que la Universidad de Cuenca hiciera de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor.

Cuenca, 15 de abril de 2013

Eduardo Mauricio Samaniego Rojas  
1103523856

---

*Cuenca Patrimonio Cultural de la Humanidad. Resolución de la UNESCO del 1 de diciembre de 1999*

Av. 12 de Abril, Ciudadela Universitaria, Teléfono: 405 1000, Ext.: 1311, 1312, 1316  
e-mail cdjbv@ucuenca.edu.ec casilla No. 1103  
Cuenca - Ecuador



**UNIVERSIDAD DE CUENCA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**DETECCIÓN DE ÁREAS DÉBILES RESPECTO A LA  
ESTABILIDAD DE TENSIÓN EN TIEMPO REAL  
UTILIZANDO LÓGICA DIFUSA**

TESIS PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE MAGISTER EN  
SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

Por:

**Eduardo Mauricio Samaniego Rojas**

**Director de Tesis: Dr. Ing. Santiago Patricio Torres Contreras**

Universidade Estadual de Campinas

Cuenca – Ecuador

2013



## AGRADECIMIENTOS

Al finalizar el presente trabajo quiero dejar constancia de mi profundo agradecimiento a:

La Universidad de Cuenca, a través de la Maestría en Sistemas Eléctricos de Potencia, por permitirme ser parte de la primera promoción de la maestría en SEP y compartir con excelentes docentes y compañeros.

Al Doctor Santiago Torres, por su amistad, paciencia y excelente orientación, sin la cual, no hubiera sido posible concluir satisfactoriamente este trabajo.



## DEDICATORIA

A mi esposa Vanessa, por su amor, paciencia y comprensión durante todos estos años de estudio.

A mi adorado hijo Nicolás, quien ha sido mi mayor motivación para finalizar el presente trabajo.

A mis padres Rosita Amelia y Bolívar Eduardo, quienes con su cariño, ejemplo y apoyo incondicional han sido un soporte fundamental para mi desarrollo personal y profesional.

A mis hermanos: Natalia, Andrés Felipe y Vinicio, compañeros de vida en los buenos y malos momentos.

A mi abuelita Julia Victoria, quién con su amor, generosidad y bondad, constituye un ejemplo de vida para todos quienes estamos a su lado.

En general a toda mi familia.

## SIMBOLOGÍA

### Abreviaturas

CPF	Continuation power flow
FIS	Sistema de inferencia difuso
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
CIGRE	International Council on Large Electric Systems
SEP	Sistema Eléctrico de Potencia
SCADA	Sistema de control, adquisición y supervisión de datos
SVC	Compensadores estáticos de potencia reactiva
Ploss	Pérdidas de potencia activa
Qloss	Pérdidas de potencia reactiva
Ipq	Índice de estabilidad de tensión basado en flujos de potencia activa y reactiva
$I_{ETD}$	Índice de estabilidad de tensión difuso
TVI	Índice del vector tangente
VSF	Voltage Sensitivity Factor
VSMI	Voltage Stability Margin Index
FVSI	Fast Voltage Stability Index
PSAT	Power System Analysis Toolbox
UWPFLOW	University Waterloo Power Flow

### Símbolos Principales

$\lambda$	Parámetro de carga
$\theta$	Ángulo de tensión de barra
$\varphi$	Ángulo del factor de potencia
$P$	Potencia activa
$Q$	Potencia reactiva
$S$	Potencia aparente
$V$	Tensión
$\mu_A(x)$	Función de pertenencia del conjunto difuso A



## CAPÍTULO I

### INTRODUCCIÓN

El incremento continuo de la demanda de energía, ocasiona que los Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP) inminentemente trabajen cada vez más cerca de sus límites de estabilidad de tensión, lo cual, indefectiblemente pone en riesgo de colapso a los sistemas eléctricos de transmisión, razón por la cual, el control de la seguridad de los sistemas ha tenido un importante auge en los últimos años.

En este contexto, se ha hecho énfasis en dotar a los operadores de los Centros de Control, herramientas computacionales adecuadas que les permita de alguna manera “estimar” el comportamiento del sistema, ante eventuales contingencias o salidas de operación de elementos del sistema, para con ello, detectar las áreas más vulnerables en cuanto a la estabilidad de tensión, de tal forma que los operadores puedan planificar las maniobras necesarias para que el sistema soporte las contingencias más críticas manteniendo la confiabilidad de la operación y evitando el colapso del sistema.

Algunas de las metodologías utilizadas para determinar la estabilidad de tensión en un sistema eléctrico, en el ambiente de la operación fuera de línea, basan su funcionamiento en el análisis de las contingencias de mayor criticidad establecidas previamente por la experiencia de los operadores; sin embargo, la herramienta de mayor aceptación en la literatura es el cálculo de los **márgenes de cargabilidad**, proceso mediante el cual se establece la distancia entre el punto de operación actual y el punto de colapso (en función del parámetro de carga  $\lambda$ ) para cada una de las contingencias simples posibles en el sistema. Si bien este procedimiento es muy confiable, pierde su aplicabilidad en el ambiente de la operación en tiempo real de los SEP, ya que requiere de grandes esfuerzos computacionales, lo que se refleja en el requerimiento de elevados tiempos de cálculo, razón por la cual se vuelve prácticamente inaplicable en grandes sistemas.

En general, se han propuesto varios índices para determinar la estabilidad de tensión tanto en el sistema eléctrico completo como en diferentes áreas del sistema. Sin embargo, la mayor parte de ellos requieren un conocimiento previo de las áreas críticas, o en su defecto presentan comportamientos no lineales y requieren altos esfuerzos computacionales.

En el ambiente de la operación en línea de los sistemas eléctricos, además de la necesidad de disponer de información relevante en tiempos muy cortos, también se requiere de herramientas computacionales que le proporcionen al operador una lista confiable de las contingencias más críticas que puedan ocasionar que el sistema se acerque al punto de inestabilidad de tensión. Esta clasificación de contingencias críticas le permitirá al operador realizar un estudio particular a cada

una de estas contingencias, y de ser el caso, planificar las acciones de control necesarias para garantizar la estabilidad de tensión del sistema.

En este trabajo se propone el desarrollo de un nuevo índice de estabilidad de tensión que trate de solventar algunos de los problemas presentados por otros índices de estabilidad en la clasificación de contingencias críticas. Este indicador es desarrollado utilizando la Lógica Difusa, que trata de tomar ventaja de las propiedades de algunos índices de estabilidad ya propuestos, y que son usados como entradas del sistema difuso. La salida de este sistema de inferencia difuso es el indicador propuesto, cuyo objetivo es realizar una clasificación de las contingencias que pueden ocasionar los mayores problemas al sistema, en cuanto a la estabilidad de tensión. Para ello, se obtendrán los indicadores para cada una de las líneas del sistema, los cuales tendrán valores entre 0 y 1, cuyo significado será el siguiente: “cuanto menor sea el valor del índice, menor será el margen de estabilidad del sistema y viceversa”. Estos índices serán ordenados de menor a mayor, lo que le permitirá al operador observar las líneas cuya salida de operación producirán los mayores problemas al sistema, con respecto a la estabilidad de tensión. De esta manera, se podrá determinar que las *Áreas Débiles* serán aquellas Líneas de Transmisión en las cuales se obtengan los menores valores del índice de estabilidad de tensión propuesto.

El cálculo del indicador se lo realizará para condiciones normales de funcionamiento y su eficiencia será probada usando distintos niveles de carga del sistema. Los resultados obtenidos con el nuevo índice, serán contrastados con los cálculos de los márgenes de estabilidad de tensión ante las salidas simples de operación de cada una de las líneas del sistema (criterio N-1), proceso a realizarse a través del algoritmo del flujo de potencia continuado (Continuation Power Flow), el cual está implementado en PSAT.

En el capítulo 2 se presentan los aspectos teóricos y definiciones referentes a la estabilidad de tensión en sistemas eléctricos, profundizando en la teoría que rige el fenómeno del colapso de tensión e incluyendo las metodologías de análisis más utilizadas para su detección. Además se desarrolla el estado del arte, el mismo que se basa en la descripción de algunos de los índices de estabilidad de tensión que se han utilizado para realizar la clasificación de contingencias de los sistemas eléctricos, respecto de la estabilidad de tensión, haciendo referencia a sus fortalezas y debilidades.

En el capítulo 3 se describe el desarrollo del sistema de inferencia difuso en el que se basa la obtención del índice de estabilidad de tensión propuesto. Previamente, se realiza un profundo análisis del comportamiento de los índices de estabilidad de tensión considerados como entradas candidatas del sistema difuso, especialmente en lo que respecta al sustento teórico, comportamiento frente a incremento continuo del nivel de carga y suministro de información relevante para la detección de áreas débiles de un sistema respecto a la estabilidad de tensión.

El capítulo 4 presenta los resultados obtenidos a través del índice de estabilidad de tensión difuso para los distintos sistemas de prueba escogidos: IEEE 14 barras, IEEE 30 barras e IEEE 118 barras y adicionalmente se contrasta dichos resultados con los obtenidos a través del margen de cargabilidad, para determinar el nivel de eficiencia del índice propuesto.

En el capítulo 5 se describen las consideraciones finales y conclusiones a las cuales se ha llegado luego de haber analizado el comportamiento del índice de estabilidad de tensión propuesto en los distintos sistemas de prueba.

Cabe indicar que los objetivos planteados en este trabajo son los siguientes:

### **Objetivo General**

Desarrollar un nuevo índice de estabilidad de tensión, aplicable al análisis de seguridad en tiempo real, que sea capaz de detectar las áreas débiles del sistema, frente a incrementos de carga o a la salida no programada de las líneas de transmisión del sistema, usando un sistema de inferencia difuso.

### **Objetivos Específicos:**

- Utilizar la Lógica Difusa para obtener un indicador de las áreas débiles del sistema, referente a problemas de estabilidad de tensión.
- Usar el indicador propuesto para evaluar la salida no programada de líneas de transmisión y su efecto en la estabilidad de tensión del sistema.
- Realizar una clasificación de las contingencias más severas del sistema relativas al problema de estabilidad de tensión, a través del uso del indicador propuesto.
- Proponer el uso del indicador en ambientes de control en tiempo real.

## CAPÍTULO II

# ESTABILIDAD DE TENSIÓN EN LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

### 2.1. Conceptos básicos y definiciones [1,2]

En general se puede decir que, la estabilidad de los sistemas eléctricos de potencia, está interesada en el estudio de la capacidad de un sistema de alcanzar un nuevo punto de equilibrio estable o de volver al punto de equilibrio original, luego de la ocurrencia de una perturbación o contingencia.

La definición formal de estabilidad de sistemas de potencia ha sido establecida por IEEE de la siguiente manera [1]:

**“La estabilidad de los sistemas eléctricos de potencia es la capacidad del sistema, para una condición de operación inicial, de retornar a un estado de operación de equilibrio luego de la ocurrencia de una perturbación física, con la mayor cantidad de variables limitadas para que el sistema prácticamente permanezca intacto”.**

La inestabilidad en un sistema de potencia puede manifestarse de varias formas dependiendo de la configuración del sistema y del modo de operación. Tradicionalmente uno de los principales problemas de estabilidad ha sido el mantener la operación síncrona. Dado que los sistemas de energía dependen de máquinas síncronas para la generación de energía eléctrica, una condición necesaria para el funcionamiento satisfactorio del sistema es que, todas las máquinas síncronas permanezcan en sincronismo. Este aspecto de la estabilidad se ve influida por la dinámica de los ángulos de los rotores de los generadores y de las relaciones potencia-ángulo.

Sin embargo, la inestabilidad también puede producirse sin que necesariamente se haya perdido el sincronismo, por ejemplo un sistema que consiste de un generador síncrono el cual alimenta un motor de inducción (carga) a través de una línea de transmisión, puede llegar a ser inestable debido al colapso de la tensión de carga. Mantener el sincronismo no es el problema en este caso, puesto que la mayor preocupación es la estabilidad y el control de la tensión.

Los sistemas de potencia son sistemas altamente no lineales, los cuales operan en un ambiente cuyas características cambian constantemente, como por ejemplo: incrementos de carga, salidas intempestivas de líneas, generadores, etc. Es por esta razón que, en la evaluación de la estabilidad, la preocupación principal es el comportamiento del sistema cuando este ha sido sometido a una perturbación transitoria.

Las perturbaciones que afectan a los sistemas de potencia pueden ser de pequeño o gran impacto; es así que, cuando se presentan pequeñas

perturbaciones, tales como pequeñas variaciones de carga, el sistema debe ser capaz de ajustarse a las nuevas condiciones de operación de forma satisfactoria. En el caso de grandes perturbaciones, como cortocircuitos en líneas de transmisión, salida de grandes generadores o cargas, se pueden producir cambios estructurales en el sistema, tales como variaciones en la potencia de transferencia, en la velocidad de los rotores de los generadores, y/o en las tensiones en los nodos.

La respuesta de un sistema de potencia a una perturbación está directamente relacionada con el comportamiento de los equipos que este contenga; por ejemplo, un cortocircuito en un elemento crítico, seguido por su aislamiento por la actuación de los relés de protección, producirá variaciones en los flujos potencia, en las tensiones de barra y en la velocidad de los generadores; las variaciones de tensión a su vez provocarán la actuación de los reguladores de tensión de los sistemas de generación y transmisión; las variaciones de la velocidad provocarán la actuación de los controladores de los generadores; los cambios de tensión y frecuencia afectarán las cargas. Adicionalmente, otro aspecto a tomar en consideración, es la actuación de los dispositivos de protección, los mismos que pueden responder a las variaciones de las variables del sistema, ocasionando la salida de equipos, lo cual necesariamente afecta el comportamiento del sistema eléctrico.

En general, el fenómeno de la estabilidad puede ser caracterizado en base a los siguientes aspectos:

- la naturaleza del fenómeno físico involucrado (estabilidad de ángulo, frecuencia, tensión).
- la magnitud de la perturbación (estabilidad de gran perturbación y pequeña perturbación).
- las dinámicas involucradas (estabilidad de corto y largo plazo).

## **2.2. Clasificación de la estabilidad**

Como se indicó anteriormente, los sistemas de potencia están expuestos y son susceptibles a perturbaciones de diversos tipos y con diversas probabilidades de ocurrencia. Es así que IEEE y el CIGRE en base a la naturaleza del fenómeno físico involucrado, a la magnitud de la perturbación y a la dinámica involucrada, han propuesto la siguiente clasificación [15]:

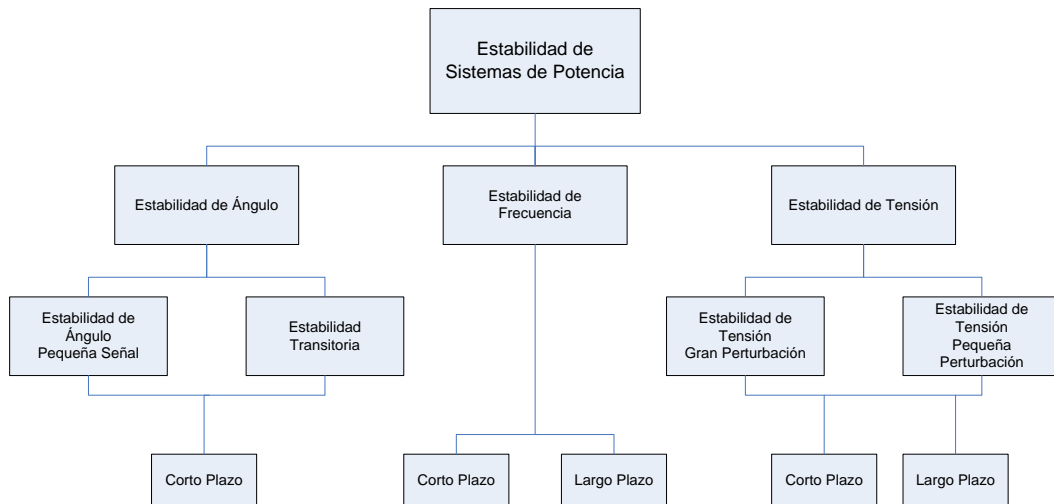


Fig. 2.1 Clasificación de la estabilidad de los sistemas de potencia.

### 2.2.1. Estabilidad de ángulo

La estabilidad de ángulo es la capacidad que posee un sistema para mantener los generadores en sincronismo luego de la ocurrencia de una perturbación. Esto depende de la capacidad para mantener o restaurar el equilibrio entre el torque electromagnético y mecánico en cada uno de los generadores del sistema.

En general, este problema se puede hacer evidente a través de la ocurrencia de oscilaciones angulares y de frecuencia en algunos generadores, lo cual, puede desencadenar en la pérdida del sincronismo de otros generadores.

A su vez, la estabilidad de ángulo ha sido dividida en: estabilidad de pequeña señal y estabilidad transitoria.

#### 2.2.1.1. Estabilidad de ángulo de pequeña señal

La estabilidad de pequeña señal se define como la capacidad del sistema de potencia para mantener el sincronismo bajo la presencia de pequeñas perturbaciones; estas perturbaciones ocurren continuamente en el sistema, debido a pequeñas variaciones de carga y generación, las cuales ocurren permanentemente durante la operación diaria de las redes.

La inestabilidad de ángulo de pequeña señal, puede producirse de dos formas:

- incremento constante de ángulo del rotor del generador debido a la insuficiencia del torque sincronizante.
- aumento de la amplitud de las oscilaciones en el rotor del generador, debido a la insuficiencia del torque de amortiguamiento.

El tipo de respuesta del sistema ante la inestabilidad de pequeña señal, depende de varios aspectos, tales como: el punto de operación inicial, robustez del sistema de transmisión y el tipo de controles de excitación de los generadores.

### **2.2.1.2. Estabilidad transitoria de ángulo**

Es la capacidad del sistema de potencia de mantener el sincronismo luego de la ocurrencia de una severa perturbación transitoria, tal como: fallas en líneas de transmisión, pérdidas de generación o de grandes cargas. Las respuestas del sistema para este tipo de perturbaciones implican grandes excursiones de los ángulos de los rotores de los generadores y es influenciada por las relaciones no lineales entre potencia y ángulo.

La estabilidad transitoria está estrechamente influenciada por las características inherentes a la no linealidad del sistema y depende además del punto de operación inicial y obviamente de la severidad de la perturbación [3]. El sincronismo es mantenido si la separación angular resultante entre los generadores permanece dentro de ciertos límites admisibles.

En estudios de estabilidad transitoria el período de interés usualmente es limitado de 3 a 5 segundos, luego de la ocurrencia de la perturbación, pudiendo extenderse hasta aproximadamente los 10 segundos para muy grandes sistemas con dominantes modos de oscilación inter-área. Para la realización de este tipo de estudios, es necesario el uso de modelos detallados del generador y de los demás equipos del sistema, lo cual, necesariamente conlleva a que, ecuaciones diferenciales sean solucionadas a través de técnicas de integración numérica.

### **2.2.2. Estabilidad de frecuencia [3]**

La estabilidad de frecuencia es la capacidad del sistema de potencia para mantener constante la frecuencia luego de la ocurrencia de una severa perturbación, la misma que, por su magnitud genera un significativo desbalance entre generación y carga. Por lo tanto, el análisis de la estabilidad de frecuencia se centra en el estudio de las variaciones en la frecuencia del sistema debido a los grandes y repentinos cambios en el equilibrio generación-carga.

La frecuencia puede mantener solamente si el balance entre la generación y la carga del sistema pueden ser restauradas tan pronto como sea posible luego de ocurrida la perturbación, con la salida no intencional de la menor cantidad de carga posible. Si el sistema entra en una condición de inestabilidad de frecuencia, la frecuencia puede caer rápidamente o en su defecto puede producirse una oscilación sostenida de frecuencia, lo cual conllevará al disparo de generadores y cargas por actuación de los relés de frecuencia.

Los problemas de estabilidad de frecuencia generalmente son asociados con inadecuadas respuestas de los equipos, deficiente coordinación y control de equipos de control o insuficientes reservas de generación. Debe tomarse en cuenta que, cualquier perturbación que pueda ser causante de pérdida significativa de carga o generación puede ser motivo de preocupación respecto de la estabilidad de frecuencia del sistema.

### 2.2.3. Estabilidad de Tensión [1, 2, 5]

En términos generales, la estabilidad de tensión se define como la capacidad de un sistema de potencia para mantener estables las tensiones en todas las barras luego de haber sido sometido a una perturbación a partir de un punto de operación inicial conocido como caso base [5]. Esto básicamente depende de la capacidad para mantener o restablecer un equilibrio entre la demanda y la generación del sistema de potencia.

Un sistema entra en inestabilidad de tensión cuando una perturbación, incremento de carga o cambio en las condiciones del sistema causan una progresiva e incontrolable caída o aumento de tensión en algunas barras. El principal factor causante de la inestabilidad es la incapacidad del sistema de potencia para proveer la demanda de energía reactiva. Sin embargo de aquello, el corazón del problema usualmente es la caída de tensión que ocurre cuando las potencias activa y reactiva fluyen a través de reactancias inductivas asociadas con las redes de transmisión.

Un criterio para la estabilidad de tensión, indica que, en una condición de operación dada para todas las barras del sistema, la magnitud de la tensión de barra ( $V$ ) incrementa en tanto la inyección de potencia reactiva ( $Q$ ) en esa barra es incrementada; por tanto y análogamente, se puede deducir que, un sistema es inestable en tensión si, para al menos una barra del sistema, la magnitud de la tensión de barra decrece como la inyección de potencia reactiva en la misma barra es incrementada [5]. En forma resumida se puede decir que, un sistema es estable en tensión si la sensibilidad  $V$ - $Q$  es positiva para todas las barras y es inestable si la sensibilidad  $V$ - $Q$  es negativa para al menos una de las barras.

Uno de los posibles resultados de la inestabilidad de tensión es la pérdida de carga en un área o el disparo de líneas de transmisión y demás elementos del sistema por actuación de los elementos de protección, lo que conlleva a salidas de operación en cascada que pueden conducir a la pérdida de sincronismo de algunos generadores. La inestabilidad de tensión esencialmente es un fenómeno local, sin embargo sus consecuencias pueden tener un impacto global.

Las caídas progresivas de tensión en las barras pueden también ser asociadas con la pérdida de sincronismo de diversos generadores del sistema, es decir un sistema que presenta problemas de estabilidad de ángulos puede resultar en problemas de estabilidad de tensión y, viceversa, sistemas que presentan un colapso de tensión llevan eventualmente a una separación angular de sus generadores. Cabe aclarar que, las causas para estos dos problemas de estabilidad son completamente diferentes, puesto que, la inestabilidad de tensión se debe principalmente a la ausencia total de un punto de equilibrio después de la ocurrencia de una perturbación, mientras que, la inestabilidad de ángulo se debe básicamente a la ausencia de un par de sincronismo entre varios generadores [2].



Para un mejor análisis, la estabilidad de tensión se lo clasifica en dos grupos: estabilidad de tensión de gran perturbación y estabilidad de tensión de pequeña perturbación.

### **2.2.3.1. Estabilidad de tensión de gran perturbación**

La estabilidad de tensión de gran perturbación corresponde a la capacidad del sistema para mantener y controlar las tensiones en presencia de grandes perturbaciones, tales como: fallas, pérdidas de generadores o contingencias de líneas importantes. Esta capacidad es determinada por las características de las cargas del sistema y por las interacciones entre los dispositivos de control y protección.

La determinación de la estabilidad de tensión para una gran perturbación, requiere de la evaluación del sistema desde el punto de vista dinámico no-lineal y modelamiento detallado a través de un sistema de ecuaciones algebraico-diferencial no lineales. El comportamiento del sistema debe ser analizado por un período de tiempo lo suficientemente grande como para permitir la identificación de las interacciones entre los dispositivos de control y protección, tales como: los transformadores con ajuste de la posición del tap y los limitadores de la corriente de campo de los generadores; para tal efecto, el período de estudio puede ir desde unos pocos segundos hasta decenas de minutos.

Un criterio para determinar la estabilidad de tensión de gran perturbación de un sistema de potencia indica que, después de haberse producido una perturbación dada y de haberse realizado las acciones de control correspondientes, si la tensión en todas las barras alcanza niveles aceptables, entonces el sistema es considerado estable. Sin embargo, este criterio en la actualidad es discutible, puesto que, un colapso de tensión también puede producirse incluso con niveles altos de tensión en las barras, especialmente cuando existe una elevada compensación de potencia reactiva (capacitores), es por esta razón que, en lugar de niveles de tensión se han definido los márgenes de cargabilidad como criterios para determinar la estabilidad de tensión de un sistema.

### **2.2.3.2. Estabilidad de tensión de pequeña perturbación**

La estabilidad de tensión de pequeña perturbación corresponde a la capacidad de un sistema de potencia para mantener las tensiones cuando el sistema es sometido a pequeñas perturbaciones, tales como pequeñas variaciones en la carga del sistema. Esta forma de estabilidad es determinada por las características de las cargas y por las interacciones entre los dispositivos de control y protección en un cierto instante de tiempo. Básicamente este concepto es usado para determinar, en cualquier instante, como responde la tensión del sistema ante pequeños cambios en el sistema.

Los procesos básicos que contribuyen a la inestabilidad de tensión de pequeña perturbación son esencialmente de naturaleza correspondientes al régimen de estado estable; por lo tanto, los análisis estáticos pueden ser usados efectivamente en la determinación de los márgenes de estabilidad, identificando los factores determinantes del fenómeno y estudiando una amplia variedad de condiciones de operación del sistema, incluyendo un considerable número de escenarios post-contingencia.

Un criterio para evaluar la estabilidad de tensión de pequeña perturbación está basado en la sensibilidad entre la magnitud de las tensiones y la inyección de potencia reactiva en las barras, es decir, un sistema es estable respecto a la tensión si la sensibilidad  $V-Q$  es positiva para todas las barras y, es inestable si la sensibilidad  $V-Q$  es negativa para al menos una de las barras del sistema.

### 2.3. Métodos de análisis de la estabilidad de tensión [1, 6, 7]

El análisis de la estabilidad de tensión implica la examinación de dos aspectos básicos [6]:

- *La proximidad a la inestabilidad de tensión:* La distancia hacia la inestabilidad puede ser medida en términos de cantidades físicas, tales como: nivel de carga, flujos de potencia activa a través de elementos críticos y reservas de potencia reactiva. La medida más adecuada para cualquier situación dada depende del sistema específico y del uso que se pretenda dar a dicho margen, como puede ser la toma de decisiones para operación o para la planificación del sistema.
- *Mecanismo de inestabilidad de tensión:* Hace referencia a los distintos aspectos, circunstancias y factores que afectan y contribuyen a la inestabilidad; las siguientes interrogantes deben ser respondidas:
  - ¿Cómo y por qué ocurre la inestabilidad?
  - ¿Cuáles son los factores que contribuyen a la inestabilidad?
  - ¿Cuáles son las áreas débiles del sistema, respecto de la estabilidad de tensión?
  - ¿Qué medidas son las más efectivas para mejorar la estabilidad de tensión?

Las simulaciones en el dominio del tiempo usando modelos apropiados, logran capturar los eventos con su respectiva cronología hasta llegar a la inestabilidad; sin embargo de aquello, este tipo de simulaciones ocupan mucho tiempo y no proveen información respecto de las sensibilidades y del grado de estabilidad.

Por otro lado, se ha verificado que, la influencia de la dinámica en los análisis de estabilidad de sistemas de potencia es muy baja, razón por la cual, muchos

aspectos de este fenómeno pueden ser analizados eficientemente a través del uso de métodos estáticos, a través de los cuales se estudia la viabilidad de un punto de equilibrio representado por un punto de operación específico.

El análisis dinámico es útil para estudios detallados de situaciones específicas de colapso de tensión, de coordinación de protecciones y controles y, pruebas de medidas correctivas. Además, las simulaciones dinámicas también permiten analizar la forma en la cual se alcanzó el punto de equilibrio estable, luego de la ocurrencia de un evento.

Las técnicas de análisis estático permiten analizar un amplio rango de condiciones del sistema, por tanto, si es utilizado apropiadamente, proporciona una clara visión de la naturaleza del problema e identifica los factores claves que lo contribuyen a generar. A través de análisis estáticos es posible realizar estudios de estabilidad ante la presencia de perturbaciones, así como también se puede estimar los puntos de bifurcación.

Existen varias metodologías propuestas en la literatura para realizar análisis de la estabilidad de tensión en sistemas de potencia, muchos de los cuales tienen como premisa el cálculo de índices de estabilidad basados en la proximidad hacia el punto de colapso de tensión y otros basados en el comportamiento de ciertas variables del sistema que tienen relación directa con el fenómeno de la estabilidad [8]. Otra metodología muy difundida y aplicada es el uso del método de continuación del flujo de potencia [5], técnica que será profundizada posteriormente.

El uso de factores de sensibilidad de ciertas variables del sistema ha sido ampliamente difundido, ya que permite detectar con bastante precisión los nodos o barras que son susceptibles de incurrir en inestabilidad de tensión.

En general, las metodologías de estudio del fenómeno se basan en técnicas de detección y predicción de la estabilidad de tensión; es decir, la detección se usa para obtener el estado de operación de las barras y la predicción tiene como objeto encontrar los márgenes y límites de tensión para la operación segura del sistema. Este tipo de estudios se realiza por medio de métodos analíticos y de monitoreo [9].

### **2.3.1. Métodos Analíticos [1, 8, 9 ]**

Los métodos analíticos se usan para estudiar detalladamente las causas y los efectos de la estabilidad de tensión, así como también el comportamiento de las variables del sistema, esto con la finalidad de definir sobre la base del análisis, las soluciones preventivas y correctivas respecto de la estabilidad. Todas las metodologías de tipo analíticas utilizan técnicas matemáticas, las mismas que requieren herramientas computacionales con un alto índice de eficiencia para su implementación en sistemas grandes. Este tipo de estudios puede ser realizado

tanto en forma estática como en forma dinámica, sin embargo, como ya se había indicado las metodologías de análisis estáticas son más comúnmente usadas, entre estas tenemos: métodos basados en flujos de potencia convencionales y métodos basados en flujos de potencia continuos.

### **2.3.1.1. Métodos basados en flujos de potencia convencionales**

Corresponden a flujos de potencia estáticos que representan la variación de las tensiones de barra con respecto a variaciones de la potencia de carga. Estas metodologías calculan los estados, límites y márgenes de estabilidad de tensión del sistema, para diversas condiciones de operación como pueden ser: caso base y después de la ocurrencia de contingencias. En general las técnicas desarrolladas a través de flujos de potencia convencionales son: análisis de sensibilidad, análisis por equivalentes de red, singularidad de la matriz Jacobiana, diferencia vectorial y técnicas basadas en funciones de energía. A continuación se indicarán brevemente las técnicas más usadas [9].

#### **➤ Análisis de sensibilidad**

Esta metodología se basa en el análisis de la variación de la tensión con respecto a la potencia, para con ello, determinar los márgenes y límites de estabilidad de tensión, así como también las áreas y zonas débiles del sistema. Cabe indicar que el análisis de sensibilidad más usado es el que relaciona la potencia reactiva con la tensión (análisis Q-V).

La sensibilidad Q-V de una barra representa la pendiente de la curva Q-V para un punto de operación dado. Una sensibilidad Q-V positiva indica una operación estable, mientras menor es la sensibilidad, el sistema es más estable. Cuando la estabilidad disminuye, la magnitud de la sensibilidad incrementa, llegando a un valor infinito en el límite de estabilidad. Contrariamente, una sensibilidad Q-V negativa es indicador de operación inestable; una pequeña sensibilidad negativa representa una operación muy inestable. Debido a la naturaleza no lineal de la relación Q-V, la magnitud de las sensibilidades para diferentes condiciones del sistema no proporciona una medida directa relativa al grado de estabilidad.

#### **➤ Análisis Modal**

Este método se basa en la reducción de la matriz Jacobiana con la finalidad de encontrar los valores y vectores propios de estado. Este es un método indirecto del cálculo de la sensibilidad Q-V. En general el análisis modal es útil en la identificación de áreas o barras críticas que contribuyen a la pérdida de estabilidad o al colapso de tensión. Con este enfoque es posible obtener los factores de participación del sistema, los cuales indican las medidas de control más eficientes para solucionar los problemas de estabilidad de tensión en un modo determinado. Con base en el análisis modal se puede obtener algunos factores de participación:

**Factores de participación de barras.**- determina las áreas asociadas con cada modo. El factor de participación de barra en un determinado modo indica la eficiencia de las acciones de control aplicadas a la barra en la estabilización del modo.

**Factor de participación de líneas.**- indica para cada modo, las líneas que consumen mayor cantidad de potencia reactiva en respuesta a un cambio incremental en la carga reactiva. Las líneas con altos valores indican alto nivel de carga. En general, estos factores de participación son útiles para identificar las medidas correctivas para solucionar problemas de estabilidad de tensión y para selección de contingencias.

**Factores de participación de generadores.**- indica para cada modo, los generadores que suministran más potencia reactiva en respuesta a un cambio incremental de carga reactiva en el sistema

### **2.3.1.2. Métodos basados en flujos de potencia continuos [1, 5, 8]**

Son métodos estáticos basados en flujos de potencia continuos, los cuales tienen como objeto encontrar con precisión los límites de estabilidad de tensión. Estos métodos tienen una gran ventaja con respecto a los flujos de potencia convencionales, ya que no presentan problemas de convergencia cuando el sistema se acerca al punto de colapso.

En general, el flujo de potencia de continuación corresponde a una reformulación de las ecuaciones del flujo de potencia, de modo que ellas permanezcan bien condicionadas en todas las condiciones posibles de carga; este enfoque evita que la matriz sea singular en el punto de colapso de tensión. Además, a través de esta metodología se pueden trazar ciertas curvas (PV, QV ó SV) tanto para puntos de operación estables e inestables. A continuación se presenta el principio básico de este método [9]:

#### **Principio básico:**

El flujo de potencia de continuación utiliza un proceso iterativo que contiene dos pasos: el de predicción y el de corrección, tal como se muestra en la figura 2.2. Tomando como punto de partida una solución inicial conocida (A) y considerando un patrón de incremento de carga previamente establecido, se estima la solución (B) a través de la predicción efectuada según la dirección tangente a la curva en el punto (A); luego el paso corrector determina la solución exacta (C) empleando el cálculo convencional del flujo de potencia considerando fija la carga del sistema.

Para un nuevo incremento de carga se pronostican las tensiones en base a un nuevo paso de predicción de acuerdo a la dirección tangente a la curva en el nuevo punto de partida (C). Si el nivel de carga estimada (D) es mayor que la carga máxima correspondiente a la solución exacta (E), el paso de corrección

considerando la carga fija no convergería; por lo tanto se aplica un paso corrector manteniendo fijo el nivel de tensión de la barra que está siendo analizada para encontrar la solución exacta (E). A medida que se va alcanzando el límite de estabilidad de tensión, para determinar la carga máxima exacta, el incremento de carga tiene que reducirse gradualmente durante los sucesivos pasos de predicción.

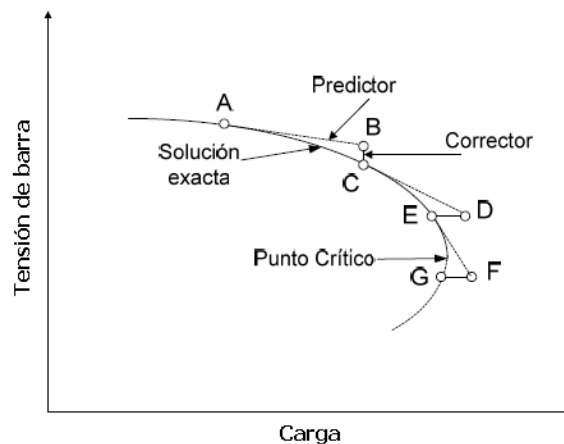


Fig. 2.2 Secuencia típica de cálculos en el método de continuación del flujo de potencia.

### Formulación matemática [1]:

Las ecuaciones básicas son similares a las correspondientes al flujo de potencia convencional, con la diferencia que, el incremento de la carga es añadido como un parámetro, en tal virtud, la reformulación de las ecuaciones del flujo de potencia puede ser expresada de la siguiente manera:

$$F(\vec{\theta}, \vec{V}) = \lambda \vec{K} \quad (2.1)$$

Donde

$\lambda$  es el parámetro de carga

$\vec{\theta}$  es el vector de los ángulos de las tensiones de barra

$\vec{V}$  es el vector de las magnitudes de las tensiones de barra

$\vec{K}$  es el vector que representa el porcentaje de cambio de la carga en cada barra

El sistema de ecuaciones debe ser resuelto, haciendo variar el parámetro de carga  $\lambda$  entre  $0 \leq \lambda \leq \lambda_{\text{crítico}}$ , para lo cual,  $\lambda=0$  representa la condición base de carga y  $\lambda=\lambda_{\text{crítico}}$  representa el nivel de carga crítica.

La ecuación 2.1 se puede reformular de la siguiente forma:

$$\vec{F}(\vec{\theta}, \vec{V}, \lambda) = 0 \quad (2.2)$$

### El paso de predicción:

Una vez conocida una solución del sistema de ecuaciones no lineales de la ecuación 2.2 (solución obtenida al iniciar el proceso de iteración con  $\lambda=0$ ), en el paso predictor se usa una aproximación lineal para estimar la siguiente solución para el cambio en una de las variables de estado, las mismas que pueden ser:  $\theta$ ,  $V$  o  $\lambda$ . Si se toma las derivadas de los dos miembros de la ecuación 2.2 con las variables de estado correspondientes a la solución inicial del flujo de potencia, se tiene lo siguiente:

$$\vec{F}_{\vec{\theta}} d_{\vec{\theta}} + \vec{F}_{\vec{V}} d_{\vec{V}} + \vec{F}_{\lambda} d_{\lambda} = \mathbf{0}$$

Lo mismo que expresado vectorialmente resulta:

$$[\vec{F}_{\vec{\theta}} \quad \vec{F}_{\vec{V}} \quad \vec{F}_{\lambda}] \begin{bmatrix} d_{\vec{\theta}} \\ d_{\vec{V}} \\ d_{\lambda} \end{bmatrix} = 0 \quad (2.3)$$

Donde

$\vec{F}_{\vec{\theta}}$  es la Matriz Jacobiana de las ecuaciones 2.2 respecto de las variables contenidas en  $\theta$ , evaluada en el punto solución conocido de 2.2

$\vec{F}_{\vec{V}}$  es la Matriz Jacobiana de las ecuaciones 2.2 respecto de las variables contenidas en  $V$ , evaluada en el punto solución conocido de 2.2

$\vec{F}_{\lambda}$  es la Matriz Jacobiana de las ecuaciones 2.2 respecto de la variable  $\lambda$ , evaluada en el punto solución conocido de 2.2

Además, también se puede distinguir en la ecuación 2.3 el vector conformado por las derivadas de las variables:  $\theta$ ,  $V$  y  $\lambda$ , el mismo que corresponde al **vector tangente** y se define de la siguiente forma:

$$\vec{t} = \begin{bmatrix} d_{\vec{\theta}} \\ d_{\vec{V}} \\ d_{\lambda} \end{bmatrix} \text{ el cual tiene } (2n_{PQ} + n_{PV} + 1) \text{ elementos}$$

Debido a la inserción del parámetro  $\lambda$  en las ecuaciones del flujo de potencia, se adiciona una variable desconocida, para resolver el sistema de ecuaciones es necesaria la formulación de una ecuación adicional. Esta condición se satisface por la condición de uno de los componentes del vector tangente para +1 o -1. A la variable incógnita del sistema de ecuaciones 2.2 se conoce generalmente como el **parámetro de continuación**. Para esta nueva condición la ecuación 2.3 se convierte en:

$$\begin{bmatrix} \vec{F}_{\vec{\theta}} & \vec{F}_{\vec{V}} & \vec{F}_{\lambda} \\ \vec{e}_k & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\vec{\theta} \\ d\vec{V} \\ d\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \pm 1 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Donde  $\vec{e}_k$  es un vector fila con todos sus elementos iguales a cero excepto el  $k^{\text{th}}$  elemento (correspondiente al parámetro de continuación) el cual toma el valor 1. El imponer  $t_k=+1$  o  $t_k=-1$  depende de cómo cambia la variable incógnita  $k$  a medida que se va trazando el camino de la solución; si ésta variable aumenta, se emplea el valor  $t_k=+1$  y si disminuye se emplea el valor  $t_k=-1$ .

Inicialmente el parámetro de carga  $\lambda$  es escogido como parámetro de continuación y el correspondiente componente del vector tangente se establece en 1. Durante los subsiguientes pasos de predicción, el parámetro de continuación se elige a una de las variables contenidas en los vectores  $\vec{\theta}$ ,  $\vec{V}$  (la variable de estado que presente la mayor tasa de variación cerca de la solución inicial). Es importante tener en cuenta que, el signo de su pendiente determina el signo del componente correspondiente al vector tangente. A medida que se alcanza al máximo valor de carga, normalmente la tensión será el parámetro con el cual se produce la mayor variación.

Una vez que el vector tangente es calculado, la predicción de la siguiente solución está dada por la siguiente expresión:

$$\begin{bmatrix} \vec{\theta} \\ \vec{V} \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vec{\theta}_0 \\ \vec{V}_0 \\ \lambda_0 \end{bmatrix} + \sigma \begin{bmatrix} d\vec{\theta} \\ d\vec{V} \\ d\lambda \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Cabe indicar que, el subíndice "0" corresponde a la identificación de los valores de las variables de estado del inicio del paso de predicción. El tamaño del paso  $\sigma$  se escoge de tal modo que exista una solución del flujo de potencia con el parámetro de continuación especificado. Si para un tamaño de paso dado, no se encuentra una solución en el paso de corrección, el tamaño del paso se reduce y el paso de corrección se repite hasta que se obtenga una solución exitosa.

### El paso de corrección:

En el paso de corrección, el sistema original de ecuaciones  $\vec{F}(\vec{\theta}, \vec{V}, \lambda) = 0$  es aumentado en una ecuación, la cual, asigna la variable incógnita considerada como parámetro de continuación; por lo tanto el nuevo sistema de ecuaciones es el siguiente:

$$\begin{bmatrix} \vec{F}(\vec{\theta}, \vec{V}, \lambda) \\ x_k - \eta \end{bmatrix} = [0] \quad (2.6)$$

Donde  $x_k$  es la variable incógnita a cuyo elemento del vector tangente se le asignó el valor +1 o -1 en el paso de predicción, es decir, es la variable que se seleccionó como parámetro de continuación en el paso de predicción.



$\eta$  representa el valor pronosticado para la variable  $x_k$  en el paso de predicción.

El sistema de ecuaciones 2.6 puede ser resuelto a través del método de Newton-Raphson que se emplea para el cálculo de flujos de potencia, aunque levemente modificado. La incorporación de la ecuación que especifica el valor de la variable  $x_k$  hace que en el punto crítico, la matriz Jacobiana del sistema de ecuaciones 2.2 sea no singular, por lo tanto, este método de continuación del flujo de potencia se puede aplicar más allá del punto crítico y de esta forma obtener soluciones correspondientes a la parte inferior de la curva P-V (figura 2.2).

### **Detección del punto crítico:**

El punto crítico se alcanza cuando la carga alcanza su valor máximo (tal como se puede apreciar en la figura 2.2), es decir cuando la curva P-V llega a su punto máximo. Debido a que, la componente del vector tangente asociada a  $\lambda$  (es decir  $d\lambda$ ) es positiva para la parte superior de la curva de la figura 2.2, es cero para el punto crítico y es negativa para la parte inferior de dicha curva, entonces podemos inferir que, el signo de  $d\lambda$  nos indicará si se ha alcanzado o no el punto crítico.

### **Selección del parámetro de continuación:**

El paso de corrección es particularmente sensible a la selección del parámetro de continuación, es decir, una selección no adecuada puede provocar divergencia en la búsqueda de la solución del paso de corrección. Por ejemplo, el uso del parámetro de carga  $\lambda$  como parámetro de continuación en la región del punto crítico puede causar divergencia si el valor estimado excede el nivel de máximo de carga. Por otra parte, cuando se usa la magnitud de la tensión como parámetro de continuación, la solución del paso de corrección puede divergir si la corrección efectuada a esa variable en el paso de predicción a través del factor  $\sigma$  ha sido muy grande.

El parámetro de continuación debe ser seleccionado cada vez que se concluye el cálculo del vector tangente; sin embargo, el criterio más aceptado indica que, se debe elegir como parámetro de continuación a la variable asociada a aquella componente del vector tangente que tiene el mayor valor.

### **Información de sensibilidad obtenida del vector tangente:**

En el análisis del flujo de potencia de continuación, los elementos del vector tangente representan los cambios diferenciales en las variables de estado en respuesta a cambios diferenciales en el sistema de carga. Por esta razón, los elementos  $dV$  de un vector tangente dado son ampliamente usados en la identificación de nodos débiles en tensión.

A continuación se describen los métodos basados en las curvas P-V y Q-V para determinar los márgenes de estabilidad de tensión

### ➤ Margen de estabilidad de tensión a través de las Curvas P-V

Primeramente y antes de establecer la metodología para el cálculo de los márgenes de estabilidad de tensión a través de las curvas P-V, se analizará la formulación matemática para la obtención de dichas curvas; para ello, se hará referencia al sistema radial simple descrito en la figura 2.3 [5].

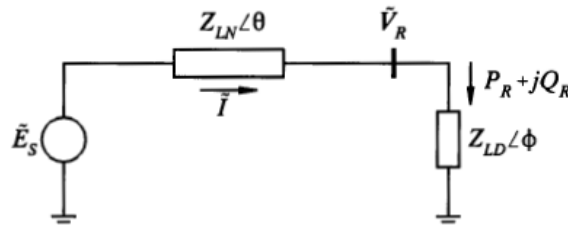


Fig. 2.3 Sistema radial simple para obtención de las curvas P-V [5].

En este esquema, podemos calcular la corriente  $I$  de la siguiente manera:

$$I = \frac{E_S}{\sqrt{(Z_{LN} \cos \theta + Z_{LD} \cos \varphi)^2 + (Z_{LN} \sin \theta + Z_{LD} \sin \varphi)^2}} \quad (2.7)$$

O lo que es lo mismo:

$$I = \frac{1}{\sqrt{F}} \frac{E_S}{Z_{LN}} \quad (2.8)$$

Donde:

$$F = 1 + \left(\frac{Z_{LD}}{Z_{LN}}\right)^2 + 2 \left(\frac{Z_{LD}}{Z_{LN}}\right) \cos(\theta - \varphi) \quad (2.9)$$

La magnitud de la tensión en la barra R está dado por:

$$\begin{aligned} V_R &= Z_{LD} I \\ V_R &= \frac{1}{\sqrt{F}} \frac{Z_{LD}}{Z_{LN}} E_S \end{aligned} \quad (2.10)$$

La potencia activa suministrada a la carga es:

$$\begin{aligned} P_R &= V_R I \cos \varphi \\ P_R &= \frac{Z_{LD}}{F} \left(\frac{E_S}{Z_{LN}}\right)^2 \cos \varphi \end{aligned} \quad (2.11)$$

La relación entre la potencia activa y el voltaje desde el punto de vista de la estabilidad de tensión es muy sugestiva, pues nos permite determinar el punto para el cual se produce el colapso de tensión y también la máxima transferencia de potencia. La curva P-V para un factor de potencia de 0.95 en retraso es mostrado en la figura 2.4.

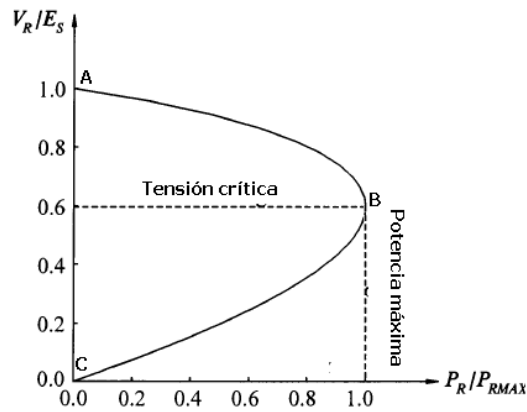


Fig. 2.4 Curva P-V para el sistema de la fig. 2.3 ( $\cos\phi=0.95$ ) [5].

Otra característica muy importante de las curvas P-V es que a través de ellas se puede determinar las regiones estables e inestables, en este caso, la región AB se considera estable y la región BC inestable, por tanto el punto B representa el punto de máxima cargabilidad o punto de colapso de tensión.

Para cada valor de P existen dos valores de tensión posibles, denominadas soluciones de alto voltaje con baja corriente y de bajo voltaje con alta corriente, sin embargo tomando como base las regiones de estabilidad descritas, solo es posible la solución de alto voltaje ya que esta solución se encuentra en la zona de operación factible desde el punto de vista de la estabilidad [5].

La estabilidad de tensión depende de las relaciones entre la potencia activa (P), potencia reactiva (Q) y la tensión (V), es por esta razón que las curvas P-V varían conforme cambia el factor de potencia, tal como se observa en la figura 2.5 [5].

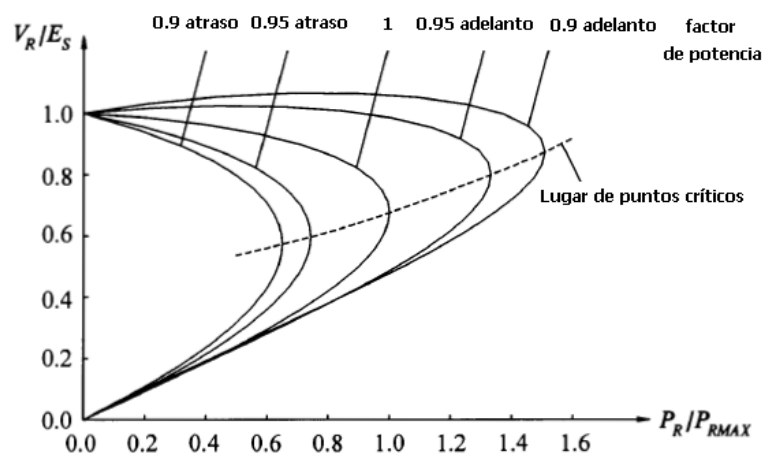


Fig. 2.5 Curvas P-V para el sistema de la fig. 2.3, para diferentes factores de potencia [5].

El lugar de los puntos críticos de operación se muestra para distintos factores de potencia en la figura 2.5, esto nos indica que, cuando se tiene compensación de tipo capacitiva (factor de potencia en adelanto), la máxima potencia de transferencia incrementa, sin embargo, al mismo tiempo las tensiones críticas correspondientes también son incrementadas; por lo tanto, se puede concluir que,

en una línea de transmisión que disponga de un elevado nivel de compensación capacitiva, las tensiones que inicialmente eran normales llegan a ser tensiones críticas.

El proceso de cálculo de los márgenes de estabilidad de tensión para el caso base y para la ocurrencia de contingencias se describe a continuación [9]:

1. *Cálculo de margen de estabilidad para caso base a través de análisis estático.*- Como se describió anteriormente, para el cálculo de una curva P-V, la carga del sistema es incrementada paso a paso y para cada nivel de carga se resuelve un flujo de potencia. El punto crítico de estabilidad de tensión se alcanza para el nivel de carga más allá del cual no existe una solución del flujo de potencia. El incremento de la carga del sistema desde un punto de operación inicial (A) hasta el punto crítico (B) representa el margen de estabilidad de tensión para el caso base. Esto se puede apreciar en la figura 2.6.

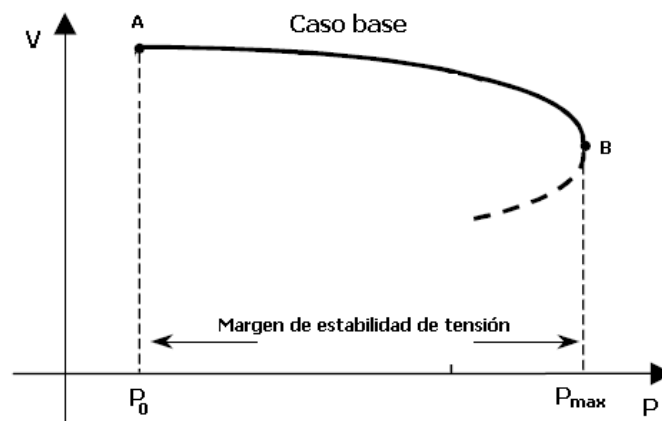


Fig. 2.6 Margen de estabilidad de tensión, caso base.

2. *Cálculo de márgenes de estabilidad de tensión para todas las contingencias a través de análisis estático.*- A diferencia del caso anterior, en este método se aplican contingencias al sistema antes de resolver los flujos de potencia. El último nivel de carga donde la solución del flujo de potencia existe en el estado post-contingencia es el punto crítico de este estado (C) y por tanto, el incremento de carga en el sistema pre-contingencia desde el punto inicial de operación (A) hasta este punto corresponde al margen de estabilidad de tensión para cada contingencia. Esto se puede apreciar en la figura 2.7 [8].

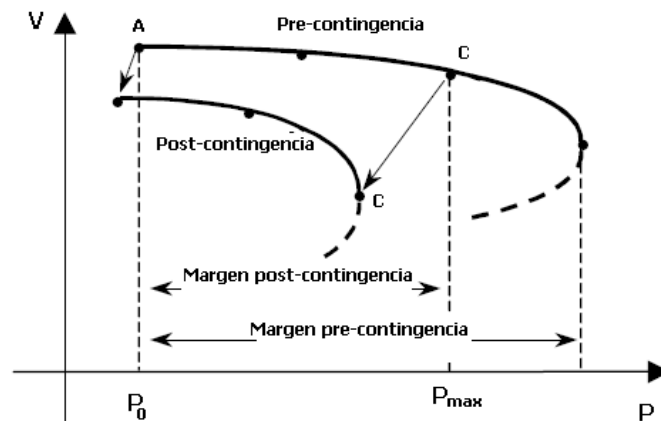


Fig. 2.7 Margen de estabilidad de tensión para contingencias [8].

### ➤ Margen de estabilidad de tensión a través de las Curvas Q-V

De forma similar que las curvas P-V, las curvas Q-V pueden ser obtenidas para un sistema como el mostrado en la figura 2.3. Estas curvas nos muestran la relación existente entre la potencia reactiva y la tensión para una potencia activa de transferencia dada. En general y como es muy conocido, la provisión de potencia reactiva requerida en un nodo permite mantener un cierto nivel de tensión en él. A continuación se presentan las curvas Q-V para el sistema de la figura 2.3 [5].

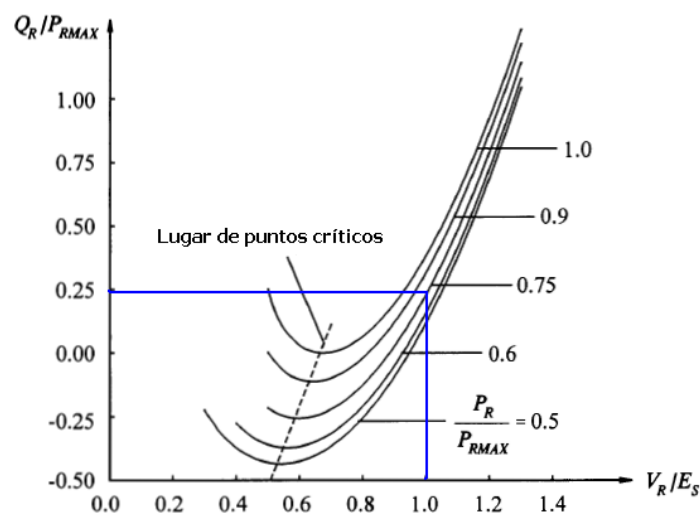


Fig. 2.8 Curvas Q-V para el sistema de la fig. 2.3.

Con relación al sistema de la figura 2.3, se puede indicar que, cada una de las curvas graficadas representa la relación existente entre la tensión ( $V_R$ ) y la potencia reactiva ( $Q_R$ ) para un determinado y fijo valor de potencia activa ( $P_R$ ). En este caso, la región estable del sistema es la región donde la derivada  $dQ_R/dV_R$  es positiva. El límite de estabilidad de tensión o punto crítico de operación es alcanzado cuando la derivada  $dQ_R/dV_R$  es igual a cero, por tanto, la curva que se encuentra hacia la derecha del punto crítico representa operación estable y, por el

contrario la curva hacia la izquierda del punto crítico es representa operación inestable del sistema.

Otra forma de interpretar las curvas Q-V sería que, para mantener el nivel de tensión de la barra en 1 p.u y para una potencia de transferencia de 0.75 p.u. se necesita una inyección de potencia reactiva capacitiva de  $Q=0.25$  p.u.; si la inyección de potencia reactiva se pierde, la tensión decrecerá a aproximadamente 0.6 p.u., punto que representa el punto crítico de operación y que corresponde a  $Q=0$  p.u.

Generalmente el margen de estabilidad basado en las curvas Q-V para una barra dada, bajo condiciones de pre o post-contingencia se calcula de acuerdo al siguiente procedimiento [5]:

1. Un generador síncrono con ilimitada capacidad de potencia reactiva se coloca a la barra para controlar su nivel de tensión.
2. La tensión programada varía de  $V_{\max}$  a  $V_{\min}$  en pasos discretos.
3. Para cada punto (tensión programada) se resuelve un flujo de potencia y se calcula la salida de MVAR del capacitor.
4. La gráfica de la potencia reactiva producida (MVAR) versus la tensión programada del capacitor es la curva Q-V correspondiente a la barra, tal como se puede apreciar en la figura 2.9. La cantidad de MVAR absorbida (negativo de los MVAR producidos) en el punto mínimo (parte inferior de la curva) es el margen de MVAR de esa barra.

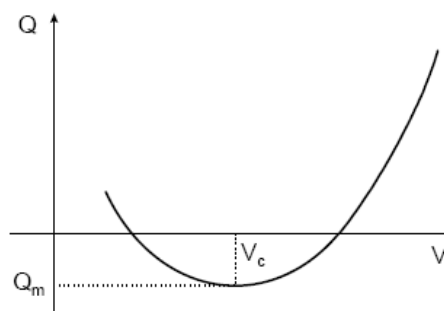


Fig. 2.9 Curvas Q-V para el sistema de la fig. 2.3 [8].

#### 2.4. El fenómeno del colapso de tensión [1, 7, 8]

El colapso de tensión es el proceso por el cual la secuencia de eventos que acompañan al fenómeno de inestabilidad de tensión conduce a perfiles de tensión anormales y con ello a la paralización del suministro de energía eléctrica en una parte significativa del sistema de potencia.

En general, la inestabilidad de tensión se caracteriza por una pérdida progresiva de tensión, es decir, desequilibrio y variación en los perfiles de tensión del

sistema. La falta de soporte local de potencia reactiva así como también el exceso de flujo de potencia reactiva son responsables de la inestabilidad de tensión. Generalmente el fenómeno del colapso de tensión está asociado a la incapacidad de proporcionar potencia reactiva a las áreas débiles del sistema.

El colapso de tensión engloba varios componentes del sistema y generalmente ocurren cuando el sistema se encuentra altamente cargado, por fallas (salidas de operación de líneas o generadores) y por las limitaciones en la producción, transmisión y consumo de energía reactiva. Varias circunstancias o cambios en el sistema pueden contribuir al colapso de tensión, como por ejemplo [7]:

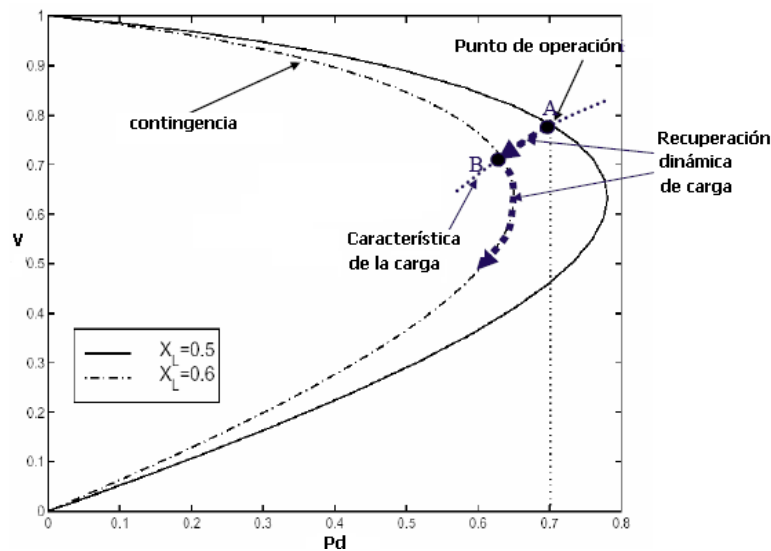
- Cuando se alcanza los límites de potencia reactiva de los generadores, compensadores síncronos y Static Var Compensators (SVC)
- Cuando se ha reducido la capacidad de transmisión de energía, lo que ocasiona altas pérdidas de potencia reactiva debido a líneas sobrecargadas
- Salida de operación de líneas o generadores
- Aumento de carga
- Recuperación dinámica de carga
- Actuación de transformadores con cambiadores de *taps* bajo carga (ULTC).

La mayor parte de estos cambios tienen un significativo efecto en la producción, transmisión y consumo de potencia reactiva del sistema de potencia. Para evitar el colapso de tensión existen algunas acciones de control que pueden realizarse, tales como [7]:

- Conexión o desconexión de bancos de capacitores
- Bloqueo del cambiador de *taps* bajo carga en transformadores
- Redespacho de generación
- Reprogramación de generadores
- Regulación secundaria de tensión
- Desconexión de carga
- Sobrecarga temporal de potencia reactiva en generadores

El proceso del colapso de tensión puede ser visualizado con mayor facilidad en la figura 2.10. Si tomamos como referencia el punto de operación inicial del sistema con  $P_d=0.7$  pu (A) en la curva P-V continua ( $X_L=0.5$  pu) podemos darnos cuenta que, si bien el nivel de tensión para este nivel de carga no es el adecuado ( $V\approx 0.78$  pu), el sistema se encuentra operando inicialmente en la parte estable de la curva;

sin embargo, la ocurrencia de una contingencia, ocasiona que la impedancia  $X_L$  pase de 0.5 a 0.6 pu (curva entrecortada) y por tanto que, el punto de operación inicial (A), por acción de la recuperación dinámica de la carga, migre hacia el punto B de la curva post-contingencia y seguidamente recorra dicha curva, atravesando el nuevo punto de máxima cargabilidad ( $P_d \approx 0.65$  pu) y siguiendo su trayectoria hacia la parte inferior de la curva, denominada también región inestable, alcanzándose con ello que el nivel de tensión caiga abruptamente, lo cual indefectiblemente deriva en un colapso de tensión.



**Fig. 2.10** Proceso del colapso de tensión.

En general, el escenario típico del colapso de tensión se presenta cuando un sistema de potencia está sujeto a incrementos súbitos de demanda de potencia reactiva seguidamente después de la ocurrencia de una contingencia, la demanda adicional es suplida por las reservas de potencia reactiva suministrada por generadores y capacitores. Generalmente existen suficientes reservas y el sistema llega a niveles de tensión estables, sin embargo, el colapso de tensión también es posible, por una combinación de eventos y condiciones del sistema, que sumado a la demanda de potencia reactiva, originen la inestabilidad del sistema.

#### 2.4.1. Caracterización general del colapso de tensión

A lo largo de la historia, se han producido un gran número de incidentes de colapso de tensión a lo largo de todo el mundo, los cuales generalmente han sido caracterizados por los siguientes aspectos [8]:

1. El evento inicial puede ser producido por varias causas: pequeños y graduales cambios de la carga del sistema o la presencia de grandes perturbaciones como: pérdida de un generador o de una línea altamente cargada.



2. El principal problema es la incapacidad del sistema para suplir su demanda de potencia reactiva; generalmente, el colapso de tensión implica condiciones del sistema que contienen líneas altamente cargadas. Cuando el transporte de energía reactiva desde áreas vecinas es difícil, cualquier cambio que implica el suministro de potencia reactiva puede llevar al colapso de tensión del sistema.
3. El colapso de tensión generalmente se manifiesta como una lenta caída de los niveles de tensión; esto es el resultado de un proceso acumulativo que involucra las acciones e interacciones de muchos dispositivos, elementos de control y sistemas de protección. En este contexto, el colapso se puede producir en el lapso de algunos minutos; sin embargo, el colapso de tensión dinámico en situaciones similares puede durar pocos segundos.
4. El colapso de tensión es fuertemente influenciado por las condiciones del sistema y sus características. En general, los factores que contribuyen al colapso son:
  - Grandes disturbios entre generación y carga
  - Actuación de transformadores con cambiadores de *taps* bajo carga (ULTC) durante condiciones de bajo nivel de tensión
  - Condiciones desfavorables de carga
  - Deficiente coordinación entre los sistemas de protección y control

## 2.5. Estado del Arte

Los índices de estabilidad de tensión son herramientas muy atractivas para estimar la proximidad al colapso de tensión, tomando como base que, muchos indicadores pueden ser fácil y rápidamente calculados, de tal forma que pueden ser usados en la clasificación de acuerdo al nivel de criticidad de nodos o líneas.

Como ejemplos se puede citar que, en la referencia [19] se usa el mínimo valor singular de la matriz Jacobiana del flujo de potencia como un índice estático de colapso de tensión. Además, en la referencia [20], Gao, Morison y Kundur introducen el análisis de la estabilidad de tensión a través del análisis modal; en este caso, los vectores y valores propios son quienes proveen la información respecto de las condiciones de estabilidad de tensión del sistema. Carpentier [21] propone un índice para detectar nodos o áreas propensas al colapso de tensión, basado en la relación  $dQ/dD$ , donde  $dQ$  y  $dD$  son respectivamente, las variaciones incrementales de potencia reactiva de la generación y los cambios en la carga.

A continuación se presenta una breve descripción de algunos índices de estabilidad de tensión propuestos en la literatura, especialmente los que están

relacionados con la detección de áreas débiles de un sistema, de tal forma que se pueda tener una idea de las características (ventajas y desventajas) que presenta cada uno de ellos, con respecto al objetivo del presente trabajo.

### **2.5.1. Índices de Estabilidad de Tensión**

En general, los índices de estabilidad de tensión corresponden a valores numéricos que contienen información respecto la cercanía o no de un sistema a la inestabilidad de tensión [9], información que, le permite al operador determinar si el sistema eléctrico se encuentra cercano o no al punto de colapso y con ello, tomar las mejores decisiones operativas que le permitan mantener un nivel de seguridad adecuado en el sistema de potencia. Además, es importante que los índices de estabilidad provean información adicional para detectar las áreas débiles del sistema, tales como barras, líneas y transformadores.

En el análisis de la estabilidad de tensión de los sistemas de potencia, no es suficiente con obtener el punto crítico o de colapso, sino más bien, es importante conocer como el punto crítico es afectado por las condiciones del sistema. La intención de calcular índices de estabilidad de tensión es obtener una medida del margen entre el punto de operación y el punto donde llega a ser inestable [9], de modo que éstos proporcionen una alerta temprana de una condición potencialmente crítica.

Se pueden calcular índices de estabilidad de tensión de validez global (para todo del sistema) o índices de validez local (es decir para diversas líneas o barras del sistema). En algunos casos los índices locales son directamente utilizados como indicadores de áreas débiles del sistema respecto a la estabilidad de tensión. Las investigaciones realizadas en el campo de la estabilidad de tensión se han centrado en buscar índices de estabilidad de tensión que tengan ciertas características específicas, tales como [9]:

- Que pueda ser calculado fácilmente, en tiempos cortos y de forma continua (ante cambios de las condiciones de carga y generación) por el operador del sistema.
- Que su valor permita al operador tener una idea clara de las condiciones del sistema respecto a la estabilidad de tensión.
- Que sea capaz de considerar contingencias en el sistema.
- Que su valor tenga un significado físico, es decir, que el índice nos permita conocer directamente qué parámetros del sistema (tales como carga o generación) separan el punto de operación actual del punto de inestabilidad.
- Que el índice presente un comportamiento conocido frente a incrementos constantes de los niveles de carga.

- Que el índice sea un buen indicador de las áreas débiles del sistema de potencia.

Para disponer de información clara, precisa y confiable es necesario que los índices de estabilidad cumplan con la mayor parte de las características anotadas anteriormente, es por esta razón que, si bien algunas variables propias del sistema cumplen algunos de los requisitos anotados, por si solas no permiten visualizar la cercanía o no al punto de inestabilidad de tensión del sistema, puesto que dichas variables presentan muchas variaciones en su comportamiento y tendencias dependiendo de las condiciones de operación de sistema (niveles de generación y carga).

En general, las investigaciones realizadas al respecto nos presentan una gran cantidad de índices de estabilidad, las mismas que pueden ser clasificadas en las siguientes categorías:

- Índices basados en el estado actual del sistema
- Índices basados en grandes desviaciones respecto del estado actual del sistema

En la siguiente sección se realizará una descripción breve de los principales índices de estabilidad de tensión que pertenecen a las dos categorías mencionadas.

### **2.5.2. Índices basados en el estado actual del sistema**

Estos índices se caracterizan por usar solamente la información disponible del punto de operación actual del sistema. El punto de operación puede ser simulado para una condición deseada de transferencia de potencia; a partir de esta información la característica del sistema se calcula y la operación del sistema es clasificada [9].

En general, estos índices son variables de operación que están íntimamente relacionadas con la estabilidad de tensión y que surgen exclusivamente de las condiciones del estado actual del sistema; pueden ser obtenidos a través de la resolución del flujo de potencia, mediante resultados del programa de estimación de estado o a través de mediciones sencillas. La obtención de este tipo de índices involucra un bajo esfuerzo computacional, sin embargo presentan un comportamiento altamente no lineal de acuerdo a las condiciones de carga en que se encuentre el sistema. En la literatura se han planteado muchos índices de estabilidad de tensión, entre los principales podemos citar brevemente los siguientes [8,9]:

---

- **Reserva de potencia reactiva**

El monitoreo en línea de las reservas de potencia activa y reactiva en el sistema, incluyendo generadores y otras fuentes de potencia reactiva como los Static Var Compensator (SVC), se han propuesto como índices para evaluación de la seguridad de tensión [8]. El criterio básico es que, el colapso de tensión usualmente no se presenta hasta que los límites de potencia reactiva son alcanzados, especialmente en grandes fuentes de potencia reactiva.

Por tanto, a través del control de la entrega de potencia reactiva y las reservas existentes en el sistema, los operadores pueden ser capaces de determinar la proximidad a un colapso de tensión y de esta forma, tomar las medidas correctivas tales como: desconexión de carga, tomando como base los requerimientos adicionales de suministro de potencia reactiva en cierta áreas del sistema.

Las reservas de potencia reactiva son usadas para evaluar los problemas de inestabilidad de tensión para ciertas áreas del sistema; estos márgenes están basados en las reservas de potencia reactiva de: generadores, SVC y capacitores síncronos que agotan las reservas en el proceso de cálculo de una curva Q-V para cualquier barra en un área de control de tensión determinada.

- **Pérdidas MW/MVAR**

Las pérdidas de potencia activa y reactiva incrementan exponencialmente cuando el sistema se aproxima al punto crítico o de colapso de tensión, es este comportamiento el que sugiere que, las pérdidas en los elementos de la red puedan ser consideradas como índices de estabilidad de tensión, ya que mientras mayores sean, más cerca nos encontraremos del límite de estabilidad o punto de colapso. En el Capítulo III se analiza el comportamiento de estas dos variables del sistema respecto de la estabilidad de tensión.

- **Índice  $V/V_0$  [8]**

Este índice es muy sencillo en su definición y en su cálculo, ya que representa la relación entre la magnitud de tensión en el punto de alimentación de una carga ( $V$ ) y la magnitud de tensión en el mismo punto pero sin carga ( $V_0$ ). El cálculo de la relación  $V/V_0$  para cada nodo genera un perfil de la estabilidad del sistema, permitiéndonos con ello, detectar rápidamente las áreas débiles respecto a la estabilidad de tensión.

En la referencia [8] se indica que, el principal inconveniente para el uso de este índice, es el comportamiento altamente no lineal que presenta con respecto a cambios en el parámetro de carga del sistema, situación que dificulta el establecimiento de la distancia existente entre el punto de operación respecto del punto de inestabilidad de tensión. No obstante, cuando este índice es usado en

conjunto con la experiencia del operador del sistema, ha demostrado en la práctica ser una herramienta efectiva para la detección del colapso de tensión.

- **Determinante del sistema**

Este índice es uno de los primeros índices usados para detectar la proximidad al colapso. El principio básico de este índice es detectar el punto de colapso para cualquier modelo, monitoreando el valor del determinante del Jacobiano asociado, el cual llega a cero en este punto.

El principal problema de este índice es que, se producen grandes valores, especialmente para sistemas grandes, lo cual lo hace impracticable en sistemas reales; además su comportamiento es altamente no lineal; sin embargo este índice presenta bastante insensibilidad a las variaciones de los parámetros del sistema.

- **Índice basado en flujos de potencia activa y reactiva ( $I_{pq}$ ) [8,10]**

Este índice como su nombre lo indica es obtenido a partir de los flujos de potencia activa y reactiva que circulan por los elementos del sistema y su principal característica consiste en que, conforme la carga del sistema se acerca al valor de máxima cargabilidad, el índice  $I_{pq}$  se acerca a cero o incluso a valores menores a cero, lo cual nos permite identificar las líneas en las cuales este comportamiento se hace más evidente y consecuentemente obtener las áreas más débiles respecto a la estabilidad de tensión. Las referencias [8] y [10] presentan el detalle de la formulación del índice, luego de lo cual, concluyen que es un indicador sensible a los incrementos de carga, especialmente en los elementos críticos del sistema.

- **Índice de Proximidad a la Inestabilidad de Voltaje ( $VPI$ ) [8]**

Las ecuaciones del flujo de potencia típicamente presentan múltiples soluciones, una de las cuales corresponde a un punto de operación real de un sistema de potencia. Además, se conoce que, el número de soluciones decrece cuando el punto de operación se acerca al punto de colapso y solamente un par de soluciones permanecen cerca del punto de colapso y luego confluyen en este punto. El  $VPI$  es definido en base a la representación rectangular de las ecuaciones del flujo de potencia y por tanto, este índice se basa en la obtención de este par de soluciones para predecir la proximidad al colapso de tensión. Además, el  $VPI$  tiene como ventaja frente a otros índices de estabilidad de tensión que, no presenta grandes discontinuidades durante el proceso de incremento de carga hasta alcanzar su límite; sin embargo, al ser definido como la diferencia angular de dos vectores de nodos de inyección, este índice es expresado en término de grados, información que no puede ser asociada directamente con ninguna de las variables del modelo del sistema [8].

### ▪ Factores de Sensibilidad [8]

Los factores de sensibilidad son índices bien conocidos y usados para la detección de problemas de estabilidad de tensión. Estos índices son descritos a partir de los elementos contenidos en el vector tangente descrito en el punto 2.3.1.2 ( $\vec{t} = [d_{\delta} \quad d_{\bar{v}} \quad d_{\lambda}]^T$ ), los mismos que representan las variaciones tanto de ángulos como de las tensiones de nodo con respecto a la variación en los niveles de carga del sistema [8]. Originalmente, los factores de sensibilidad fueron usados para detectar problemas de control de tensión en las curvas Q-V de los generadores, a través de la siguiente definición

$$VSF_i = \max_i \left\{ \frac{dV_i}{dQ_i} \right\} \quad (2.7)$$

Donde:

$VSF_i$  son los factores de sensibilidad de tensión

$dV_i$  representa la variación de la tensión

$dQ_i$  es la variación de la potencia reactiva

Cuando el generador “ $i$ ” alcanza la parte inferior de la curva Q-V, el valor del  $VSF_i$  llega a tener un valor alto y eventualmente cambia de signo, lo cual es un indicativo de una condición de inestabilidad en el control de la tensión.

Con base a este concepto, de forma general, se han propuesto una amplia variedad de índices, es así que, los siguientes **Factores de Sensibilidad (SF)** pueden definirse como la norma de la variación de las variables de estado “ $x$ ” (ángulos y tensiones de barra) respecto a la variación del nivel de carga [8]:

$$SF = \left\| \frac{dx}{d\lambda} \right\| \quad (2.8)$$

Cuando los factores de sensibilidad SF llegan a ser valores altos, el sistema se torna inseguro y eventualmente se llega al colapso, debido a que dichas variaciones tienen a infinito cuando el sistema alcanza el valor máximo de carga y por tanto  $\Delta\lambda$  tiende a cero. Si el objetivo es realizar análisis de estabilidad de tensión de un sistema, obviamente solo se deben analizar las variaciones de los niveles de tensión de cada nodo, lo cual permite de forma análoga definir el índice de los Factores de Sensibilidad de Voltaje ( $VSF$ ) como:

$$VSF = \left\| \frac{dV}{d\lambda} \right\| \quad (2.9)$$

El índice  $VSF$  es bajo cuando el sistema se encuentra con bajo nivel de carga, sin embargo de acuerdo al incremento de carga que se establezca el índice incrementa su valor exponencialmente hasta tender a infinito en el punto de carga máxima, lo cual nos permite predecir la cercanía al colapso de tensión en el

sistema; además a través de este índice se pueden identificar los nodos más sensibles del sistema y de acuerdo a los valores obtenidos, realizar una clasificación de aquellas barras más propensas a entrar en inestabilidad respecto al nivel de tensión y sobre las cuales se deberá tomar acciones correctivas ante la ocurrencia de una contingencia dada. El *VSF* también nos permite determinar las áreas débiles del sistema, puesto que serían aquellas líneas vinculadas a los nodos más sensibles determinadas a través del índice.

### **2.5.3. Índices basados en grandes desviaciones respecto del estado actual del sistema**

Este tipo de índices se basan en analizar el comportamiento estático del sistema frente a constantes incrementos del nivel de carga y de generación, a partir de un punto inicial de operación. Los incrementos de generación y carga tienen como finalidad la obtención de un índice que tenga significado físico. En general, dentro de esta categoría básicamente se encuentra el índice conocido como **margen de cargabilidad**.

Esta clase de índices, implícitamente proporcionan información muy útil para los operadores del sistema, ya que permiten conocer la cantidad adicional de carga activa y reactiva que el sistema puede suministrar sin que éste deje de operar de forma segura y con la certeza de que se satisfagan todas las condiciones operativas [8].

#### **2.5.3.1. Margen de cargabilidad [8, 9]**

Para un punto de operación en particular, el incremento de carga siguiendo un patrón definido que pueda causar un colapso de tensión se denomina margen de cargabilidad. Este índice es el más básico y ampliamente aceptado para la predicción del colapso de tensión; es decir este índice es la referencia básica con la cual generalmente se comprueba la efectividad de otros índices propuestos en la literatura.

Si se escoge al nivel de carga del sistema como parámetro de variación, se puede obtener gráficamente las curvas P-V, para lo cual, el margen de cargabilidad al colapso de tensión se define como la diferencia, en función de la carga, entre el punto de operación actual caracterizado por  $\lambda_0=1$  y el punto de colapso del sistema identificado como  $\lambda_{crítico}$ , tal como se puede apreciar en la figura 2.11 [9].

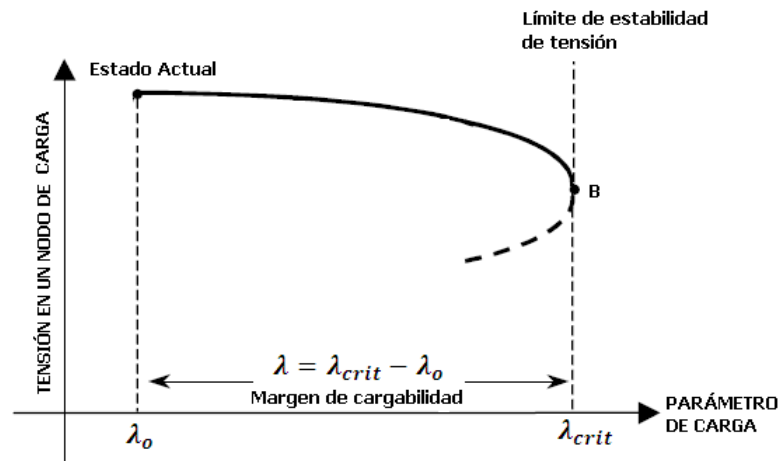


Fig. 2.11 Definición del margen de cargabilidad

Las ventajas que presenta el margen de cargabilidad, en su uso como índice de estabilidad de tensión [8]:

- El margen de cargabilidad es sencillo, bien aceptado y fácilmente entendido.
- Este índice no se basa en un modelamiento particular del sistema, sino más bien, requiere solamente de un modelo estático del sistema de potencia. Puede ser calculado con modelos dinámicos, sin embargo, su valor es independiente de ellos.
- Es un índice preciso que toma muy en cuenta las no linealidades del sistema y los límites de potencia reactiva que se puedan encontrar con el incremento de carga; ya que su comportamiento no demuestra que tales límites han sido alcanzados, lo cual permite que no se presenten cambios bruscos en el cálculo del margen de cargabilidad.
- Una vez que el margen de cargabilidad se ha calculado, es fácil y rápido calcular sus sensibilidades con respecto a cualquier parámetro o variable de control del sistema.

Las desventajas que presenta el margen de cargabilidad como índice de estabilidad de tensión son las siguientes [8]:

- El margen de cargabilidad requiere cálculos en puntos alejados del punto de operación actual, lo cual se refleja en mayores esfuerzos computacionales que otros índices los cuales usan solamente la información del punto actual de operación. Esta es una limitante muy importante para su uso en la operación en tiempo real de los sistemas de potencia, ya que el cálculo de este índice para grandes sistemas conllevaría tiempos muy altos, lo cual impide tomar las acciones necesarias y oportunas para garantizar la operación segura del sistema eléctrico.



- El margen de cargabilidad requiere asumir una dirección para el incremento de carga, información que a menudo no está fácilmente disponible.

#### **2.5.4. Índices de estabilidad de tensión en la clasificación y ranking de contingencias**

Como se indicó anteriormente, en la literatura se han propuesto una gran cantidad de índices y metodologías para realizar la detección de nodos y líneas críticas de un sistema de potencia en lo que respecta a la estabilidad de tensión. A continuación se describen algunos de trabajos que tratan sobre la clasificación y ranking de contingencias usando indicadores de estabilidad de tensión.

En la referencia [26] Green, Dobson y Alvarado proponen el cálculo de las sensibilidades lineal y cuadrática del margen de cargabilidad respecto al cambio en la admitancia, causado por la salida de operación de cada línea del sistema (contingencias); con lo cual, se estima el cambio resultante en el margen de cargabilidad y consecuentemente se obtiene un ranking de las contingencias más críticas. Si bien, esta metodología presenta buenos resultados en los sistemas de prueba de 118 y 1390 barras, el principal inconveniente radica en el elevado esfuerzo computacional requerido, ya que utiliza el algoritmo de continuación del flujo de potencia para la obtención del margen de cargabilidad de cada contingencia posible. Esta característica impide que la metodología propuesta sea implementada en la operación en línea de los sistemas eléctricos.

En [25] Li y Song presentan un método mejorado de descomposición del valor singular para identificar nodos débiles respecto a la estabilidad de tensión en grandes sistemas de potencia; el mismo que emplea el flujo de potencia continuado para determinar el máximo punto de cargabilidad del sistema y, en este punto calcular el indicativo del margen de estabilidad de tensión conjuntamente con la descomposición del valor singular para obtener el ranking de nodos críticos en términos de la sensibilidad de tensión. El algoritmo desarrollado fue aplicado en pequeños y grandes sistemas (más de 2600 nodos) obteniéndose resultados satisfactorios; sin embargo, al igual que en el caso anterior, esta metodología no es utilizable en el ambiente de la operación en línea de los sistemas eléctricos, debido al elevado tiempo de cálculo requerido, puesto que basa su funcionamiento en el algoritmo del flujo de potencia continuado. Adicionalmente es importante indicar que, si bien, el ranking de nodo críticos obtenido de la aplicación de esta metodología permite tener una idea de las áreas débiles de un sistema eléctrico, esta información es muy general y no permite discriminar con precisión los elementos (líneas y transformadores) cuya salida de operación puedan provocar inestabilidad de tensión.

La referencia [28] presenta el uso del índice del margen de estabilidad de voltaje (*VSMI*) en la identificación de las áreas débiles en grandes sistemas eléctricos, el cual basa su desempeño en la relación obtenida por la estabilidad de tensión y la

diferencia angular entre los nodos fuente y destino de una línea. Este índice es ordenado de menor a mayor para obtener una clasificación de las contingencias más críticas del sistema; el cálculo del *VSMI* solamente requiere la solución de un flujo de potencia por cada punto de operación analizado, por lo que su tiempo de obtención es bajo. Su eficiencia ha sido probada en una región crítica de Entergy System, sin embargo, la referencia no presenta simulaciones en otros sistemas reales o de prueba, lo cual impide validar completamente el uso del índice. Adicionalmente se ha determinado que, esta metodología presenta inconsistencias en líneas en las cuales la relación  $Q/P$  es mayor a 1.

En [24] Musirin y Rahman presentan el uso del índice rápido de estabilidad de tensión (*FVSI*), el mismo que tiene como objetivo determinar la carga reactiva máxima que es posible inyectar a un nodo antes que el sistema alcance un punto de bifurcación. La metodología planteada se basa en el incremento de la demanda de potencia reactiva en cada nodo hasta alcanzar el punto de inestabilidad de tensión y, obtener el índice *FVSI* máximo calculable, el cual se alcanza para el valor de máxima carga reactiva admisible. Como resultado de la aplicación de este índice se obtiene el máximo nivel de cargabilidad de cada barra, el cual es ordenado en orden ascendente para determinar los nodos críticos del sistema, es por esta razón que, el índice *FVSI* no permite determinar líneas y transformadores cuya salida de operación puedan causar inestabilidad de tensión. Adicionalmente, se debe indicar que este índice ha sido propuesto para ser utilizado en el estudio fuera de línea de la operación de los sistemas eléctricos.

En la referencia [10] se presenta el índice de estabilidad de tensión *Ipq*, el mismo que ha sido desarrollado en base a los flujos de potencia activa y reactiva que fluyen por cada elemento de la red. Este índice tiene como objetivo determinar, para un estado de operación determinado, las áreas (elementos) débiles del sistema, a través de la clasificación de contingencias realizada a partir del cálculo de la “medida” del margen de estabilidad de tensión obtenido a partir de las ecuaciones que interrelacionan los flujos de potencia activa y reactiva con las características propias de cada uno de los elementos del sistema eléctrico. Se debe notar que esa metodología solamente necesita la solución de un flujo de potencia convencional, lo cual determina el requerimiento de un bajo esfuerzo computacional y consecuentemente de tiempos de cálculo muy cortos; sin embargo, una de las desventajas que presenta este índice es la variación en la clasificación de contingencias obtenida para los distintos niveles de carga analizados, lo cual, en algunos casos puede ocasionar una distorsión en la detección detallada de las áreas críticas del sistema. En el punto 3.2.2 se describe a profundidad la deducción y el comportamiento de este índice, el mismo que forma parte del sistema difuso propuesto para la obtención del nuevo índice de estabilidad de tensión.



En [12] Almeida propone un procedimiento para la obtención del ranking de contingencias respecto a la estabilidad de tensión, para ser usado en el ambiente de la operación en línea de los sistemas eléctricos a través del cálculo de varios índices de comportamiento, los cuales son obtenidos para cada una de las contingencia posibles y son definidos en términos de la proximidad al colapso de tensión para cada línea del sistema. Los resultados logrados por medio de esta metodología permite, de forma general, obtener una clasificación de las contingencias más críticas del sistema en lo que respecta a la estabilidad de tensión, sin embargo, el orden de dicha clasificación no es del todo confiable en comparación con la clasificación obtenida a través del flujo de potencia continuado (CPF). Adicionalmente para aplicar esta metodología se requiere tener un conocimiento previo de las contingencias más severas respecto a la estabilidad de tensión para cada sistema a analizar, información que generalmente es subjetiva y basada en la experiencia de los operadores del sistema.

## CAPÍTULO III

# DESARROLLO DEL SISTEMA DIFUSO PARA LA OBTENCIÓN DEL ÍNDICE DE ESTABILIDAD DE TENSIÓN PROPUESTO

### 3.1. Introducción

En el presente capítulo se explicará la metodología utilizada para el desarrollo del nuevo índice de estabilidad de tensión propuesto a través del uso de la Lógica Difusa, además se dará una breve descripción de las herramientas informáticas utilizadas y su interrelación en la ejecución de los cálculos requeridos.

En primera instancia se realizará la definición y descripción de los índices de estabilidad de tensión considerados como entradas candidatas del sistema de inferencia difuso, con la finalidad de determinar las características que poseen cada uno de ellos y determinar el aporte que pueden ofrecer en la detección de áreas débiles.

Posteriormente se hará un breve repaso de los aspectos más relevantes y componentes principales de un Sistema de Inferencia Difuso. Además, se presentarán las relaciones en términos difusos, que permiten interrelacionar el comportamiento y la tendencia de los diversos índices de estabilidad de tensión propuestos como entradas iniciales del sistema.

El uso de la Lógica Difusa para la obtención de un nuevo índice de estabilidad de tensión tiene como finalidad extraer las ventajas de cada uno de los índices propuestos como entradas y excluir los comportamientos no adecuados que presentan ciertos índices para circunstancias específicas de operación del sistema; en base a ello es posible determinar las áreas que presenten mayor sensibilidad a los incrementos constantes de los niveles de carga del sistema.

El desarrollo de nuevas técnicas para determinar las áreas débiles de un sistema respecto a la estabilidad de tensión y su aplicación en tiempo real nace como una necesidad imperiosa de disponer de una herramienta computacional que, a diferencia de los índices de estabilidad comúnmente propuestos en la literatura, presente un comportamiento lineal y estable frente a variaciones de carga de acuerdo a una dirección de incremento determinada y, que permita identificar claramente las líneas y demás elementos con mayor grado de sensibilidad respecto de la estabilidad de tensión.

Además, el uso de la Lógica Difusa permite obtener los resultados requeridos en tiempos adecuados y compatibles con la operación en tiempo real de un sistema eléctrico de potencia, a diferencia de los métodos determinísticos convencionales como lo es el “Margen de cargabilidad”, el cual fue analizado en el apartado 2.5.3.1.

El sistema difuso que interrelaciona todos los índices escogidos como entradas del sistema será descrito en el presente capítulo, tomando en cuenta el comportamiento de cada uno de ellos frente a variaciones del nivel de carga; para ello se ha utilizado la Herramienta de Lógica Difusa incorporada dentro de MATLAB.

El sistema propuesto obtendrá un índice para cada uno de los elementos del sistema (líneas y transformadores) y los clasificará de acuerdo a su nivel de criticidad, de mayor a menor. El valor obtenido para el índice de estabilidad de tensión propuesto estará comprendido entre 0 y 1, siendo 1 el valor que indica una condición ideal y estable del elemento del sistema al cual corresponde; por el contrario cuando el índice se encuentra más cercano a 0 indica una condición de inminente cercanía al punto de inestabilidad.

De forma esquemática, en la figura 3.1 se muestran los procesos más relevantes y su interrelación en la obtención del índice difuso de estabilidad de tensión, con las consiguientes herramientas informáticas utilizadas para realizar los cálculos requeridos.

La metodología planteada hace referencia a la necesidad de realizar una variedad de cálculos, tales como: correr flujos de potencia convencionales, correr flujos de potencia continuos tanto en condiciones normales como estado de contingencias (N-1), obtención de variables de operación del sistema, obtención de los márgenes de cargabilidad, cómputo de índices de estabilidad, obtención de resultados a través de la interfaz PSAT-UWPFLOW, etc, previo al desarrollo del sistema difuso como tal; para todos estos cálculos se ha utilizado el software PSAT 1.3.4.

La interrelación de cada uno de las sub-funciones del PSAT ha sido realizada por medio de un programa desarrollado en MATLAB, a través del cual se ejecutan las rutinas requeridas que forman parte del módulo PSAT y extrae de sus resultados las variables que el sistema necesita para ejecutar los cálculos de índices, márgenes de cargabilidad y valores de cargas críticas. Todos los resultados obtenidos han sido manipulados de tal forma que puedan ser utilizados como entradas del sistema difuso.

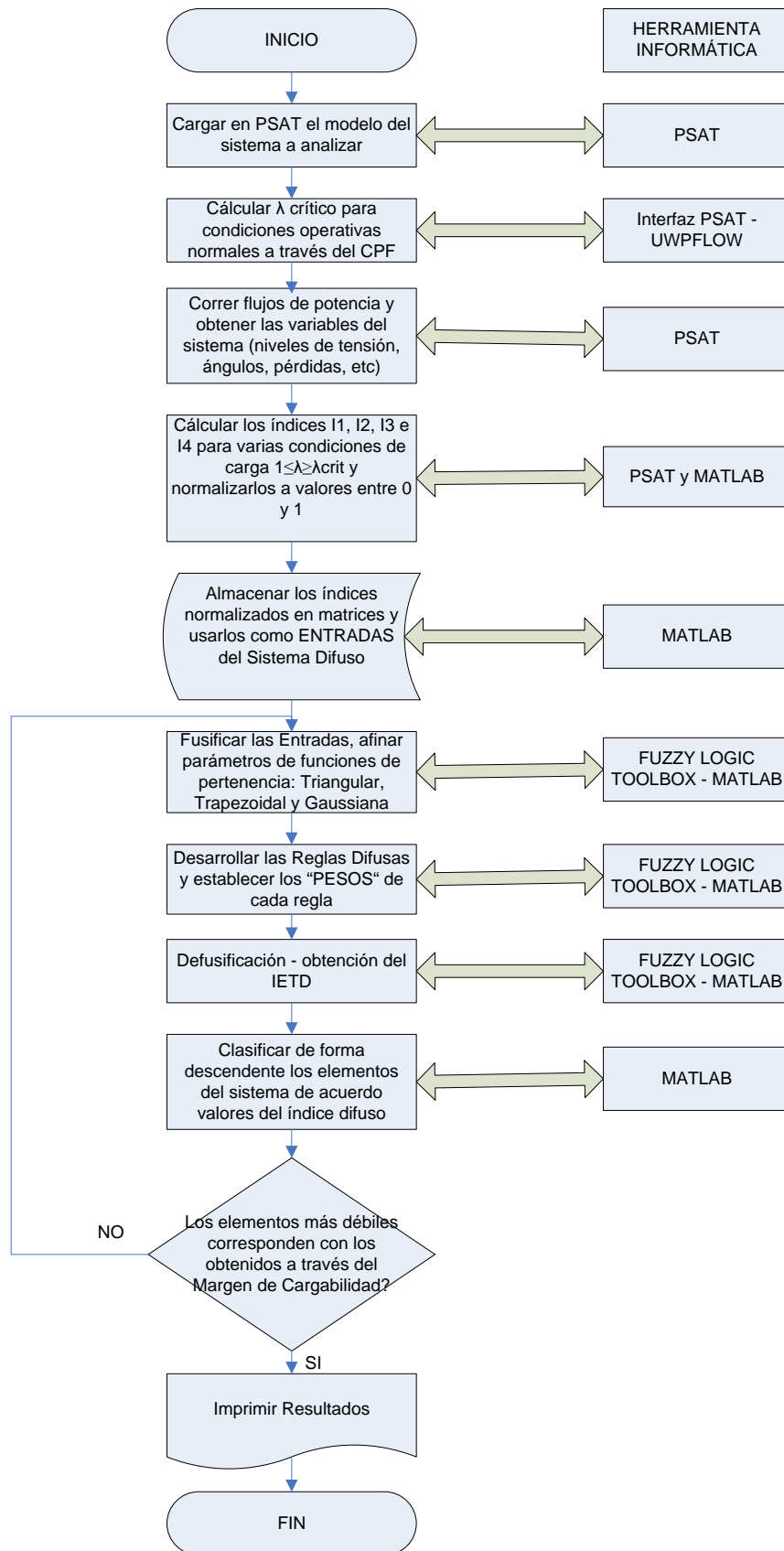
El sistema de inferencia difuso toma como base los cálculos realizados previamente y convierte los valores numéricos obtenidos en conjuntos difusos de acuerdo a la definición previa de las funciones de pertenencia, niveles lingüísticos, reglas difusas, método de implicación, métodos de agregación y defusificación.

La metodología propuesta implica una posterior validación exhaustiva, para lo cual, se toma como referencia los márgenes de cargabilidad obtenidos a través del método de continuación del flujo de potencia y su clasificación, es decir, si las áreas críticas detectadas a través del nuevo índice propuesto concuerdan con las obtenidas a través de los márgenes de cargabilidad, la metodología planteada es



aplicable, caso contrario se deberá realizar una nueva definición de las reglas difusas, afinar los límites de los niveles lingüísticos, afinar los parámetros que definen las funciones de pertenencia hasta lograr resultados adecuados.

Todo el proceso descrito se realizará para las funciones de pertenencia tipo: triangular, trapezoidal y gaussiana, luego de lo cual y de revisar los resultados obtenidos para cada caso, se escogerá como función de pertenencia definitiva a aquella que nos permita realizar ajustes más precisos y a través de la cual se logren los resultados más cercanos a los obtenidos por medio de los márgenes de cargabilidad.



**Fig. 3.1** Diagrama de flujo de la metodología utilizada para la obtención del índice difuso propuesto.

### 3.2. Descripción de los Índices de Estabilidad de Tensión considerados como entradas candidatas

En esta sección se presenta la descripción, definición y análisis del comportamiento de varios índices de estabilidad de tensión considerados como entradas candidatas del sistema de inferencia difuso propuesto, para condiciones de incremento continuo de los niveles de carga del sistema, con la finalidad de determinar las bondades y debilidades que presentan cada uno de ellos ante condiciones normales y adversas de operación del sistema; de tal forma que, se pueda obtener un patrón de comportamiento.

El objetivo principal del análisis del comportamiento de los índices que se describirán a continuación, es determinar la eficiencia con la cual cada uno de ellos nos proporcionen la información necesaria para identificar las áreas débiles del sistema respecto a la estabilidad de tensión, es decir cuan eficientes son para localizar elementos o componentes sensibles del sistema de potencia, como: barras, líneas, generadores o transformadores, los cuales se consideran críticos para mantener la estabilidad de tensión. Con el análisis del comportamiento de cada uno de los índices y/o variables del sistema considerados como entradas candidatas, se podrá decidir con mayor criterio si efectivamente éstos índices proporcionan información relevante y eficiente para incorporarlos dentro del sistema difuso propuesto.

Los índices de estabilidad de tensión y/o variables del sistema descritos en esta sección corresponden a:

- Índice del Vector Tangente ( $TVI$ )
- Índice basado en flujos de potencia activa y reactiva ( $I_{pq}$ )
- Pérdidas de Potencia Activa ( $P_{loss}$ )
- Pérdidas de Potencia Reactiva ( $Q_{loss}$ )
- Niveles de Tensión ( $V$ )

#### 3.2.1. Índice del Vector Tangente ( $TVI$ )

En el método de continuación de flujos de potencia descrito en el apartado 2.3.1.2 se presenta la composición del vector tangente, el mismo que, es usado para describir la dirección de la ruta de solución en un punto de solución corregido. Un paso en la dirección tangente es usado para estimar la siguiente solución.

Sin embargo, si examinamos los elementos que componen el vector tangente como cambios diferenciales en los ángulos de las tensiones y en sus magnitudes ( $d\delta_i$  y  $dV_i$  respectivamente) como respuesta a los cambios diferenciales en los niveles de carga ( $d\lambda$ ), podemos darnos cuenta que, la información que



proporciona el vector tangente permite realizar análisis de sensibilidad de los nodos del sistema ante incrementos de la carga [8].

Si hacemos referencia a la ecuación 2.3, correspondiente al paso de predicción del método de continuación del flujo de potencia, tenemos:

$$[\vec{F}_{\theta} \quad \vec{F}_{\vec{v}} \quad \vec{F}_{\lambda}] \begin{bmatrix} d_{\theta} \\ d_{\vec{v}} \\ d_{\lambda} \end{bmatrix} = 0 \quad (3.1)$$

Donde, el vector tangente es definido por:

$$\vec{t} = \begin{bmatrix} d_{\theta} \\ d_{\vec{v}} \\ d_{\lambda} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Este vector contiene importante información respecto a cómo son afectadas las variables de estado del sistema (ángulos y magnitudes de las tensiones) por los cambios en el parámetro de carga ( $\lambda$ ). El vector está conformado por  $(2n_{PQ} + n_{PV} + 1)$  elementos.

A partir de la definición del vector tangente se obtiene el **índice del vector tangente** ( $TVI$ ), el mismo que define para la barra  $i$  del sistema como la inversa de la magnitud de la componente del vector tangente correspondiente a la magnitud de tensión de esa barra, lo cual se expresa como sigue:

$$TVI_i = \left| \frac{dV_i}{d\lambda} \right|^{-1} \quad (3.3)$$

Donde  $\frac{dV_i}{d\lambda}$  es la componente del vector tangente correspondiente a la magnitud de la tensión  $V_i$  en la barra  $i$ .

Se puede observar claramente que el cálculo del  $TVI$  es sencillo desde el punto de vista computacional, ya que solo requiere una iteración adicional en la resolución del flujo de potencia por el método Newton-Raphson, razón por la cual, este índice de estabilidad de tensión es apto para ser utilizado en tiempo real.

En base a la definición matemática del  $TVI$  se puede predecir su comportamiento, el mismo que es como se describe a continuación:

- El índice del vector tangente ( $TVI$ ) tiende a cero cuando el parámetro de carga se acerca al punto de colapso ( $\lambda \approx \lambda_{\text{crítico}}$ ), debido a que para esta condición, la componente del vector tangente correspondiente a la tensión de la barra  $i$  tiende al infinito ( $\frac{dV_i}{d\lambda} \rightarrow 0$ ).
- Este índice tiene un comportamiento decreciente conforme el nivel de carga se incrementa.

Un aspecto importante del  $TVI$ , es que, tan pronto como se alcanza el límite de estabilidad (punto de colapso), el índice del vector tangente en al menos una de las barras del sistema tiende a cero, propiedad que a priori nos permite detectar fácil y rápidamente los nodos más susceptibles y sensibles del sistema.

A continuación se muestra de forma gráfica el comportamiento del  $TVI$ , el mismo que ha sido calculado para una de las barras del sistema de prueba IEEE 14 nodos.

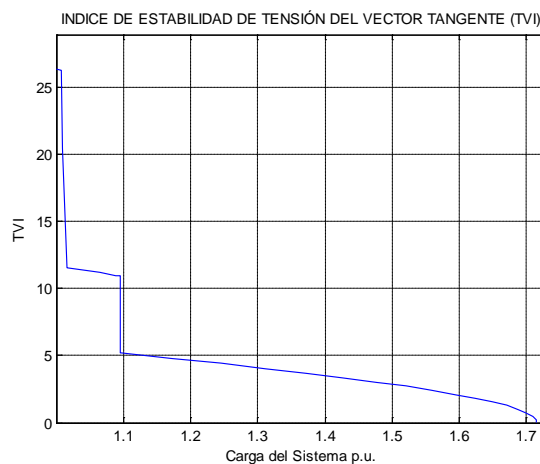
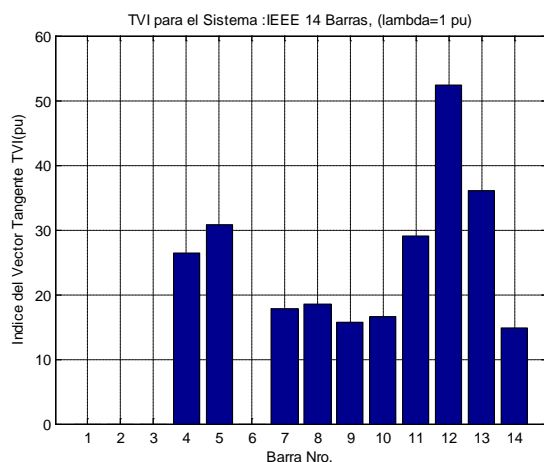
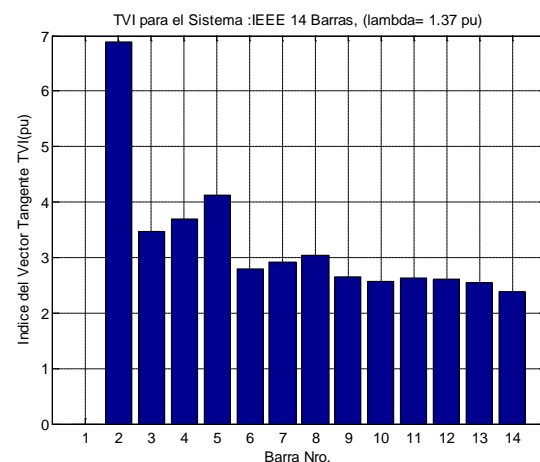


Fig. 3.2 Comportamiento del índice del vector tangente ( $TVI$ ).

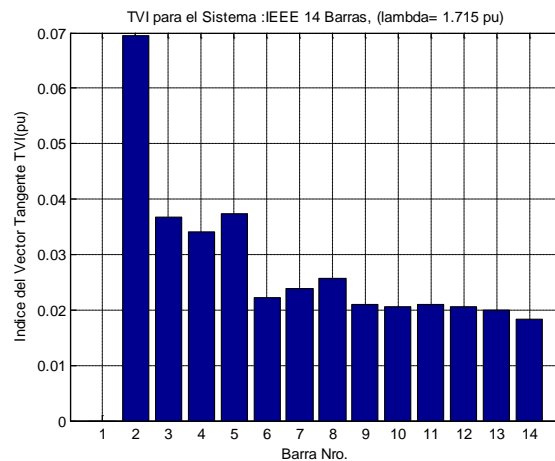
En la figura 3.1 se puede observar que el  $TVI$  presenta algunos saltos discretos, esto se debe a que, para los niveles de carga en los cuales se produce este fenómeno, se alcanzan los límites de potencia reactiva de algunos generadores. Sin embargo, una de las características más importantes es la conducta que este índice presenta, ya que, a medida en que se aumenta el nivel de carga, el  $TVI$  tiende a cero hasta llegar a cero en el punto de colapso del sistema.



a) Caso base



b) Carga media



c) Carga crítica

**Fig. 3.3** Índice de estabilidad de tensión del vector tangente (*TVI*) para todos los nodos del sistema IEEE 14 barras: a) caso base, b) carga media, c) carga crítica.

La figura 3.3 presenta los valores del índice del vector tangente obtenidos para todos los nodos del sistema IEEE 14 barras en tres estados de carga distintos, esto es: caso base ( $\lambda=1$  pu), carga media ( $\lambda=1.37$  pu) y carga crítica ( $\lambda=1.715$  pu), con la finalidad de observar la variación que presenta este índice conforme el sistema se acerca al nivel máximo de cargabilidad.

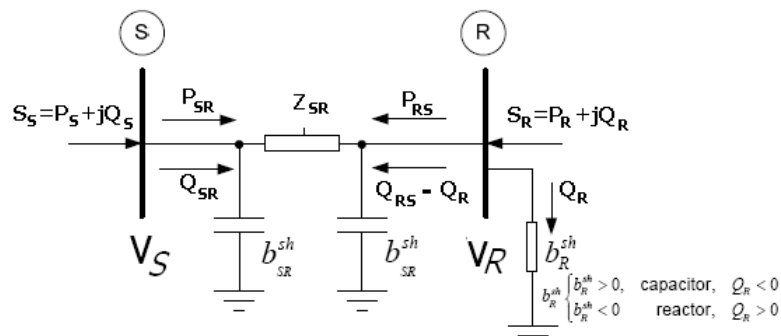
Si bien el *TVI* ha sido calculado para todos los nodos del sistema, las gráficas no muestran los resultados de algunas de las barras, por ejemplo en el caso base no se aprecian los resultados correspondientes a las barras: 1, 2, 3 y 6, esto se debe a que los valores del *TVI* obtenidos para estas líneas son muy grandes (tendiendo a infinito), tomando en cuenta que conceptualmente el índice del vector tangente es el inverso de la variación de la tensión del nodo  $i$  ante un aumento en el nivel de carga ( $\lambda$ ), por tanto, si no existe variación de tensión en el nodo  $i$ , el *TVI* se obtiene de una división por cero, la cual tiende a infinito. Al observar los resultados obtenidos para estas mismas barras en los otros dos niveles de carga mostrados en la figura 3.3 (carga media y carga crítica) se puede verificar que, los valores del índice del vector tangente correspondientes a dichos nodos siempre se encuentran entre los más altos de todo el sistema.

El análisis en detalle de los resultados obtenidos a través del índice del vector tangente permite afirmar que, si bien, el *TVI* presenta un comportamiento monótonicamente decreciente ante incrementos del nivel de carga, también presenta valores altos en los nodos que tienen conectados generadores y compensadores síncronos, lo cual significa que este índice solamente es capaz de determinar áreas débiles respecto de la estabilidad de tensión cuando éstas se encuentran relacionadas con barras de carga (nodos PQ), es decir, que no estén conectados a generadores y compensadores síncronos.

Esta característica intrínseca del TVI permite concluir que el índice del vector tangente no es adecuado para el propósito que persigue el presente trabajo de investigación, en vista de que no permite determinar áreas débiles del sistema que estén relacionadas a nodos de tensión controlada (nodos PV); por lo tanto este índice no será tomado como índice de entrada del sistema de inferencia difuso.

### 3.2.2. Índice basado en flujos de potencia activa y reactiva ( $lpq$ )

Este índice se basa en los flujos de potencia activa y reactiva que se producen por los elementos de transmisión del sistema. Su deducción se puede determinar a partir del sistema reducido de dos nodos mostrado en la figura 3.4 [9].



**Fig. 3.4** Modelo  $\pi$  de una línea de transmisión con compensación de potencia reactiva en la barra R [9].

Las referencias [9, 10 y 11] se han tomado como base para el desarrollo de este índice. Las ecuaciones correspondientes a los flujos de potencia activa y reactiva son desarrolladas en [11] para un sistema de dos barras, las mismas que se muestran a continuación:

$$\begin{aligned}
 P_{SR} &= (a_{SR}V_S)^2 g_{SR} - a_{SR}V_S V_R [g_{SR} \cos(\theta_{SR} + \varphi_{SR}) + b_{SR} \sin(\theta_{SR} + \varphi_{SR})] \\
 Q_{SR} &= -(a_{SR}V_S)^2 (b_{SR} + b_{SR}^{sh}) - a_{SR}V_S V_R [g_{SR} \sin(\theta_{SR} + \varphi_{SR}) - b_{SR} \cos(\theta_{SR} + \varphi_{SR})] \\
 P_{RS} &= (V_R)^2 g_{SR} - a_{SR}V_S V_R [g_{SR} \cos(\theta_{SR} + \varphi_{SR}) - b_{SR} \sin(\theta_{SR} + \varphi_{SR})] \\
 Q_{RS} &= -(b_{SR} + b_{SR}^{sh})V_R^2 + a_{SR}V_S V_R [g_{SR} \sin(\theta_{SR} + \varphi_{SR}) + b_{SR} \cos(\theta_{SR} + \varphi_{SR})]
 \end{aligned}
 \tag{3.4}$$

Considerando que:

$$\begin{aligned}
 g_{SR} &= y_{SR} \cos \delta_{SR} \\
 b_{SR} &= y_{SR} \sin \delta_{SR}
 \end{aligned}
 \tag{3.5}$$

Donde:

$$\overline{Z}_{SR} = r_{SR} + jx_{SR}; \tan(\varphi_{SR}) = \frac{x_{SR}}{r_{SR}} : \quad \text{Impedancia serie de la línea}$$

$$\overline{Y}_{SR} = \frac{1}{\overline{Z}_{SR}}; Y_{SR} = g_{SR} + jb_{SR} : \quad \text{Admitancia de la línea}$$

$V_S; V_R$ : Magnitudes de las tensiones de las barras S y R respectivamente

$\theta_S; \theta_R$ : Ángulos de las tensiones de las barras S y R respectivamente

$\theta_{SR} = \theta_S - \theta_R$  : Diferencia de ángulos entre las tensiones de las barras S y R

$b_{SR}^{sh}$ : Mitad de la susceptancia capacitiva total de la línea ( $b_{SR}^{sh} > 0$ )

$b_R^{sh}$ : Susceptancia del dispositivo de compensación de potencia reactiva en la barra R

$b_{SR}^{sh} > 0, \text{capacitor}$      $b_{SR}^{sh} < 0, \text{reactor}$

$a_{SR}$ : Relación de transformación del lado S al lado R (cuando el vínculo entre barras es un transformador).

Cuando el vínculo entre barras es una línea  $a_{SR} = 1$ .

Sustituyendo las ecuaciones 3.5 en las ecuaciones de los flujos de potencia (3.4), tenemos:

$$\begin{aligned} P_{RS} &= (V_R)^2 y_{SR} \cos(A) - a_{SR} V_S V_R [y_{SR} \cos(A) \cos(B) - y_{SR} \sin(A) \sin(B)] \\ Q_{RS} &= -(y_{SR} \sin(A) + b_{SR}^{sh}) V_R^2 + a_{SR} V_S V_R [y_{SR} \cos(A) \sin(B) + y_{SR} \sin(A) \cos(B)] \end{aligned} \quad (3.6)$$

En donde:

$$A = \delta_{SR}; B = \theta_{SR} + \varphi_{SR}$$

Utilizando las propiedades trigonométricas siguientes:

$$\cos(A + B) = \cos(A) \cos(B) - \sin(A) \sin(B)$$

$$\sin(A * B) = \cos(A) \sin(B) + \sin(A) \cos(B)$$

(3.7)

el conjunto de ecuaciones 3.9 puede ser expresado de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} P_{RS} &= (V_R)^2 y_{SR} \cos(A) - a_{SR} V_S V_R [y_{SR} \cos(A + B)] \\ Q_{RS} &= -(y_{SR} \sin(A) + b_{SR}^{sh}) V_R^2 + a_{SR} V_S V_R [y_{SR} \sin(A + B)] \end{aligned}$$

(3.8)

El conjunto de ecuaciones 3.11, conociendo que:  $\text{sen}(-A) = -\text{sen}(A)$  y  $\text{cos}(-A) = \text{cos}(A)$ , también puede ser expresado como:

$$P_{RS} = \frac{V_R^2}{z_{SR}} \text{cos}(A) - \frac{a_{SR} V_S V_R [\text{cos}(A - B)]}{z_{SR}}$$

$$Q_{RS} = \frac{V_R^2}{z_{SR}} \text{sen}(A) - \frac{a_{SR} V_S V_R [\text{sen}(A - B)]}{z_{SR}} - V_R^2 b_{SR}^{sh}$$
 (3.9)

Reordenando, se tiene:

$$\frac{a_{SR} V_S V_R [\text{cos}(A - B)]}{z_{SR}} = \frac{V_R^2}{z_{SR}} \text{cos}(A) - P_{RS}$$

$$\frac{a_{SR} V_S V_R [\text{sen}(A - B)]}{z_{SR}} = \frac{V_R^2}{z_{SR}} \text{sen}(A) - Q_{RS} - V_R^2 b_{SR}^{sh}$$
 (3.10)

Elevando al cuadrado y sumando términos se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{a_{SR}^2 V_S^2 V_R^2}{z_{SR}^2} = \left( \frac{V_R^2}{z_{SR}} \text{cos}(A) - P_{RS} \right)^2 + \left( \frac{V_R^2}{z_{SR}} \text{sen}(A) - Q_{RS} - V_R^2 b_{SR}^{sh} \right)^2$$
 (3.11)

Si definimos  $U = V_R^2$ , tenemos la siguiente ecuación:

$$a_{SR}^2 V_S^2 U = U^2 \text{cos}^2(A) - 2U \text{cos}(A) z_{SR} P_{RS} + z_{SR}^2 P_{RS}^2 + U^2 \text{sen}^2(A) - 2U \text{sen}(A) z_{SR} (U b_{SR}^{sh} + Q_{RS}) + z_{SR}^2 (U b_{SR}^{sh} + Q_{RS})^2$$

$$0 = -a_{SR}^2 V_S^2 U + U^2 \text{cos}^2(A) - 2U \text{cos}(A) z_{SR} P_{RS} + z_{SR}^2 P_{RS}^2 + U^2 \text{sen}^2(A) - 2U \text{sen}(A) z_{SR} (U b_{SR}^{sh} + Q_{RS}) + z_{SR}^2 (U b_{SR}^{sh} + Q_{RS})^2$$
 (3.12)

Agrupando términos y estableciendo la ecuación en la forma  $aU^2 + bU + c = 0$ , tenemos:

$$0 = U^2 [\text{cos}^2(A) + \text{sen}^2(A) - 2\text{sen}(A) z_{SR} b_{SR}^{sh} + z_{SR}^2 b_{SR}^{sh^2}] + U [-a_{SR}^2 V_S^2 - 2 \text{cos}(A) z_{SR} P_{RS} - 2\text{sen}(A) z_{SR} Q_{RS} + 2z_{SR}^2 b_{SR}^{sh} Q_{RS}] + (z_{SR}^2 P_{RS}^2 + z_{SR}^2 Q_{RS}^2)$$
 (3.13)

Donde se pueden definir:

$$\mathbf{a} = 1 - 2\text{sen}(A)z_{SR}b_{SR}^{sh} + z_{SR}^2 b_{SR}^{sh^2} \quad (3.14)$$

$$\mathbf{b} = -a_{SR}^2 V_S^2 - 2 \cos(A) z_{SR} P_{RS} - 2\text{sen}(A)z_{SR} Q_{RS} + 2z_{SR}^2 b_{SR}^{sh} Q_{RS} \quad (3.15)$$

$$\mathbf{c} = z_{SR}^2 (P_{RS}^2 + Q_{RS}^2) \quad (3.16)$$

La solución para la ecuación cuadrática 3.16 viene dada por:

$$V_R = \pm \sqrt{\frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}} \quad (3.17)$$

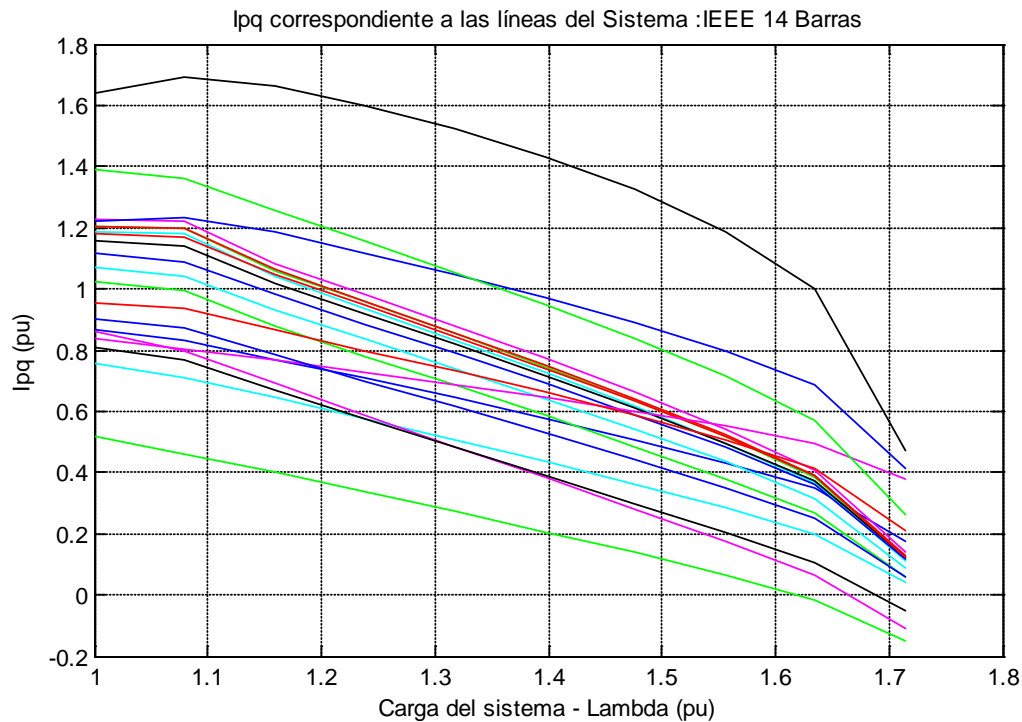
La ecuación 3.20 arrojará valores reales para  $V_R$  siempre que se cumplan las dos condiciones siguientes:

$$(1) b^2 - 4ac > 0; \quad y \quad (2) \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} > 0$$

De lo cual se define el índice de estabilidad de tensión  $I_{pq}$ , como:

$$I_{pq} = b^2 - 4ac \quad (3.18)$$

Este índice se calcula para cada uno de los elementos de transmisión del sistema y puede tener valores: positivo, negativo o cero. Para tener una idea gráfica del comportamiento del índice  $I_{pq}$ , a continuación se presenta la tendencia del índice para todas las líneas del sistema IEEE 14 barras.

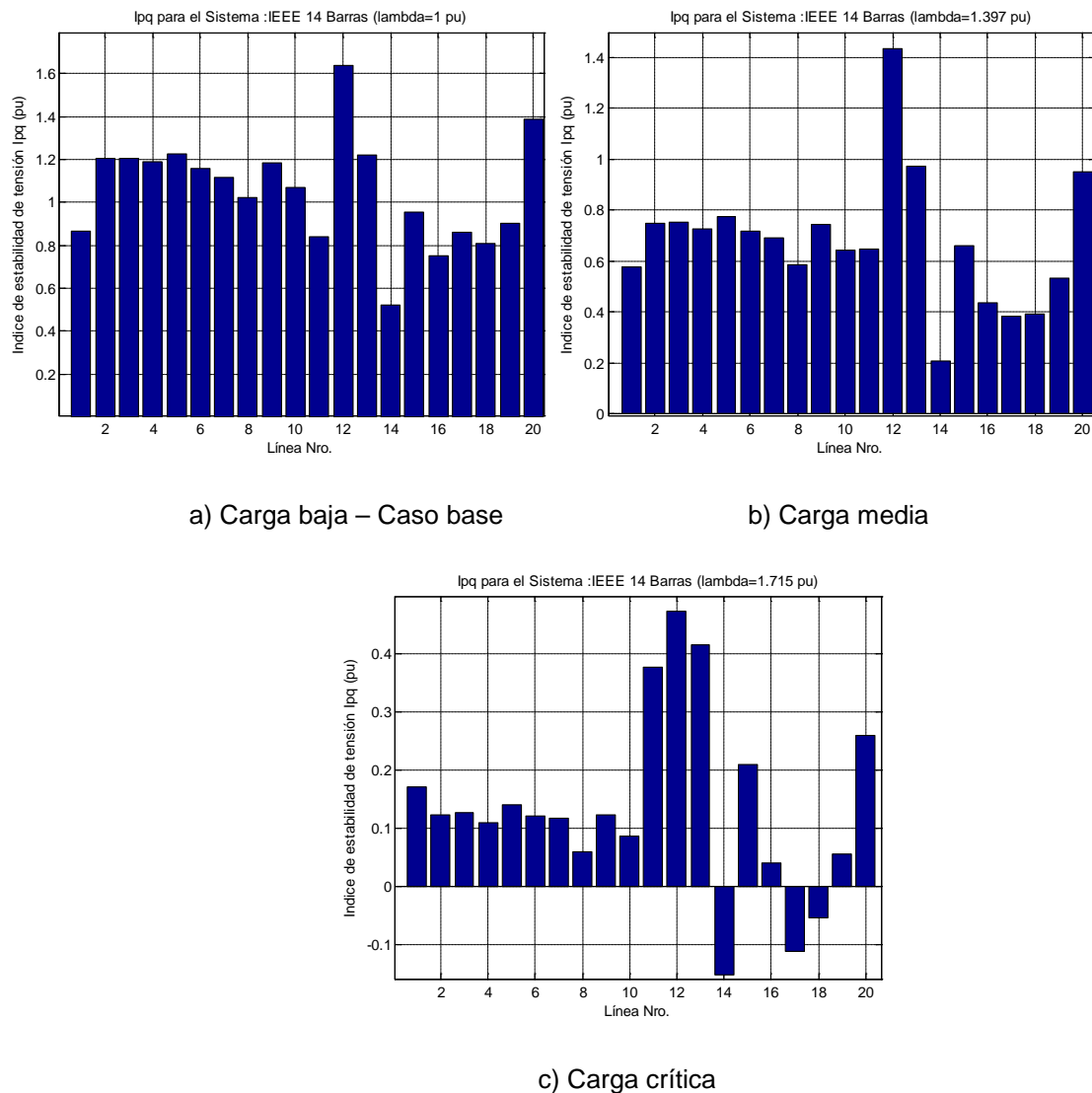


**Fig. 3.5** Comportamiento del índice de estabilidad de tensión  $I_{pq}$ .

Como se puede observar en la figura anterior, el índice  $I_{pq}$  calculado para las líneas del sistema IEEE de 14 barras parte de un valor alto para el caso base y conforme se incrementa el nivel de carga del sistema tiende a disminuir hasta llegar a valores próximos a cero (inclusive menores a cero en algunas líneas) en el punto de máxima cargabilidad. Esta característica del índice permite determinar las líneas más débiles respecto de la estabilidad de tensión, las mismas que serán aquellas en las cuales se obtengan los valores más cercanos a cero. Cuando los valores obtenidos son negativos, el índice indica que para ese nivel de carga ya se ha llegado a la inestabilidad de tensión.

En la figura 3.6 se presenta un diagrama de barras con los valores obtenidos del índice  $I_{pq}$  en todas las líneas del sistema IEEE de 14 barras, para tres niveles de carga tomados como referencia: caso base ( $\lambda=1$  pu), carga media ( $\lambda=1.397$  pu) y carga alta ( $\lambda_{crítico}=1.715$  pu).

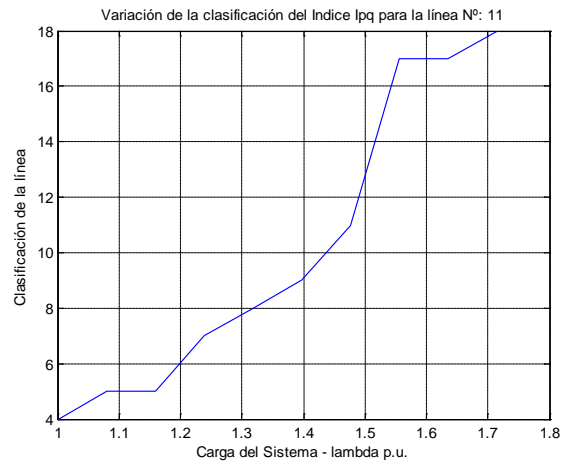




**Fig. 3.6** Índice de estabilidad de tensión  $I_{pq}$  para todas las líneas del sistema IEEE 14 barras: a) caso base, b) carga media, c) carga crítica.

Al analizar el comportamiento presentado por el índice  $I_{pq}$  para el sistema de prueba de IEEE de 14 barras se puede determinar que, ante el aumento del nivel de carga, éste presenta una tendencia monótona decreciente en todos los elementos del sistema, siendo muy notable dicha variación, lo cual hace prever que, las áreas débiles respecto de la estabilidad de tensión son fácilmente localizables a través de este índice. Adicionalmente se debe indicar que el esfuerzo computacional necesario para calcularlo es muy bajo, lo cual permite que el índice sea obtenido casi de forma inmediata para todos los elementos del sistema.

Una de las desventajas del uso del índice  $I_{pq}$  es la no linealidad de comportamiento obtenida para ciertos elementos del sistema ante aumento del nivel de carga, aspecto que se puede evidenciar en la figura 3.7.



**Fig. 3.7** Variación de la clasificación de la línea Nro. 11 del sistema IEEE 14 barras, obtenida a través del índice de estabilidad  $I_{pq}$ .

En la figura anterior se presenta una gráfica correspondiente a la clasificación por contingencias obtenida para la línea Nro. 11 del sistema IEEE 14 barras para varias condiciones de carga, que comprenden desde el caso base hasta el nivel de carga crítica.

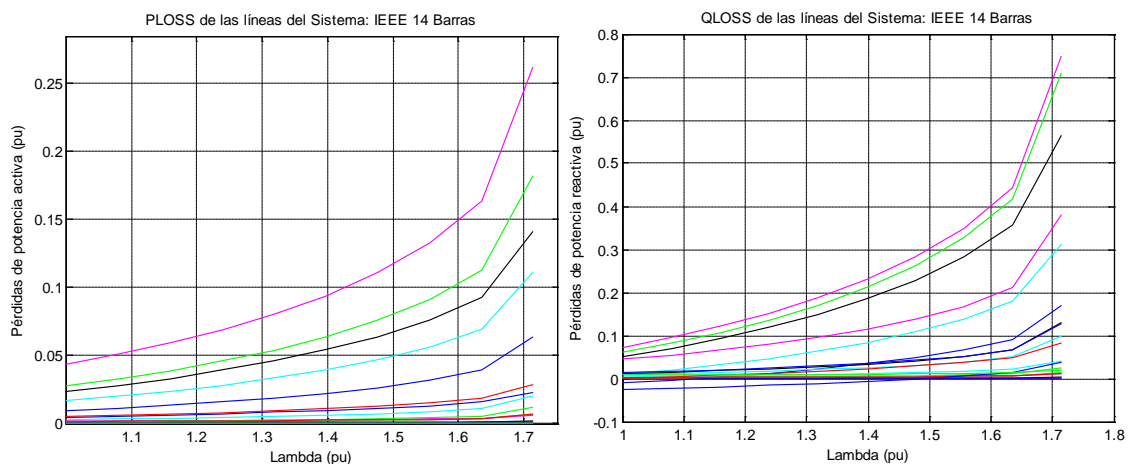
Cabe indicar que la clasificación por contingencias indica los elementos cuya salida de operación provocarían la inestabilidad de tensión del sistema, información indispensable para que los operadores del sistema eléctrico tomen las acciones de control necesarias si el nivel de carga es tal, que pueda provocar la salida de los elementos más críticos y consecuentemente llevar al sistema a una situación de inevitable colapso de tensión.

Esta clasificación indica el nivel de criticidad que presenta cada elemento del sistema respecto de la estabilidad de tensión, es decir, el gráfico de la figura 3.7 se podría interpretar de la siguiente forma: **la línea Nro. 11 del sistema IEEE de 14 barras es menos crítica respecto de la estabilidad de tensión cuando mayor es el nivel de carga del sistema.** Si bien esta es una interpretación del resultado obtenido, se debe más bien aclarar que este es uno de los defectos presentados por el comportamiento del índice  $I_{pq}$ , puesto que, el resultado obtenido a través del margen de cargabilidad (APENDICE E) presenta a la línea Nro. 11 como el elemento más crítico del sistema IEEE de 14 barras en lo que respecta a la estabilidad de tensión.

Sin embargo, si se toman en cuenta todos los aspectos indicados previamente se concluye que el índice de estabilidad de tensión basado en los flujos de potencia activa y reactiva  $I_{pq}$  presenta más ventajas que desventajas, razón por la cual se lo considera como adecuado para ser utilizado como entrada del sistema difuso.

### 3.2.3. Pérdidas de potencia activa y reactiva

Las pérdidas de potencia activa y reactiva tienen un comportamiento exponencialmente creciente respecto al aumento continuo del nivel de carga; si bien las pérdidas como tal corresponden a variables de operación propias del sistema, tienen una relación directa con la estabilidad de tensión del sistema, debido a que, mientras más cargado el sistema, mayores son las pérdidas de potencia activa y reactiva y por tanto el sistema se encontrará más próximo al punto de colapso o inestabilidad. El comportamiento de estos índices se muestra a continuación.

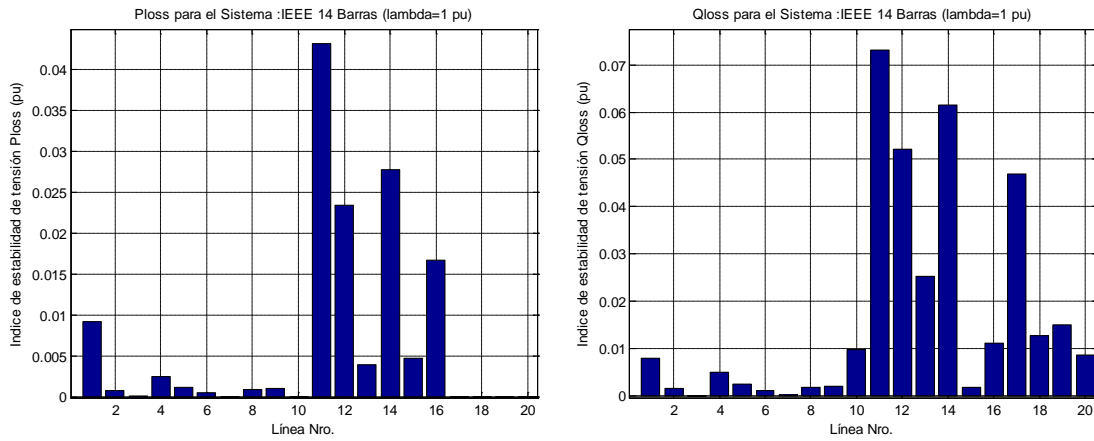


**Fig. 3.8** Comportamiento de las pérdidas de potencia activa (*Ploss*) y reactiva (*Qloss*) ante incremento de carga.

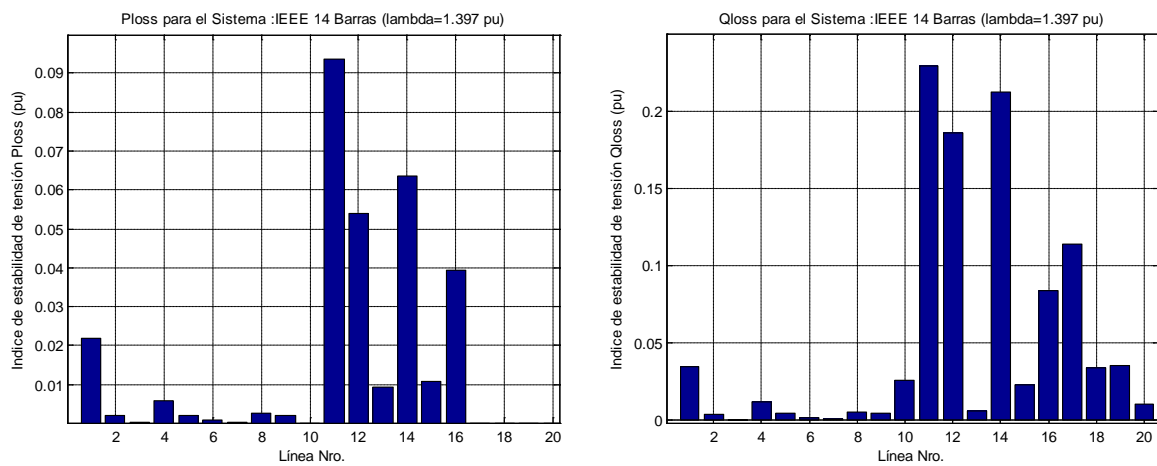
Las pérdidas de potencia activa y reactiva tienen un comportamiento y una tendencia totalmente opuesta a lo descrito anteriormente para otros índices de estabilidad de tensión, es decir, para bajos niveles de carga se producen bajos niveles de pérdidas y, a medida en que se incrementa la carga del sistema, también aumentan las pérdidas. Ambos índices, tanto las pérdidas de potencia activa como de potencia reactiva tienen comportamientos similares, tal como se puede apreciar en la figura 3.8.

En este caso, la relación que tendrán los niveles de pérdidas con respecto a la detección de áreas débiles en relación con la estabilidad de tensión será la siguiente: Las líneas de transmisión más sensibles y por tanto débiles, serán aquellas en las cuales se produzcan los mayores niveles de pérdidas tanto de potencia activa como de potencia reactiva y por consiguiente, las líneas que presenten las pérdidas más bajas serán aquellas líneas más robustas del sistema.

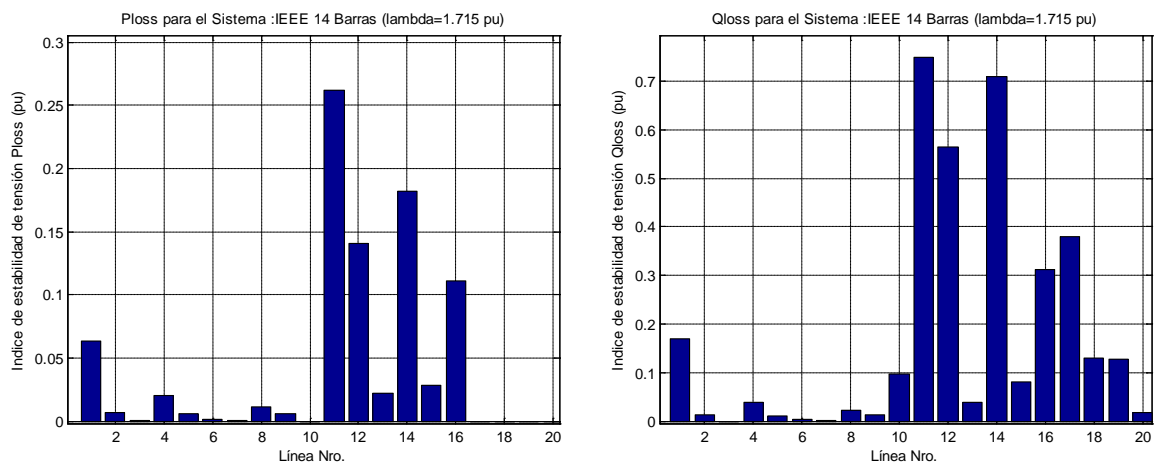
A continuación se presentan gráficamente los valores obtenidos tanto para *Ploss* como para *Qloss* en las 20 líneas del sistema IEEE 14 barras, para los tres niveles de carga analizados ( $\lambda=1$ ,  $\lambda=1.397$  y  $\lambda=1.715$  pu).



a) Caso base



b) Carga media



a) Carga crítica

**Fig. 3.9** Valores de *Ploss* y *Qloss* para todas las líneas del sistema IEEE 14 barras: a) caso base, b) carga media, c) carga crítica.

Como se puede apreciar en los diagramas de barra, los valores de pérdidas de potencia activa ( $P_{loss}$ ) y reactiva ( $Q_{loss}$ ) tienen una tendencia creciente con el aumento de carga del sistema, y además, en los tres niveles de carga analizados los índices muestran que las líneas 11, 12, 14, 16 presentan los valores más altos y por tanto corresponden a las líneas más débiles respecto a la estabilidad de tensión (datos que en gran parte concuerdan con los resultados mostrados en el APENDICE E). Sin embargo cabe indicar que el índice  $P_{loss}$  no proporciona información alguna respecto al comportamiento respecto de la estabilidad de tensión de los transformadores del sistema (como por ejemplo las denominadas líneas Nro. 10, 17, 18 del sistema de prueba), puesto que estos elementos no presentan considerables niveles de pérdidas de potencia activa, lo que provoca que este índice tenga ciertas restricciones en el análisis global. Por otra parte se observa que el índice  $Q_{loss}$  tiene mucho mejor desempeño en el análisis global de los elementos del sistema de potencia que se consideran débiles desde el punto de vista de la estabilidad de tensión.

En términos generales estos dos índices tienen comportamientos bastante adecuados y en muchos casos complementarios, razón por la cual son considerados como índices de entrada para el sistema difuso a desarrollarse en presente trabajo de investigación.

Adicionalmente es importante recalcar que, estas variables del sistema están íntimamente relacionadas con la estabilidad de tensión de un sistema eléctrico, lo cual se refleja en el comportamiento lineal que presentan ante incrementos del nivel de carga.

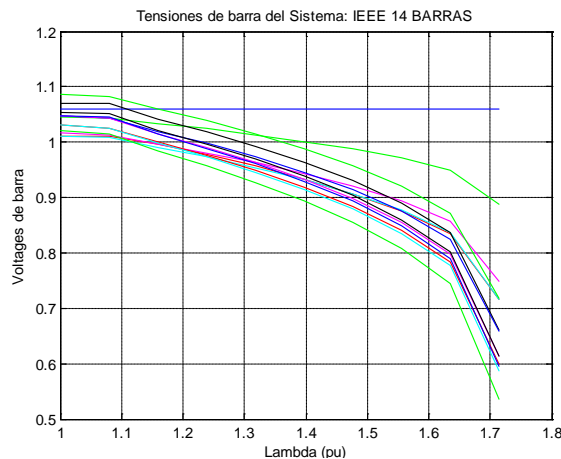
Sin embargo, como se indicó anteriormente se debe tomar en cuenta que las pérdidas de potencia activa no son índices confiables en la detección de elementos débiles del sistema que correspondan a transformadores, puesto que para estos casos las pérdidas  $P_{loss}$  tienen muy poco o nulo incremento, presentando siempre valores cercanos a cero, lo cual desvirtúa la búsqueda de las líneas más críticas de un sistema, debido a que cuando los elementos de mayor criticidad corresponden a un transformador, estos no son detectadas a través de este índice.

#### **3.2.4. Niveles de Tensión**

Si bien el nivel de tensión en las barras de un sistema eléctrico de potencia es la variable que nos interesa mantener y controlar por distintos métodos, no es menos cierto que a partir de determinados valores de carga, nos pueden ayudar a identificar las áreas donde se presenta mayor susceptibilidad y por ende inestabilidad. En general, los niveles de tensión por si solos no son considerados como buenos índices de estabilidad de tensión, sin embargo si los asociamos con otros índices se pueden complementar de forma bastante adecuada. La tendencia de este índice es disminuir su valor cuando se incrementa el nivel de carga, es

decir cuanto menor es el nivel de tensión en una barra dada, mayor será su nivel de criticidad.

Una característica muy importante de este índice es que, no tiene un comportamiento monótono decreciente como en el caso del  $I_{pq}$ , puesto que a partir de un valor dado (generalmente entre 0.7 y 0.8 pu) decrece a valores muy bajos y cercanos a cero. Esto nos da la pauta para determinar en qué niveles de carga se llega a la inestabilidad de tensión. La gráfica siguiente muestra la tendencia de los niveles de tensión en las barras del sistema IEEE 14 barras.

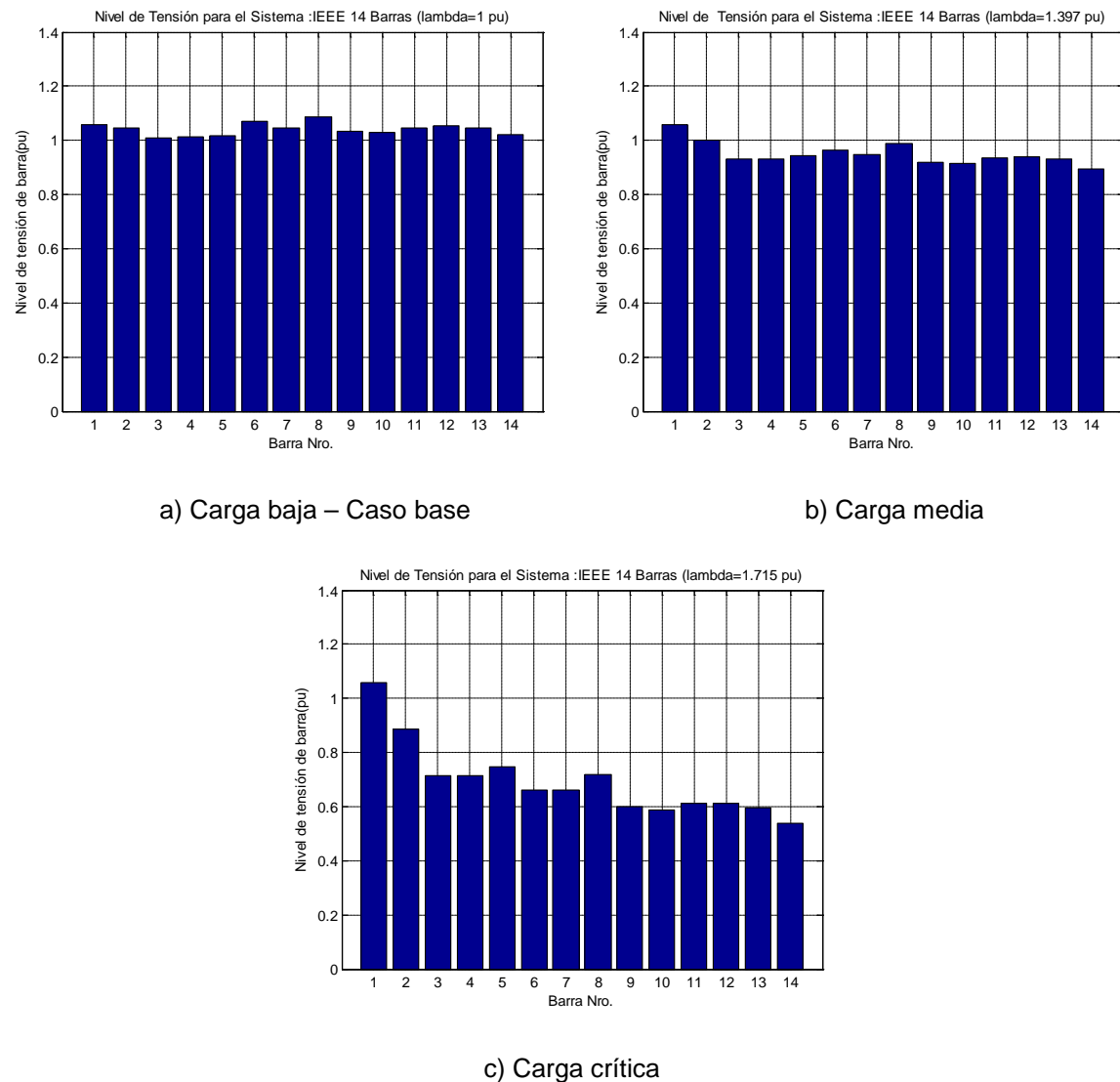


**Fig. 3.10** Tendencia de los niveles de tensión en las barras del sistema IEEE 14 barras ante aumento de carga.

Tal como se anticipó, los niveles de tensión en la mayor parte de las líneas decaen de forma monótonica hasta un cierto nivel de carga, después de este umbral los valores decaen abruptamente indicando que el sistema ha caído en un colapso de tensión.

Cabe indicar que si bien los niveles de tensión son variables que se calculan para cada nodo (barra) del sistema, en el presente trabajo se han obtenido niveles de tensión que representen a cada línea de transmisión a partir del menor nivel de tensión correspondiente a las barras a las cuales se interconecta cada una de las líneas.

A continuación se muestran los niveles de tensión obtenidos para el sistema IEEE 14 barras, en los tres niveles de carga de referencia.



**Fig. 3.11** Niveles de tensión en las barras del sistema IEEE 14 barras: a) caso base, b) carga media, c) carga crítica.

Es importante resaltar que, si bien los niveles de tensión no presentan la sensibilidad obtenida por los otros índices de estabilidad descritos anteriormente, no es conveniente obviar ni ignorar este índice, puesto que en definitiva esta es la variable que deseamos evitar que disminuya a niveles críticos en las barras del sistema. Generalmente, este índice es distorsionado debido a que existen varias barras del sistema que por su importancia corresponden a barras tipo PV o de tensión controlada, barras a las cuales se encuentran asociados elementos de generación o compensadores síncronos y que por ende mantienen ciertos niveles de tensión incluso ante aumentos considerables de los niveles de carga. Sin embargo, este índice logra ser útil cuando el sistema se encuentra cerca del punto de cargabilidad máximo, puesto que para estos niveles de carga, los niveles de tensión en las barras más sensibles decaen súbitamente, lográndose con ello detectar varios nodos débiles del sistema.

Como resultado global del análisis de esta sección se puede decir que los índices de estabilidad de tensión que serán considerados como entradas del sistema difuso son: Índice basado en flujos de potencia activa y reactiva ( $I_{pq}$ ), Pérdidas de potencia activa ( $P_{loss}$ ), Pérdidas de potencia reactiva ( $Q_{loss}$ ), Niveles de tensión ( $V$ ).

Es importante mencionar que estos índices de estabilidad de tensión han sido considerados como entradas del sistema difuso debido a que, cumplen con las características requeridas para la detección de áreas débiles en el campo de la operación en tiempo real, tales como:

- Son fácil y simultáneamente obtenidos a través del cálculo de flujos de potencia convencionales, lo cual permite disponer de ellos en tiempos muy cortos.
- Presentan un comportamiento conocido frente a incrementos continuos de los niveles de carga (tendencia).
- Son buenos indicadores de las áreas débiles del sistema respecto a la estabilidad de tensión.

Las pérdidas de potencia activa, reactiva y los niveles de tensión son variables del sistema que se encuentran íntimamente relacionadas con el fenómeno del colapso de tensión, razón por la cual, su inclusión en el sistema difuso es de vital importancia

### 3.3. Sistema de Inferencia Difuso para la obtención del índice propuesto

Tal como ya se indicó anteriormente, los índices candidatos que se han establecido como entradas del sistema corresponden a:

$I_1$ : Nivel de tensión de líneas ( $V$ )

$I_2$ : Pérdidas de potencia activa en líneas ( $P_{loss}$ )

$I_3$ : Pérdidas de potencia reactiva en líneas ( $Q_{loss}$ )

$I_4$ : Índice de estabilidad de tensión basado en los flujos de potencia activa y reactiva que fluyen por los elementos de la red ( $I_{pq}$ )

Por otra parte, el índice de estabilidad de tensión propuesto se lo ha denominado:

$I_{ETD}$ : Índice de estabilidad de tensión difuso

Cabe tener en cuenta que, en primera instancia el sistema difuso fue desarrollado con la incorporación de un quinto índice, el índice del vector tangente ( $TVI$ ), sin embargo, luego de revisar exhaustivamente su comportamiento se determinó que no tenía la sensibilidad requerida en la detección de las áreas que presentan mayor debilidad respecto de la estabilidad de tensión, especialmente en los nodos



PV o de tensión controlada; por lo tanto éste índice fue excluido del sistema difuso final.

El sistema de inferencia difuso se desarrolló en la herramienta de Lógica Difusa existente dentro del entorno de MATLAB, la misma que permite mediante códigos de programación propios, crear todas las variables (entradas, salidas), funciones de pertenencia, reglas difusas, etc que requiere el sistema.

El sistema difuso para obtención del índice de estabilidad de tensión presupone la realización previa de varias etapas, las mismas que son detalladas a continuación

### 3.3.1. Cálculo de las entradas del sistema

Para la obtención de los índices de estabilidad considerados como entradas del sistema, se ha utilizado el software PSAT 1.3.4, el mismo que trabaja en el entorno de MATLAB. Los índices han sido calculados para varios estados de carga del sistema, desde el caso base ( $\lambda = 1$  pu) hasta el estado de carga crítica ( $\lambda = \lambda$  crítico). Además a todos ellos, se los ha normalizado, de tal forma que siempre se encuentren en el rango comprendido entre 0 y 1, esto con la finalidad que los valores obtenidos para cada uno de índices calculados, sean comparables entre sí y tengan significados similares desde el punto de vista conceptual en la detección de las áreas que presentan mayor debilidad.

Si bien, los índices:  $P_{loss}$ ,  $Q_{loss}$  e  $I_{pq}$  son calculados para cada línea del sistema, los niveles de tensión son calculados para cada nodo; por lo tanto, y con el objeto que pueda haber una concatenación en el sistema difuso, ha sido necesario transformar los niveles de tensión en los nodos a índices por líneas; para esto se ha tomado como **índice de tensión de una línea** (conectada a los nodos  $i$  e  $j$ ) el menor valor de voltaje que se haya obtenido en los nodos “ $i$ ” e “ $j$ ” que forman parte de esa línea.

Todos los índices obtenidos para cada uno de los estados de carga analizados, son ordenados en vectores y posteriormente en una única matriz, la misma que será la entrada general del sistema difuso

### 3.3.2. Fusificación de las entradas

Una vez calculados los índices que serán consideradas las entradas del sistema difuso, se requiere realizar el proceso de *Fusificación*, el mismo que consiste en convertir valores reales en conjuntos difusos [14]; conversión que se logra a través de la definición de las **Funciones de Pertenencia** (las cuales se explican con detalle en el Apéndice A).

En este caso se ha probado el comportamiento del sistema difuso con tres tipos de funciones de pertenencia: triangular, trapezoidal y gaussiana. Es importante tener en cuenta que, previo a la definición de las funciones de pertenencia a utilizar, se debe determinar la cantidad de **niveles lingüísticos difusos**, y los

umbrales de cada uno de ellos; es decir, por ejemplo si analizamos las pérdidas de potencia reactiva de una línea, requerimos determinar los intervalos para los cuales aseveramos que los niveles de pérdidas son: bajos, medianos o altos. En este caso, para realizar la definición de los límites o umbrales de cada nivel lingüístico difuso es importante realizar un exhaustivo estudio previo del comportamiento de cada uno de los índices considerados como entradas del sistema, de tal forma que tengamos la certeza de que los rangos definidos son los adecuados.

Los niveles definidos son los siguientes:

- Para los niveles de tensión (índice  $I_1$ ) se han definido tres niveles lingüísticos: bajo, medio y alto.
- Para todos los demás índices: pérdidas de potencia activa (índice  $I_2$ ), pérdidas de potencia reactiva (índice  $I_3$ ), índice de flujo de potencia activa y reactiva (índice  $I_4$ ) e inclusive para el índice difuso de estabilidad de tensión ( $I_{ETD}$ ) se han definido cinco niveles lingüísticos: bajo, medio-bajo, medio, medio-alto y alto.

Cada nivel lingüístico tiene distintos límites, los cuales dependen del comportamiento individual de cada índice y de la experiencia del desarrollador del sistema; este aspecto tiene una gran relevancia en el éxito o fracaso del sistema difuso. Los niveles lingüísticos definidos son los siguientes:

**Tabla 3.1:** Niveles lingüísticos de los índices de estabilidad de tensión.

Nivel Lingüístico	Límites Niveles de Tensión ( $I_1$ )		Límites Ploss ( $I_2$ )		Límites Qloss ( $I_3$ )		Límites $I_{pq}$ ( $I_4$ )		Límites IETD	
	Inferior	Superior	Inferior	Superior	Inferior	Superior	Inferior	Superior	Inferior	Superior
Bajo	0.00	0.88	0.00	0.50	0.00	0.65	0.00	0.20	0.00	0.15
Medio-bajo	---	---	0.50	0.82	0.65	0.85	0.20	0.40	0.15	0.35
Medio	0.88	0.95	0.82	0.95	0.85	0.95	0.40	0.60	0.35	0.55
Medio-alto	---	---	0.95	0.98	0.95	0.985	0.60	0.65	0.55	0.75
Alto	0.95	1.00	0.98	1.00	0.985	1.00	0.65	1.00	0.75	1.00

En este caso se ha decidido definir una considerable cantidad de niveles lingüísticos con la finalidad de obtener resultados más precisos; sin embargo, al mismo tiempo aumenta drásticamente el nivel de complejidad del sistema puesto que la cantidad de combinaciones posibles para definir las reglas difusas se incrementa substancialmente. Esta circunstancia provoca que el desarrollador del sistema realice un estudio previo del comportamiento de cada índice y de las combinaciones que permitan detectar las líneas más débiles del sistema respecto a la estabilidad de tensión, de tal forma que solamente estas combinaciones sean analizadas y evaluadas.

Una vez definidos los límites inferior y superior de cada nivel lingüístico de los índices involucrados, se deben definir las funciones de pertenencia que

representará a cada conjunto difuso; en este caso se decidió realizar el análisis de tres tipos de funciones de pertenencia: triangular, trapezoidal y gaussiana, las mismas que se muestran en la siguiente gráfica.

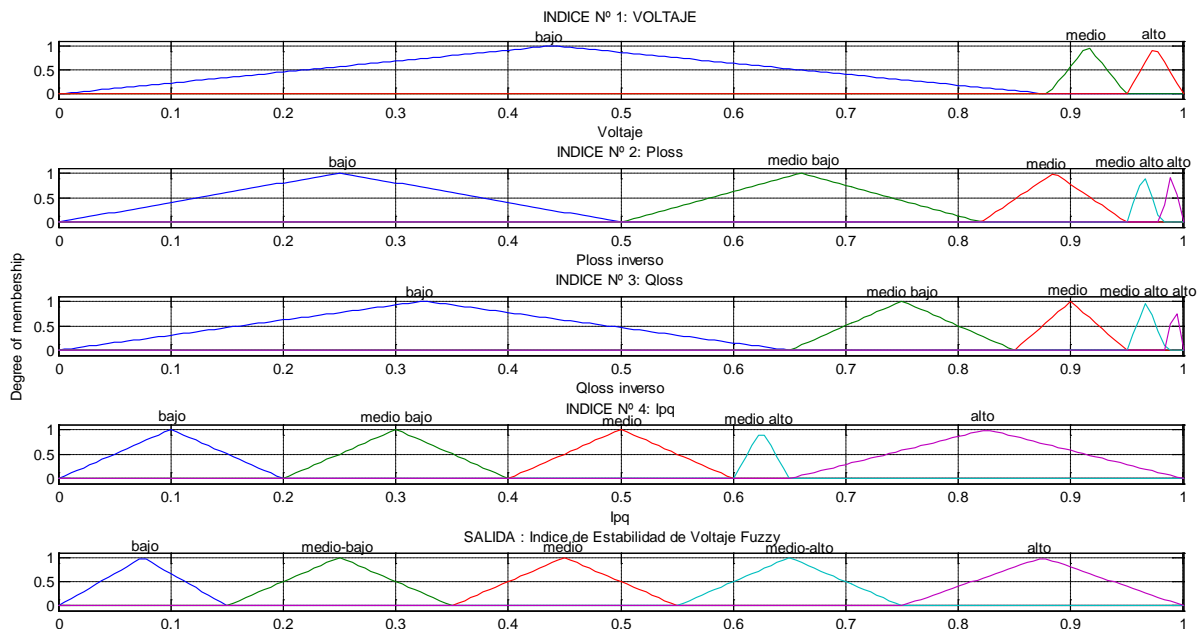


Fig. 3.12- Funciones de pertenencia tipo triangular para los índices del sistema.

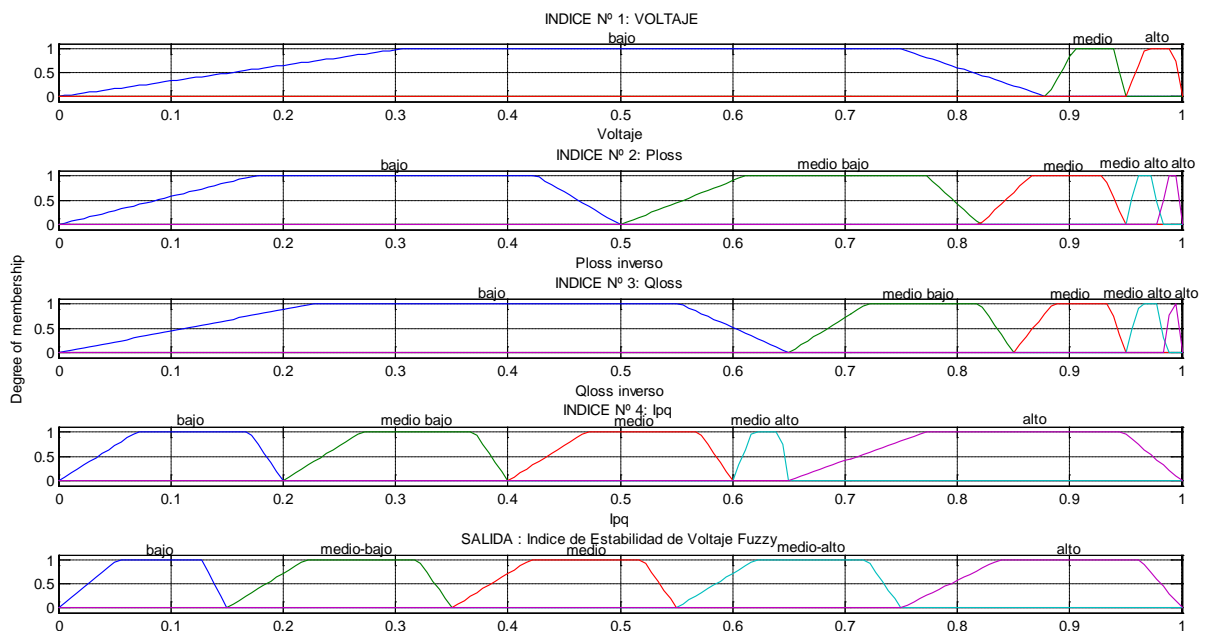
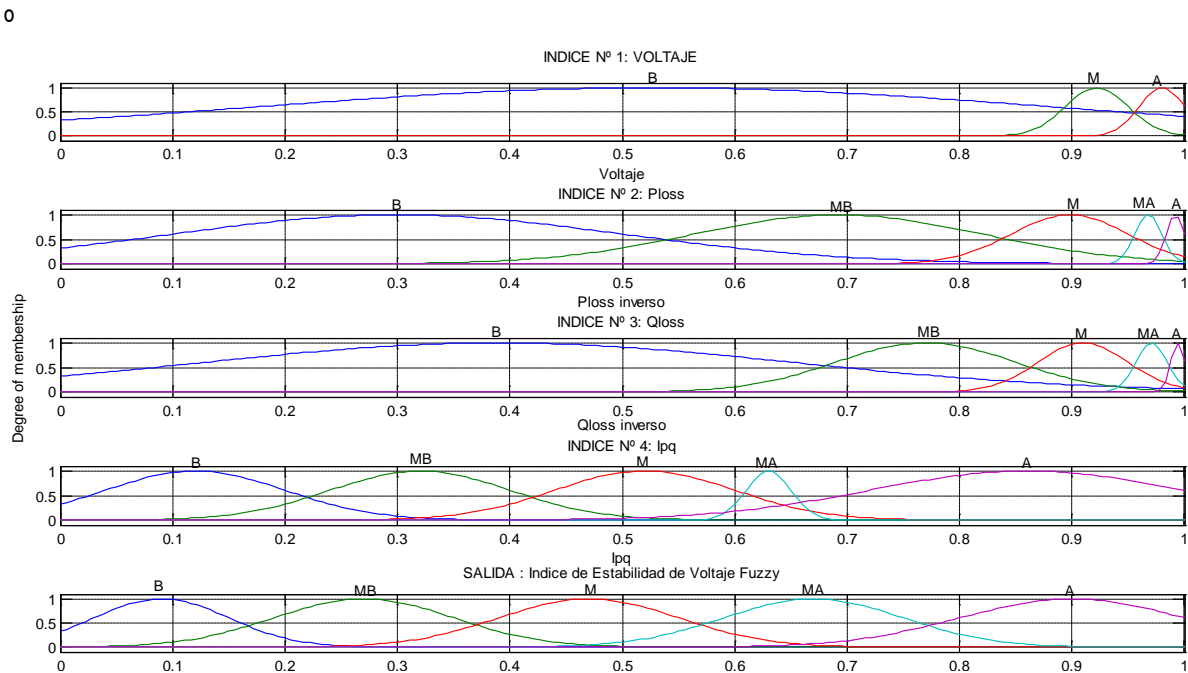


Fig. 3.13- Funciones de pertenencia tipo trapezoidal para los índices del sistema.



**Fig. 3.14-** Funciones de pertenencia tipo gaussiana para los índices del sistema.

Es importante indicar que, debido a que las pérdidas de potencia activa y reactiva ( $P_{loss}$  y  $Q_{loss}$ ) tienen comportamientos distintos a los demás índices (Niveles de tensión e  $I_{pq}$ ), en virtud de que poseen una relación inversa con la estabilidad de tensión (puesto que mientras mayores niveles de pérdidas se tiene, menores son los niveles de estabilidad de tensión del sistema), el sistema difuso ha sido desarrollado tomando como entradas del sistema a los inversos de las pérdidas activa y reactiva ( $1 - P_{loss}$  y  $1 - Q_{loss}$  respectivamente). Si bien conceptualmente no tiene ninguna repercusión, este artificio nos permitirá relacionar de mejor manera la combinación de índices en la definición de las reglas difusas y con ello afinar de mejor manera los resultados.

Si bien es cierto, existe una variedad de formas para definir las funciones de pertenencia correspondientes a los conjuntos difusos, en este caso se han escogido tres tipos de funciones definidos en la herramienta de lógica difusa MATLAB (triangular, trapezoidal y gaussiana), luego de lo cual y después de realizar las comparaciones correspondientes se escogerá aquella función de pertenencia que nos proporcione la mayor versatilidad y sensibilidad.

La definición de la cantidad de niveles lingüísticos es una decisión del desarrollador del sistema y depende básicamente del conocimiento que se tenga del comportamiento de las entradas del sistema y la precisión que se quiera lograr en la salida. En este caso, una vez que se ha realizado un análisis exhaustivo de las tendencias que posee cada índice, se han determinado 5 niveles lingüísticos, los cuales son: bajo, medio-bajo, medio, medio-alto y alto, con excepción de los niveles de tensión ( $I_1$ ) para el cual solamente se han definido los niveles: alto, medio y bajo; esto además nos permitirá tener una adecuada cantidad de reglas

difusas y con ello lograr mayor precisión en la determinación del índice de estabilidad de tensión difuso.

Una vez que se han asignado las funciones de pertenencia y se han seleccionado los distintos niveles lingüísticos para cada uno de los índices del sistema se da por finalizada la etapa de Fusificación.

### 3.3.3. Determinación de las Reglas Difusas

Posteriormente a realizarse el proceso de Fusificación de todas las entradas del sistema, se deben desarrollar las denominadas “Reglas Difusas”, las mismas que relacionan a través de un operador ( $Y$ ,  $O$ ) a cada una de ellas, con la finalidad de obtener un número que represente el resultado del antecedente de la regla; este número luego será aplicado a la función de salida de dicha regla. La forma general de las reglas difusas para este sistema será la siguiente:

**Si**  $I_1$  es bajo **Y**  $I_2$  es medio-bajo **Y**  $I_3$  es bajo **Y**  $I_4$  es bajo, **entonces**  $I_{ETD}$  es bajo

Cabe indicar que, se podrán desarrollar tantas reglas difusas como sean necesarias, de tal forma que se abarquen las combinaciones más importantes y que sean representativas del sistema en la detección de las líneas más débiles respecto a la estabilidad de tensión, de tal forma que generen los resultados esperados en la salida del sistema y sea aplicable de forma general a cualquier sistema de prueba. Cada regla difusa podrá tener asignado un “peso”, el mismo que es un número comprendido entre 0 y 1, el cual es aplicado al número dado por el antecedente de la regla difusa y que nos permite disponer de un parámetro “afinador” de los resultados obtenidos para cada regla.

El sistema difuso desarrollado abarca las combinaciones más críticas posibles para todos los estados de carga, es decir, desde el caso ( $\lambda=1$ ) base hasta el nivel de máxima cargabilidad ( $\lambda= \lambda_{crítico}$ ) y consta de 161 reglas difusas, de las cuales 131 corresponden estrictamente a líneas de transmisión y 30 a transformadores. Es necesario hacer una diferenciación entre las reglas correspondientes a líneas y a transformadores en vista de que el índice de pérdidas de potencia activa ( $P_{loss}$ ) no es aplicable a transformadores por cuanto este parámetro es prácticamente cero para todos los niveles de carga, lo cual provocaría una distorsión en los resultados obtenidos.

El modelo difuso exige que se asigne un número para describir cada uno de los niveles lingüísticos de las distintas entradas del sistema (índices), es decir en este caso existe la siguiente correspondencia:

Nivel Lingüístico	Correspondencia numérica
Nivel bajo	1
Nivel medio-bajo	2
Nivel medio	3
Nivel medio-alto	4
Nivel alto	5

Con estas consideraciones, las reglas difusas se describen en su totalidad en la Tabla 3.1. Cabe indicar y tal como ya se explicó anteriormente, se ha realizado una diferenciación de las reglas difusas aplicables para líneas y las que se aplican para transformadores, debido a que el índice de pérdidas de potencia activa ( $P_{loss}$ ) es prácticamente cero en los transformadores, por tanto las reglas difusas aplicables a los transformadores están compuestas solamente por 3 índices: niveles de tensión, pérdidas de potencia reactiva e Índice de flujo de potencia activa y reactiva ( $I_{pq}$ ).

Es importante indicar que si bien existe una gran cantidad de combinaciones posibles entre los cuatro índices definidos, sin embargo en base al análisis profundo del comportamiento de los índices de estabilidad se ha llegado a determinar las condiciones bajo las cuales se puede detectar las líneas que presentan las condiciones de mayor criticidad. Para esto se seleccionan aquellas combinaciones que proporcionen la mejor información posible y cuya relación tenga concordancia desde el punto de vista conceptual en la detección de áreas débiles del sistema; para lo cual es importante tener en cuenta que, se deben considerar las combinaciones que directamente estén relacionadas con estados de cercanía a la inestabilidad en cualquiera de los elementos del sistema; es decir nos debemos concentrar en encontrar todas aquellas reglas difusas que permitan detectar estados de inestabilidad y que inexorablemente confluyan en determinar cuando el nivel lingüístico resultante para el índice difuso propuesto se encuentre en nivel bajo (denominado numéricamente como "1") ó en nivel medio-bajo (denominado como "2"), los mismos que corresponden a los niveles más críticos definidos para el índice difuso de estabilidad de tensión. Las reglas difusas desarrolladas se detallan a continuación:

**Tabla 3.2:** Reglas difusas definidas para el sistema de inferencia difuso.

Reglas Difusas para Líneas de Transmisión																												
Regla Nro.	I1	I2	I3	I4	IETD	Peso	Regla Nro.	I1	I2	I3	I4	IETD	Peso	Regla Nro.	I1	I2	I3	I4	IETD	Peso	Regla Nro.	I1	I2	I3	I4	IETD	Peso	
1	3	5	5	4	5	1	41	1	5	5	1	3	1	81	3	2	5	5	4	1	121	2	5	3	3	3	0.5	
2	3	5	5	5	5	1	42	3	1	1	2	1	1	82	2	5	4	5	3	1	122	2	4	2	2	3	1	
3	3	4	3	4	4	0.5	43	1	2	1	1	1	1	83	3	5	1	2	3	1	123	1	4	3	3	2	1	
4	3	4	3	5	4	0.5	44	1	3	2	1	2	1	84	2	2	2	1	2	1	124	2	5	4	3	3	1	
5	3	4	3	3	3	1	45	1	5	2	1	1	1	85	2	5	5	5	5	1	125	1	5	1	1	2	1	
6	3	5	5	3	4	1	46	1	4	4	1	3	1	86	3	2	1	5	3	1	126	3	3	3	1	3	1	
7	3	5	4	4	4	1	47	1	5	4	1	3	1	87	3	1	1	1	2	1	127	3	4	4	2	4	1	
8	3	3	3	4	3	1	48	2	1	1	2	1	1	88	3	2	2	1	2	1	128	1	1	1	5	1	0.2	
9	3	4	3	2	3	1	49	1	2	1	2	1	1	89	3	3	2	1	3	1	129	3	2	2	2	2	0.5	
10	3	5	4	3	4	1	50	1	4	4	2	3	1	90	3	2	2	1	2	1	130	2	4	3	3	3	0.2	
11	3	5	3	3	3	1	51	1	1	1	1	1	1	91	2	1	2	1	2	1	131	3	5	4	2	4	1	
12	3	3	3	3	3	0.5	52	1	4	3	1	2	1	92	2	3	3	5	3	1								
13	3	4	3	3	3	1	53	1	2	2	1	1	1	93	2	4	4	5	4	1								
14	3	3	2	3	2	1	54	3	5	4	5	5	1	94	3	2	1	2	2	1								
15	2	5	5	3	3	1	55	3	4	5	5	5	0.5	95	3	3	2	3	2	0.5								
16	2	5	5	4	4	1	56	3	5	2	3	3	1	96	2	5	1	2	2	1								
17	3	3	2	1	2	1	57	3	3	3	1	3	1	97	2	3	2	2	3	0.5								
18	3	5	3	2	3	1	58	3	4	5	1	3	1	98	2	2	2	5	2	1								
19	3	5	4	2	3	1	59	3	4	5	3	4	1	99	3	3	1	5	3	1								
20	3	4	4	3	3	1	60	3	5	3	5	4	1	100	3	2	2	5	3	1								
21	2	5	4	3	3	1	61	3	4	4	5	4	1	101	2	1	1	1	1	0.3								
22	2	3	2	5	2	1	62	3	5	5	3	5	1	102	3	4	2	2	3	1								
23	2	5	5	5	4	1	63	3	4	5	4	4	0.5	103	3	4	2	1	3	0.5								
24	2	4	3	2	3	1	64	3	4	4	2	4	0.5	104	3	4	3	2	3	1								
25	2	5	4	2	3	1	65	3	5	1	3	3	1	105	3	1	1	5	2	1								
26	2	4	4	3	3	1	66	3	3	5	5	4	1	106	2	5	3	5	3	1								
27	1	5	5	3	4	1	67	3	3	2	5	3	1	107	2	5	1	1	2	1								
28	3	2	2	3	2	1	68	3	3	5	1	3	1	108	2	2	1	5	2	0.5								
29	2	3	2	1	2	1	69	3	4	2	5	3	1	109	3	5	1	5	4	1								
30	2	5	3	1	2	1	70	3	3	3	2	3	1	110	3	4	2	3	3	1								
31	2	5	4	1	3	1	71	3	3	3	5	3	1	111	3	5	1	1	2	1								
32	1	5	5	2	3	1	72	3	2	1	1	3	1	112	2	4	3	3	3	0.2								
33	1	5	4	2	3	1	73	3	4	5	2	4	1	113	1	5	5	3	3	1								
34	1	3	2	5	2	1	74	3	5	2	5	4	1	114	2	5	5	3	4	1								
35	1	5	4	3	2	1	75	3	3	2	2	3	1	115	1	5	3	4	2	1								
36	1	3	3	1	2	1	76	2	4	3	5	3	0.5	116	2	4	2	5	3	1								
37	2	5	2	1	2	1	77	3	3	3	2	3	1	117	2	5	1	1	2	1								
38	1	5	3	1	2	1	78	3	5	5	2	4	1	118	2	3	3	1	3	1								
39	1	5	3	2	2	1	79	3	4	3	1	2	1	119	1	5	5	4	3	1								
40	1	4	3	2	3	1	80	3	2	3	5	3	1	120	3	5	5	2	4	1								

Reglas Difusas para transformadores											
Regla Nro.	I1	I3	I4	IETD	Peso	Regla Nro.	I1	I3	I4	IETD	Peso
1	3	5	5	5	1	16	2	2	1	2	1
2	3	4	4	4	1	17	1	3	1	2	1
3	3	5	4	4	0.5	18	1	3	2	2	1
4	3	3	3	3	1	19	1	5	3	3	1
5	3	5	3	4	1	20	1	2	1	1	1
6	3	4	3	4	0.5	21	3	2	3	3	0.5
7	3	3	2	3	1	22	3	4	5	4	1
8	3	4	2	3	1	23	3	3	5	4	1
9	2	4	3	3	0.5	24	3	1	3	2	1
10	2	4	2	3	1	25	3	1	2	2	0.5
11	2	4	3	3	1	26	2	1	2	2	0.5
12	2	3	1	2	1	27	2	1	1	2	0.5
13	2	4	1	3	1	28	3	1	5	4	1
14	2	5	4	4	1	29	3	1	1	2	0.5
15	1	4	2	2	1	30	1	1	1	1	1

### 3.3.4. Método de Implicación

Una vez definidas las reglas difusas del sistema, se procede a aplicar el denominado “Método de Implicación”, el cual trunca el conjunto difuso de la salida de cada una de las reglas, en un valor que está determinado por el resultado de la aplicación de las reglas difusas para cada caso [13]. Existen dos tipos de métodos de implicación, el método Y min (mínimo) y el PROD (producto); en este caso se aplicará el método Y.

Para mejor comprensión de lo explicado anteriormente, en la figura 3.15 se muestra una captura de pantalla del resultado de la aplicación del método de implicación Y (mínimo) a las entradas del sistema difuso desarrollado. Los resultados de la aplicación del método de implicación para diez reglas del sistema difuso propuesto, corresponden a las gráficas que se encuentran al final de cada regla difusa, las mismas que son una composición de las entradas difusas (índices) de acuerdo a la lógica aplicada de acuerdo al método de implicación utilizado.

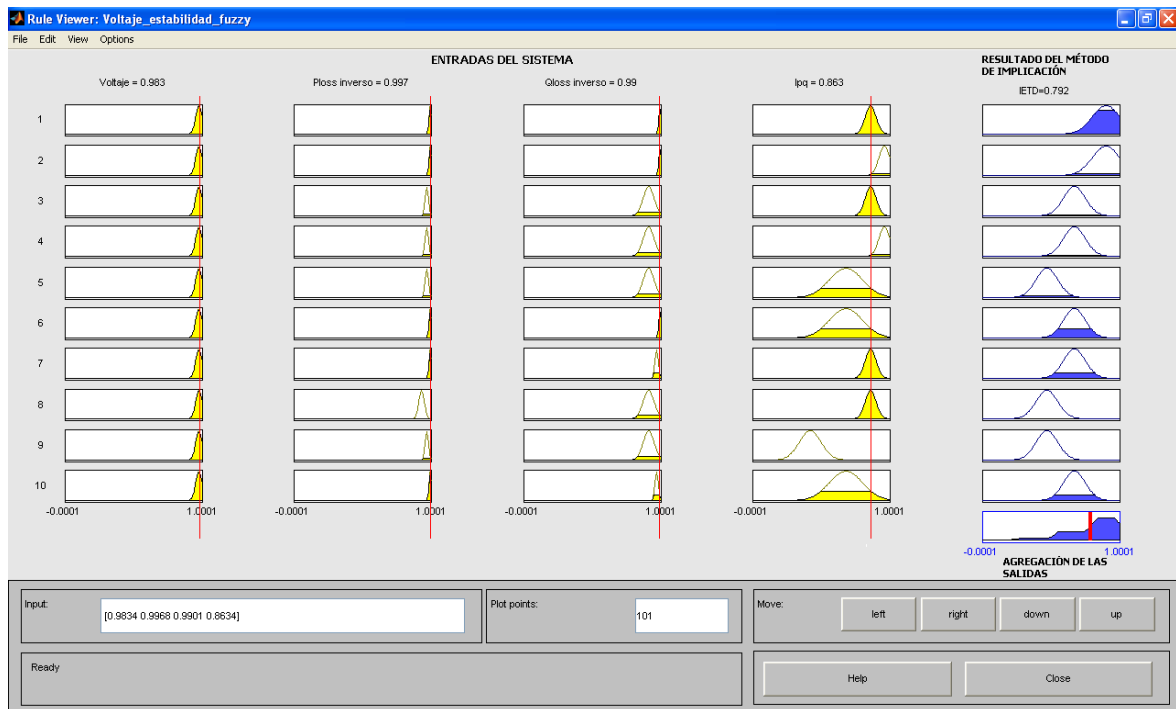


Fig. 3.15- Captura de pantalla del Sistema de Inferencia Difuso desarrollado.

Por tanto, luego de la aplicación del método de implicación escogido, lo que tenemos como resultado es un conjunto difuso para cada una de las reglas difusas propuestas en la Tabla 3.2.

### 3.3.5. Agregación de las salidas

La agregación de las salidas es el proceso mediante el cual, los conjuntos difusos que representan las salidas de cada una de las reglas difusas son combinados en un solo conjunto difuso total. La salida del proceso de agregación es un solo conjunto difuso por cada variable de salida del sistema. Existen tres métodos de agregación: MAX (máximo), PROBOR (probabilístico OR) y SUM (suma de las salidas de cada regla difusa); en este caso se aplicará el método MAX. Para mejor comprensión de este proceso, en la figura 3.15 se muestra el conjunto difuso resultado de la agregación de las salidas correspondiente a diez reglas del sistema difuso propuesto, para un conjunto de valores de entradas establecidos como ejemplo.



Cabe indicar que, como resultado del proceso de agregación de las salidas, para cada combinación de entradas del sistema (índices) se tiene un solo conjunto difuso, el cual posteriormente tendrá que arrojar un solo valor de índice difuso de estabilidad de tensión.

### 3.3.6. Proceso de Defusificación

En el proceso de *Defusificación*, la entrada es un conjunto difuso (el resultado de la agregación de salidas) y la salida es un número simple; por tanto es el proceso por medio del cual se obtiene un número entero teniendo como entrada un conjunto difuso [13]. En el sistema desarrollado se ha utilizado el método de cálculo del **centroide**, el mismo que proporciona como resultado el centro del área bajo la curva dibujada por el conjunto difuso de la entrada; esto se puede apreciar en la figura 3.15. La línea roja ubicada dentro del conjunto difuso, producto de la agregación de las salidas, indica el resultado del cálculo del centro del área bajo la curva resultante, el mismo que para el ejemplo propuesto es:  $I_{ETD}=0.792$ .

Una vez realizado el proceso de *Defusificación*, la salida del sistema se define como el “**índice difuso de estabilidad de tensión**”, el cual se obtiene para cada uno de los elementos del sistema de potencia en análisis. Posteriormente, se realiza una clasificación en orden ascendente de los índices arrojados por el sistema difuso, de tal forma que se obtiene una lista con los valores de los índices de estabilidad calculados para cada elemento del sistema (desde el elemento más débil hasta el más robusto). Esto permitirá detectar por simple inspección, los elementos del sistema en los cuales se han presentado los menores valores del índice (valores más cercanos o iguales a cero) y por tanto que son más débiles desde el punto de vista de la estabilidad de tensión.

Para validar la metodología propuesta y los resultados obtenidos a través del nuevo índice difuso de estabilidad de tensión ( $I_{ETD}$ ), se comparará dichos resultados con los márgenes de cargabilidad obtenidos a través del método de continuación de flujo de potencia (CPF) para los sistemas en estudio, puesto que esta metodología es la referencia más adecuada para garantizar la idoneidad y la eficiencia del nuevo índice propuesto.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS

#### 4.1. Consideraciones Generales

En este capítulo se presentan los resultados correspondientes a las simulaciones realizadas en los sistemas de prueba: IEEE 14 barras, IEEE 30 barras y IEEE 118 barras. Las pruebas tienen como objetivo validar el sistema de inferencia difuso desarrollado y observar el comportamiento del nuevo índice de estabilidad de tensión difuso ( $I_{ETD}$ ) ante distintos esquemas de transmisión y para condiciones crecientes de carga en la detección eficiente de líneas críticas (clasificación de contingencias) y vulnerables con respecto a la estabilidad de tensión.

Cabe indicar que, la clasificación de contingencias es una actividad ampliamente realizada en el campo de la estabilidad de tensión, para la localización de elementos críticos de un sistema eléctrico, y básicamente consiste en realizar un ordenamiento por orden de criticidad (de mayor a menor) en base a los resultados obtenidos, en este caso, a través del índice difuso propuesto. Esto significa que la línea que obtenga el menor valor del  $I_{ETD}$  (valor más cercano a cero) se encontrará en el máximo nivel de criticidad y así sucesivamente. Las líneas del sistema que se encuentren encabezando la clasificación por contingencias son los elementos cuya salida de operación (especialmente en altos niveles de carga) muy probablemente ocasione inestabilidad de tensión y consecuentemente el colapso del sistema eléctrico. Posteriormente, el operador tendrá que tomar medidas de control adecuadas ante la ocurrencia de alguna de estas contingencias, o ante la presunción de que alguna tenga alguna probabilidad alta de ocurrencia.

De forma general el programa desarrollado realiza el siguiente proceso:

1. Cálculo de los índices de estabilidad de tensión propuestos como entradas del sistema difuso (Voltajes, Pérdidas de potencia activa, Pérdidas de potencia reactiva e Índice basado en flujos de potencia activa y reactiva  $I_{pq}$ ) para condiciones de incremento continuo del nivel de carga (desde  $\lambda=1$  hasta  $\lambda=\lambda_{\text{critico}}$ ). Para realizar este subproceso se utilizó el interfaz entre PSAT y UWPFLOW.
2. Normalización de los índices a valores entre 0 y 1 para poder crear los conjuntos difusos correspondientes.
3. Proceso de fusificación, es decir creación de las funciones de pertenencia para cada una de las entradas del sistema. Este proceso se lo ha realizado para tres tipos de funciones de pertenencia: triangular, trapezoidal y gaussiana.
4. Determinación de los niveles lingüísticos y sus límites.
5. Agregación de las reglas difusas que regirán al sistema y los “pesos” asignados a cada una de ellas

6. Clasificación por contingencias de las entradas del sistema (índices de estabilidad de tensión).
7. Cálculo del índice de estabilidad de tensión difuso ( $I_{ETD}$ ), a través del método de implicación, agregación de las salidas y posterior defusificación (procesos descritos en el Capítulo IV).
8. Clasificación por contingencias de las líneas del sistema por su nivel de criticidad (de mayor a menor), establecido a través del nuevo índice difuso de estabilidad de tensión propuesto; proceso a partir del cual se determina los elementos más débiles del sistema respecto a la estabilidad de tensión. El análisis al igual que con los índices considerados como entrada del sistema, se realiza para condiciones de crecimiento continuo del nivel de carga, con la finalidad de determinar el comportamiento del índice propuesto.

En primera instancia se realizará un análisis de los resultados obtenidos a través del índice difuso  $I_{ETD}$  en el sistema IEEE 14 barras para los tres tipos de funciones de pertenencia escogidos (triangular, trapezoidal y gaussiana), de tal forma que se puedan apreciar las diferencias, ventajas y desventajas de cada uno de ellos.

#### 4.2. Sistema IEEE 14 barras

El sistema de prueba IEEE 14 barras consta de 11 nodos de carga, 4 nodos de tensión controlada, el nodo de balance (nodo slack) alimentado por dos generadores, 3 condensadores síncronos y 20 elementos de transmisión (17 líneas y 3 transformadores de potencia), los cuales se interconectan como se muestra en la siguiente figura:

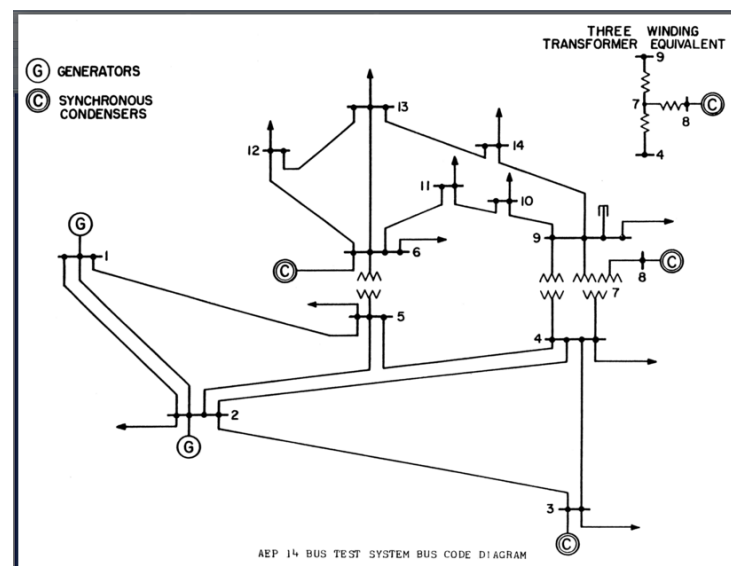
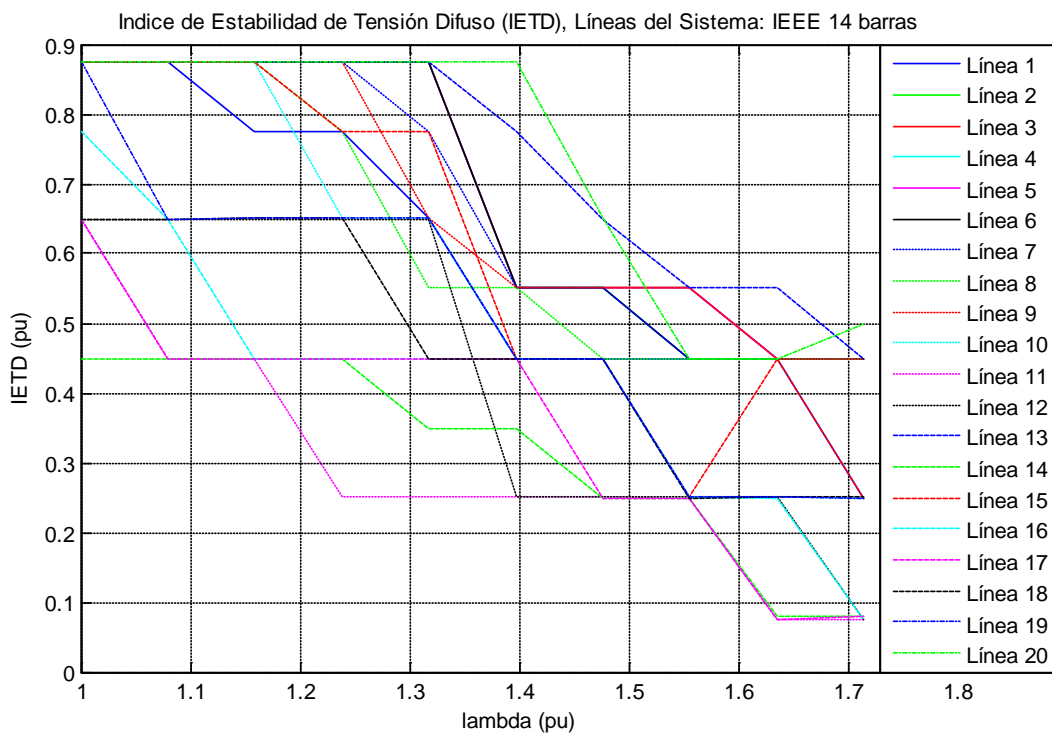


Fig. 4.1- Sistema IEEE 14 barras [18].

#### 4.2.1. Análisis del Sistema IEEE 14 barras a través del $I_{ETD}$ obtenido mediante funciones de pertenencia tipo Triangular

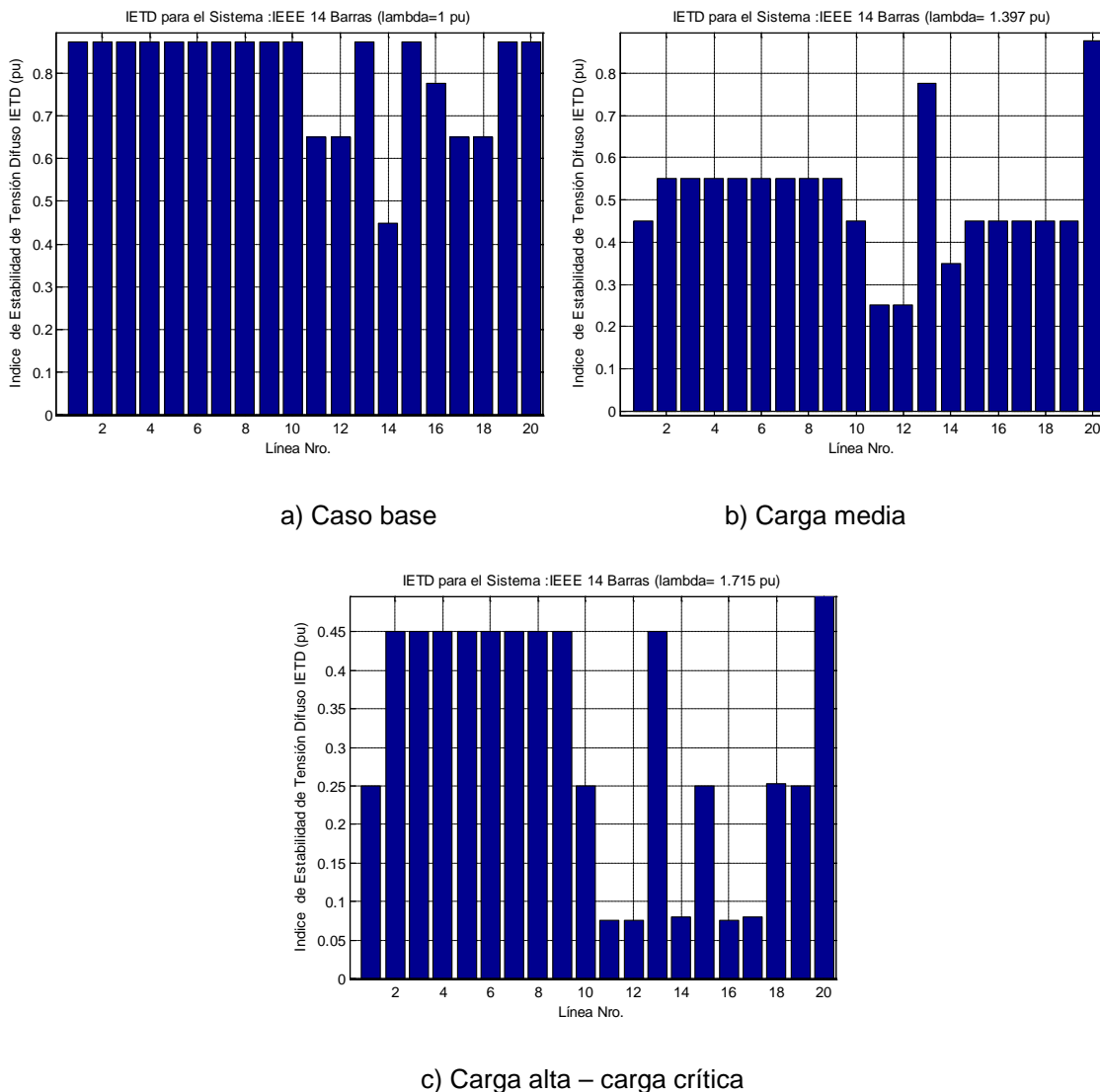
En la figura 3.12 del Capítulo anterior se muestran las funciones de pertenencia tipo triangular para los índices que son las entradas del sistema y también para la salida (índice de estabilidad de tensión propuesto), así como también los niveles lingüísticos definidos y los límites definidos para cada uno de los indicadores.

De forma general, el comportamiento y tendencia del  $I_{ETD}$  obtenido para todos los elementos que conforman el sistema IEEE 14 barras se muestra en la figura 4.2. Si bien la gráfica no muestra un comportamiento monotónicamente decreciente, se puede apreciar que el valor del índice disminuye conforme se alcanza los niveles cercanos al valor crítico de carga; sin embargo dicha disminución se realiza de forma escalonada y no gradual.



**Fig. 4.2-** Comportamiento del índice de estabilidad de tensión  $I_{ETD}$  para funciones de pertenencia tipo triangular.

Para apreciar de mejor forma los valores alcanzados por el índice propuesto en cada una de las líneas del sistema en análisis, a continuación se muestran los diagramas de barras correspondientes al  $I_{ETD}$  en tres de los niveles de carga analizados (caso base, carga media y carga crítica).



**Fig. 4.3** Índice de estabilidad de tensión  $I_{ETD}$  del sistema IEEE 14 barras en tres niveles de carga (caso base, carga media y carga crítica), para funciones de pertenencia tipo triangular.

Como se puede observar, en muchos casos el valor del índice difuso es el mismo para varias líneas del sistema, esto se debe básicamente a que, el proceso de agregación de las salidas, producto de entradas cuyas funciones de pertenencia son de tipo triangular, siempre generan como resultado un conjunto difuso similar (ver figura 4.6), los cuales luego del proceso de defusificación arrojan un mismo valor. Si bien, los resultados obtenidos a través de este método nos permiten detectar de forma general las líneas más débiles, al mismo tiempo nos impide hacer una diferenciación del grado de debilidad presentado por una u otra área del sistema.

Finalmente, en la Tabla 4.1 se muestran los resultados correspondientes al sistema IEEE de 14 barras y 20 líneas, obtenidos a través del índice difuso de estabilidad de tensión para funciones de pertenencia tipo triangular, los mismos que se han ordenado por orden de criticidad (de mayor a menor) en todos los

niveles de carga simulados, esto significa que, el elemento clasificado con el número 1 es el elemento más crítico del sistema respecto de la estabilidad de tensión y así sucesivamente. Adicionalmente, en la última columna se colocó la clasificación obtenida a través del margen de cargabilidad, con la finalidad de comparar los resultados y observar el comportamiento del índice difuso.

**Tabla 4.1:** Resultados del Sistema IEEE 14 barras obtenidos a través del índice  $I_{ETD}$ , para funciones de pertenencia tipo triangular.

Resultados obtenidos a través del Índice de Estabilidad de Tensión Difuso (IETD), función de pertenencia tipo Triangular, Sistema IEEE 14 barras																					
Clasificación	$\lambda=1$		$\lambda=1.079$		$\lambda=1.159$		$\lambda=1.238$		$\lambda=1.318$		$\lambda=1.397$		$\lambda=1.476$		$\lambda=1.556$		$\lambda=1.635$		$\lambda=1.715$		Resultado Esperado - (Margen de Cargabilidad)
	Línea	IETD	Línea	IETD	Línea	IETD	Línea	IETD	Línea	IETD	Línea	IETD	Línea	IETD	Línea	IETD	Línea	IETD	Línea	IETD	
1	14	0.450	11	0.450	11	0.450	11	0.250	11	0.250	11	0.250	17	0.250	10	0.250	17	0.075	11	0.075	11
2	12	0.650	14	0.450	14	0.450	16	0.450	14	0.350	12	0.251	14	0.250	18	0.250	11	0.075	12	0.075	12
3	11	0.650	17	0.450	17	0.450	14	0.450	16	0.450	14	0.350	11	0.250	14	0.250	14	0.080	16	0.075	17
4	18	0.650	12	0.650	16	0.450	17	0.450	18	0.450	15	0.450	12	0.251	17	0.250	16	0.250	14	0.080	14
5	17	0.650	19	0.650	12	0.650	12	0.650	17	0.450	16	0.450	18	0.450	11	0.250	19	0.250	17	0.080	10
6	16	0.775	16	0.650	19	0.650	10	0.650	8	0.550	10	0.450	1	0.450	19	0.250	18	0.250	1	0.250	16
7	2	0.874	18	0.650	18	0.650	19	0.650	12	0.650	17	0.450	8	0.450	15	0.250	10	0.250	19	0.250	19
8	3	0.874	2	0.874	1	0.775	18	0.650	19	0.650	1	0.450	10	0.450	16	0.250	12	0.251	15	0.250	15
9	4	0.874	3	0.874	2	0.874	8	0.775	1	0.650	19	0.450	15	0.450	12	0.251	1	0.450	10	0.250	1
10	5	0.874	4	0.874	3	0.874	1	0.775	9	0.650	18	0.450	16	0.450	20	0.450	3	0.450	18	0.252	8
11	6	0.874	5	0.874	4	0.874	15	0.775	10	0.650	9	0.550	19	0.450	6	0.450	15	0.450	3	0.450	4
12	7	0.874	6	0.874	5	0.874	13	0.874	15	0.775	4	0.550	4	0.550	4	0.450	7	0.450	4	0.450	20
13	8	0.874	7	0.874	6	0.874	20	0.874	7	0.776	8	0.550	2	0.550	7	0.450	4	0.450	6	0.450	18
14	9	0.874	9	0.874	9	0.874	7	0.875	13	0.874	5	0.550	5	0.550	8	0.450	5	0.450	13	0.450	13
15	10	0.874	10	0.874	13	0.874	3	0.875	20	0.874	6	0.550	6	0.550	1	0.450	2	0.450	8	0.450	7
16	13	0.874	13	0.874	20	0.874	9	0.875	3	0.875	7	0.550	7	0.550	9	0.550	20	0.450	5	0.450	9
17	20	0.874	20	0.874	10	0.875	2	0.875	2	0.875	2	0.550	3	0.550	2	0.550	6	0.450	9	0.450	5
18	1	0.875	1	0.875	7	0.875	5	0.875	5	0.875	3	0.550	9	0.550	13	0.550	8	0.450	7	0.450	2
19	15	0.875	8	0.875	8	0.875	6	0.875	4	0.875	13	0.776	13	0.650	5	0.550	9	0.450	2	0.450	6
20	19	0.875	15	0.875	15	0.875	4	0.875	6	0.875	20	0.875	20	0.650	3	0.550	13	0.550	20	0.500	3

En forma general, las líneas más débiles que arroja el análisis realizado a través del índice difuso de estabilidad de tensión, obtenido a partir de funciones de pertenencia triangulares son las siguientes:

**Tabla 4.2:** Áreas débiles del sistema IEEE 14 barras obtenidas a través del  $I_{ETD}$  (funciones de pertenencia triangular)

Áreas débiles sistema IEEE 14 barras obtenidas a través de funciones de pertenencia tipo triangular			
Clasificación por nivel de criticidad	Línea	Barra i	Barra j
1	11	1	2
2	14	1	5
3	12	3	2
4	17	5	6
5	16	2	4
6	18	4	9
7	19	4	7
8	10	7	9
9	1	2	5
10	15	5	4

Respecto a los resultados obtenidos en esta simulación, se pueden hacer varias consideraciones:

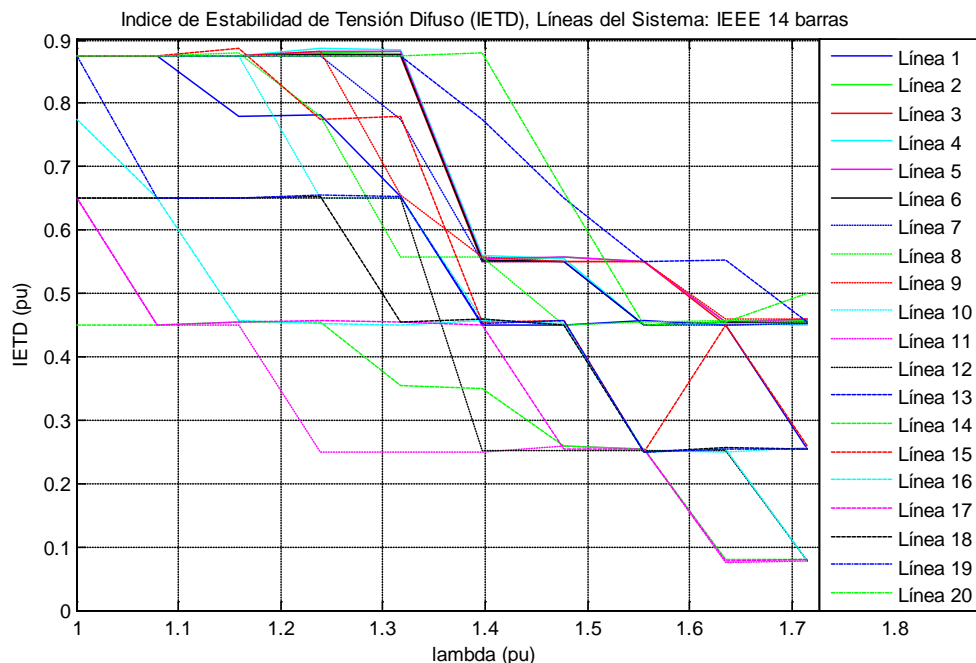
- La clasificación por nivel de severidad muestra que, existen líneas del sistema que para todos los niveles de carga analizados se encuentran en los primeros lugares de la clasificación y que por tanto indican mayor debilidad respecto a la estabilidad de tensión, líneas que en términos

generales coinciden (no en el estricto orden) con las obtenidas a través del margen de cargabilidad.

- De las 10 líneas más críticas, obtenidas a través del  $I_{ETD}$ , en promedio el 75% coinciden con aquellas obtenidas usando el margen de cargabilidad.
- De forma general, el análisis realizado a través del índice  $I_{ETD}$  obtenido mediante funciones de pertenencia triangulares nos da una idea apropiada de las líneas que presentan mayor debilidad respecto a la estabilidad de tensión.
- No es posible realizar una clara diferenciación de las áreas más débiles del sistema debido a que, en muchos casos, el índice presenta el mismo valor para varias líneas, lo cual desvirtúa la precisión requerida en este tipo de análisis.

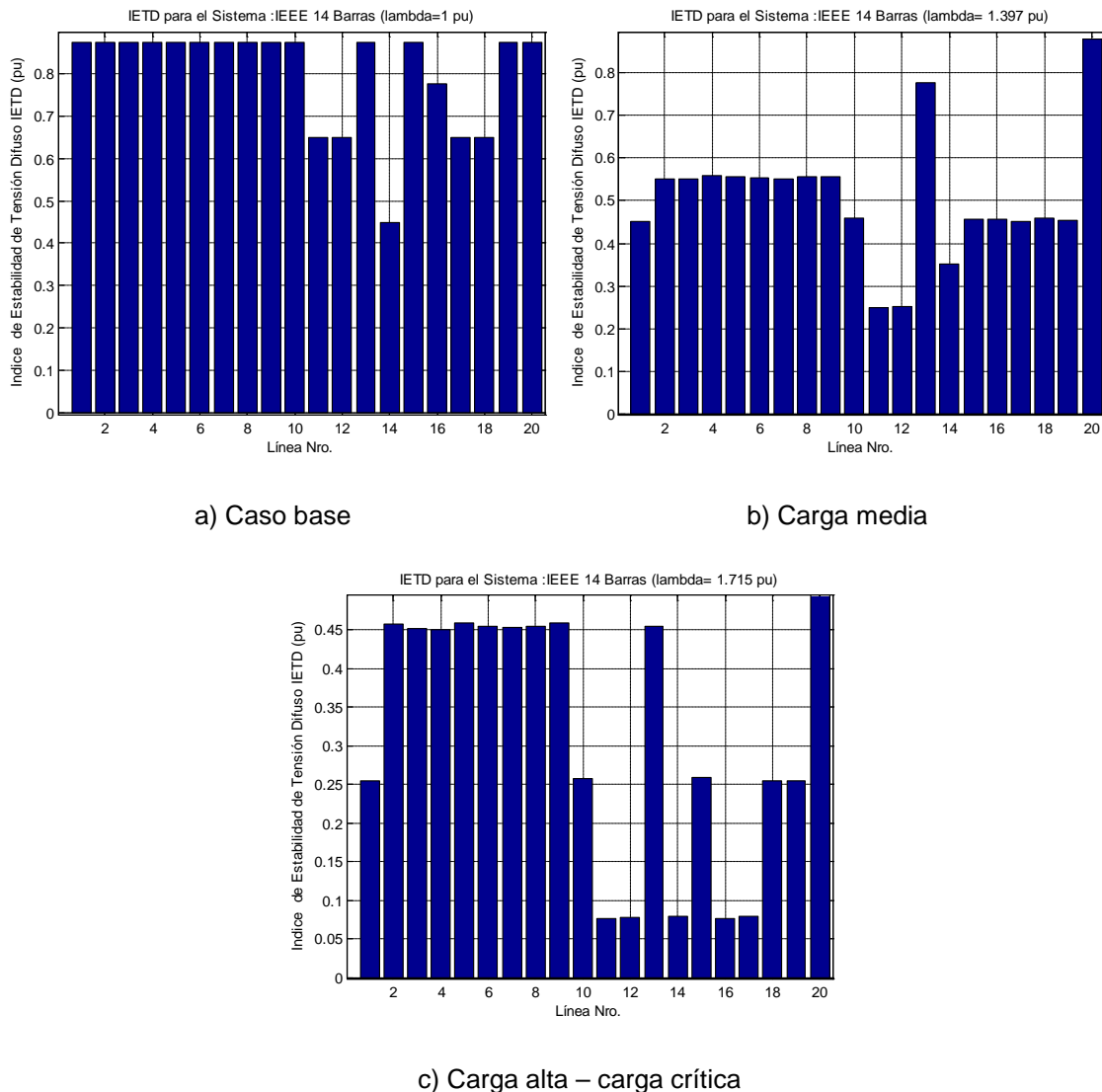
#### 4.2.2. Análisis del Sistema IEEE 14 barras a través del $I_{ETD}$ obtenido mediante funciones de pertenencia tipo Trapezoidal

De igual forma que para el caso anterior, en la figura 3.13 se muestran las funciones de pertenencia tipo trapezoidal definidas para los índices del sistema difuso. La simulación realizada para la obtención del índice difuso  $I_{ETD}$  definido a través de funciones de pertenencia tipo trapezoidal, permite la obtención de los resultados mostrados en la figura 4.4. En esta figura se observa el comportamiento del índice difuso desde el caso base hasta el valor de carga crítica, el cual, como se puede apreciar es muy similar al obtenido a través de la función de pertenencia triangular, es decir, las disminuciones del índice difuso ante incrementos del nivel de carga, se producen a través de pasos.



**Fig. 4.4** Comportamiento del índice de estabilidad de tensión  $I_{ETD}$  para funciones de pertenencia tipo trapezoidal.

Los diagramas de barras con los valores del índice  $I_{ETD}$  obtenidos para los tres niveles de carga de referencia se muestran en la figura 4.5.



**Fig. 4.5** Índice de estabilidad de tensión  $I_{ETD}$  del sistema IEEE 14 barras en tres niveles de carga: caso base, carga media y carga crítica, para funciones de pertenencia tipo trapezoidal.

Los diagramas de barras mostrados nos permiten determinar por simple inspección las líneas del sistema que presentan mayor debilidad, en los tres niveles de carga mostrados. Los valores obtenidos en los 10 niveles de carga analizados y la clasificación por nivel de criticidad para cada elemento del sistema de transmisión se muestran en la Tabla 4.3.



**Tabla 4.3:** Resultados del Sistema IEEE 14 barras obtenidos a través del índice  $I_{ETD}$ , para funciones de pertenencia tipo trapezoidal.

Resultados obtenidos a través del Índice de Estabilidad de Tensión Difuso (IETD), función de pertenencia tipo Trapezoidal, Sistema IEEE 14 barras																					
Clasificación	$\lambda=1$		$\lambda=1.079$		$\lambda=1.159$		$\lambda=1.238$		$\lambda=1.318$		$\lambda=1.397$		$\lambda=1.476$		$\lambda=1.556$		$\lambda=1.635$		$\lambda=1.715$		Resultado Esperado - (Margen de Cargabilidad)
	Línea	IETD	Línea	IETD	Línea	IETD	Línea	IETD	Línea	IETD	Línea	IETD	Línea	IETD	Línea	IETD	Línea	IETD	Línea	IETD	
1	14	0.450	11	0.450	11	0.450	11	0.250	11	0.250	11	0.250	12	0.251	18	0.250	11	0.075	11	0.077	11
2	12	0.650	14	0.450	14	0.454	16	0.452	14	0.354	12	0.251	17	0.254	19	0.250	17	0.077	16	0.077	12
3	11	0.650	17	0.450	17	0.454	14	0.454	16	0.450	14	0.351	11	0.259	15	0.250	14	0.080	12	0.079	17
4	18	0.650	12	0.650	16	0.457	17	0.457	18	0.454	1	0.451	14	0.259	16	0.250	10	0.250	14	0.080	14
5	17	0.650	19	0.650	12	0.650	12	0.650	17	0.455	17	0.451	1	0.450	12	0.251	12	0.251	17	0.080	10
6	16	0.776	16	0.650	19	0.650	10	0.651	8	0.557	19	0.453	18	0.450	10	0.253	16	0.253	19	0.255	16
7	2	0.875	18	0.650	18	0.651	18	0.653	12	0.650	15	0.456	10	0.451	17	0.254	19	0.254	1	0.255	19
8	3	0.875	2	0.875	1	0.779	19	0.654	10	0.650	16	0.458	8	0.451	11	0.255	18	0.257	18	0.255	15
9	4	0.875	3	0.875	2	0.875	15	0.775	1	0.652	10	0.459	16	0.453	14	0.255	15	0.450	10	0.257	1
10	5	0.875	4	0.875	3	0.875	8	0.779	19	0.653	18	0.459	19	0.457	20	0.450	3	0.450	15	0.259	8
11	6	0.875	5	0.875	4	0.875	1	0.782	9	0.656	3	0.550	15	0.457	7	0.450	1	0.451	4	0.450	4
12	7	0.875	6	0.875	5	0.875	13	0.875	7	0.776	2	0.550	3	0.550	4	0.450	7	0.451	3	0.452	20
13	8	0.875	7	0.875	6	0.875	20	0.875	15	0.779	7	0.550	6	0.550	6	0.450	4	0.453	7	0.454	18
14	9	0.875	9	0.875	9	0.875	7	0.875	13	0.875	6	0.552	7	0.550	8	0.455	6	0.454	13	0.455	13
15	10	0.875	10	0.875	13	0.875	3	0.875	20	0.875	5	0.556	9	0.551	1	0.456	20	0.454	6	0.455	7
16	13	0.875	13	0.875	20	0.875	6	0.878	3	0.875	8	0.556	4	0.556	13	0.550	2	0.455	8	0.455	9
17	20	0.875	20	0.875	10	0.875	2	0.879	6	0.878	9	0.556	2	0.557	3	0.550	5	0.456	2	0.458	5
18	1	0.875	1	0.875	7	0.875	9	0.882	2	0.882	4	0.559	5	0.558	2	0.550	8	0.457	9	0.459	2
19	15	0.875	8	0.875	8	0.881	5	0.882	5	0.883	13	0.776	13	0.650	9	0.551	9	0.459	5	0.459	6
20	19	0.875	15	0.875	15	0.886	4	0.886	4	0.886	20	0.879	20	0.659	5	0.551	13	0.554	20	0.500	3

Al igual que en el caso anterior, los elementos del sistema que presentan mayor grado de criticidad respecto a la estabilidad de tensión, coinciden en gran parte con la referencia obtenida a través de los márgenes de cargabilidad, sin que el orden coincida exactamente. Como promedio general de los resultados obtenidos en los 10 niveles de carga analizados, se tiene que, el 82% de las líneas críticas detectadas a través del índice  $I_{ETD}$  coinciden con las obtenidas con el margen de cargabilidad.

Sin embargo, en este caso también se presentan elementos con valores iguales del índice  $I_{ETD}$ , lo cual dificulta la diferenciación del grado de criticidad de cada una de ellas; si bien las repeticiones no se presentan en la magnitud del caso previo (función de pertenencia triangular) no es menos cierto que, este aspecto representa una limitante en los análisis de grandes sistemas de potencia. Las líneas o elementos más débiles de acuerdo a estos resultados son los siguientes:

**Tabla 4.4:** Áreas débiles del sistema IEEE 14 barras obtenidas a través del  $I_{ETD}$  (funciones de pertenencia trapezoidal)

Áreas débiles sistema IEEE 14 barras obtenidas a través del Índice de Estabilidad de Tensión Difuso (funciones de pertenencia tipo trapezoidal)			
Clasificación por nivel de criticidad	Línea	Barra i	Barra j
1	11	1	2
2	14	1	5
3	17	5	6
4	16	2	4
5	12	3	2
6	19	4	7
7	10	7	9
8	18	4	9
9	15	5	4
10	1	2	5

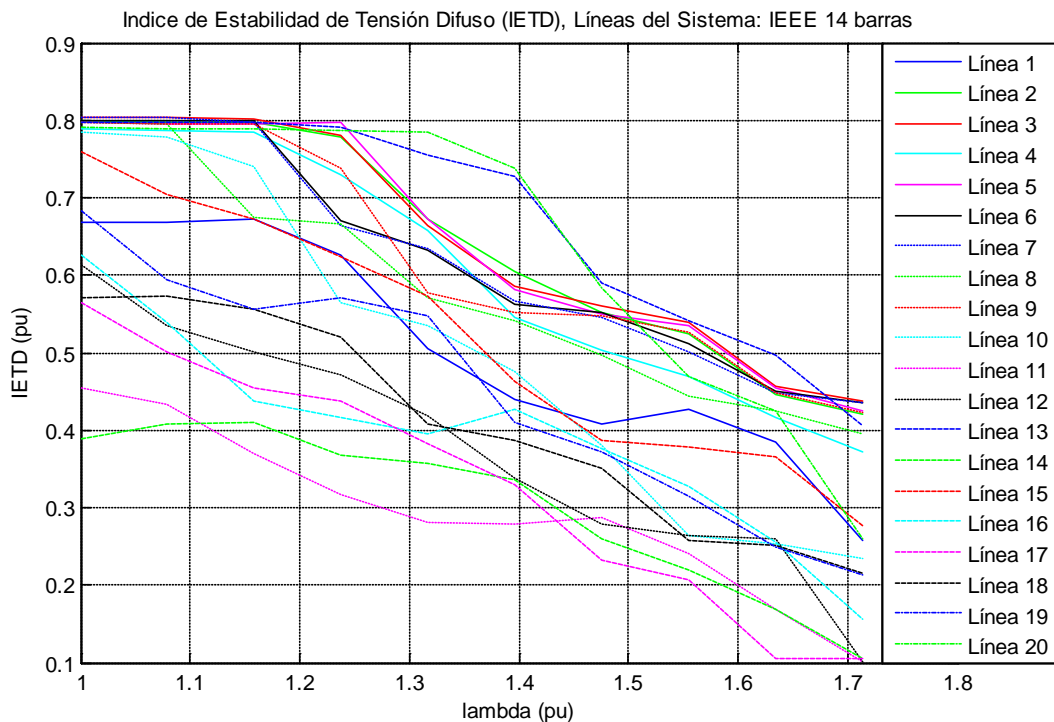
Cabe indicar que prácticamente en todos los niveles de carga analizados, se presentan como críticas, las líneas indicadas en la tabla anterior, esto confirma que el índice mantiene un nivel tendencial estable desde el caso base hasta el valor de carga crítica.

#### 4.2.3. Análisis del Sistema IEEE 14 barras a través del $I_{ETD}$ obtenido mediante funciones de pertenencia tipo Gaussiana

En la figura 3.14 se muestra el comportamiento del índice de estabilidad de tensión difuso obtenido mediante funciones de pertenencia tipo gaussiana para todos los niveles de carga simulados, esto es desde el caso base ( $\lambda=1$ ) hasta el nivel de carga crítica ( $\lambda= \lambda_{\text{crítico}}$ ); la tendencia continua decreciente obtenida en todos los elementos del sistema concuerda con los resultados tendenciales esperados para cualquier índice eficiente de estabilidad de tensión.

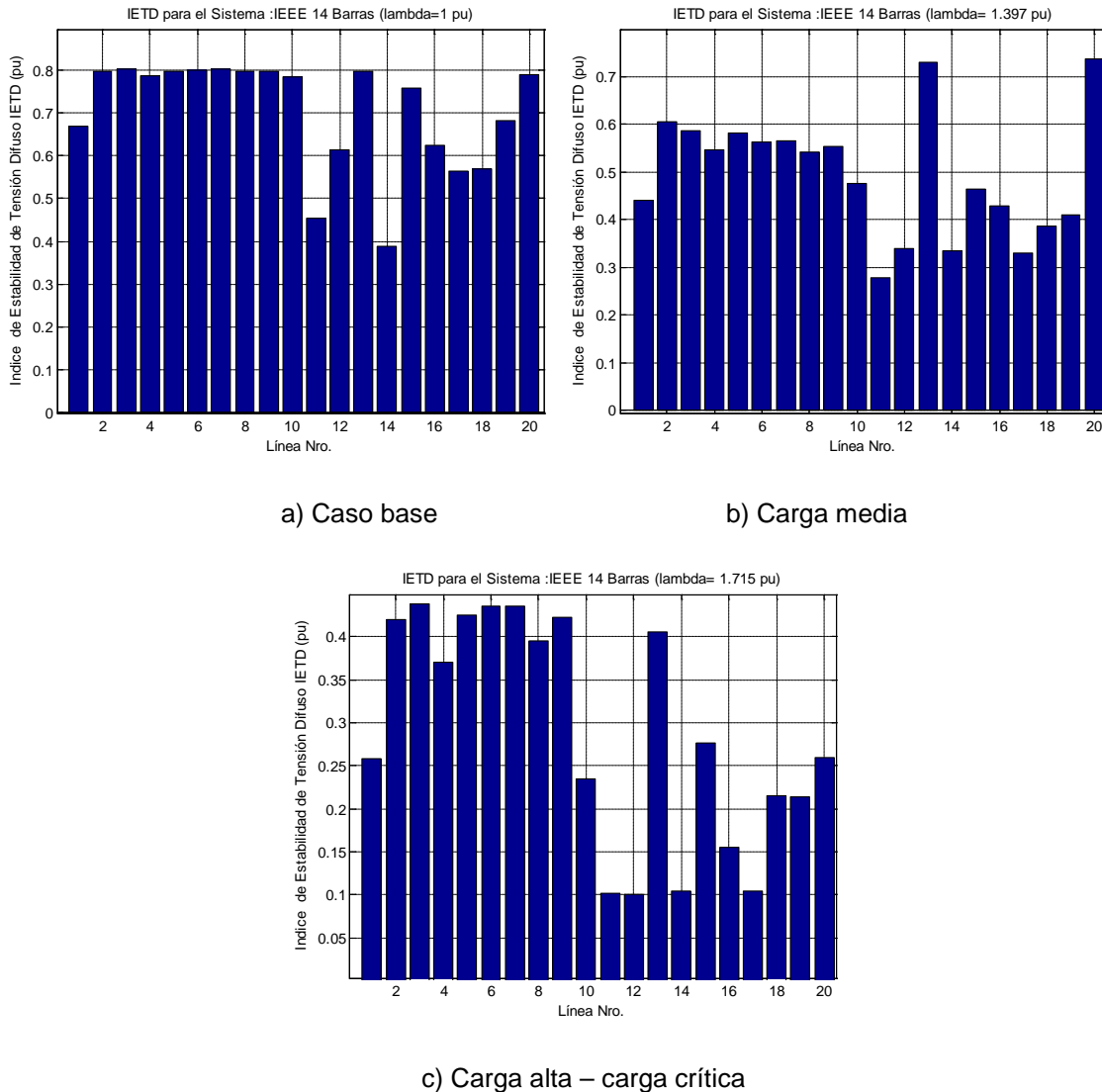
Se puede observar que, desde el caso base existen líneas que presentan valores del índice  $I_{ETD}$  relativamente bajos y que obviamente al acercarse al nivel de carga crítica se acercan a cero, lo cual muestra un adecuado comportamiento desde bajos niveles de carga.

En general, se observa claramente las líneas cuyos valores de  $I_{ETD}$  se acercan a cero, las mismas que desde el nivel de carga base presentan los menores valores del índice, esto permite distinguir con mucha certeza los elementos débiles del sistema respecto de la estabilidad de tensión.



**Fig. 4.6-** Comportamiento del índice de estabilidad de tensión  $I_{ETD}$  para funciones de pertenencia tipo gaussiana.

Se presentan a continuación los diagramas de barra para todos los elementos del sistema; de esta forma es muy simple detectar las líneas que presentan los menores valores del índice en los tres niveles de carga mostrados.



**Fig. 4.7** Índice de estabilidad de tensión  $I_{ETD}$  del sistema IEEE 14 barras en tres niveles de carga (caso base, carga media y carga alta-crítica), para funciones de pertenencia tipo gaussiana

La clasificación de contingencias por nivel de criticidad con los respectivos valores del índice difuso de estabilidad de tensión  $I_{ETD}$  obtenidos para cada elemento del sistema IEEE 14 barras, mediante funciones de pertenencia tipo gaussiana, en los 10 niveles de carga analizados son presentados en la Tabla 4.5.

**Tabla 4.5:** Resultados del Sistema IEEE 14 barras obtenidos a través del índice  $I_{ETD}$ , para funciones de pertenencia tipo gaussiana

Resultados obtenidos a través del Índice de Estabilidad de Tensión Difuso (IETD), función de pertenencia tipo Gaussiana, Sistema IEEE 14 barras																					
Clasificación	$\lambda=1$		$\lambda=1.079$		$\lambda=1.159$		$\lambda=1.238$		$\lambda=1.318$		$\lambda=1.397$		$\lambda=1.476$		$\lambda=1.556$		$\lambda=1.635$		$\lambda=1.715$		Resultado Esperado - (Margen de Cargabilidad)
	Línea	IETD	Línea	IETD	Línea	IETD	Línea	IETD	Línea	IETD	Línea	IETD	Línea	IETD	Línea	IETD	Línea	IETD	Línea	IETD	
1	14	0.389	14	0.409	11	0.370	11	0.317	11	0.281	11	0.278	17	0.231	17	0.206	17	0.106	12	0.101	11
2	11	0.454	11	0.434	14	0.411	14	0.367	14	0.357	17	0.330	14	0.261	14	0.219	11	0.169	11	0.102	12
3	17	0.564	17	0.500	16	0.437	16	0.417	17	0.383	14	0.335	12	0.280	11	0.242	14	0.170	17	0.105	17
4	18	0.570	12	0.535	17	0.454	17	0.437	16	0.394	12	0.338	11	0.288	18	0.258	19	0.250	14	0.105	14
5	12	0.613	16	0.539	12	0.500	12	0.471	18	0.408	18	0.386	18	0.350	10	0.263	18	0.250	16	0.155	10
6	16	0.625	18	0.574	18	0.556	18	0.520	12	0.418	19	0.410	19	0.372	12	0.265	10	0.254	19	0.214	16
7	1	0.668	19	0.594	19	0.557	10	0.564	1	0.505	16	0.428	16	0.377	19	0.315	16	0.256	18	0.215	19
8	19	0.683	1	0.668	1	0.672	19	0.572	10	0.535	1	0.441	10	0.380	16	0.328	12	0.259	10	0.235	15
9	15	0.759	15	0.705	15	0.673	15	0.625	19	0.548	15	0.464	15	0.387	15	0.378	15	0.366	1	0.259	1
10	10	0.785	10	0.779	8	0.675	1	0.626	8	0.572	10	0.476	1	0.408	1	0.428	1	0.384	20	0.260	8
11	4	0.788	4	0.787	10	0.740	7	0.665	15	0.573	8	0.541	8	0.498	8	0.443	4	0.416	15	0.276	4
12	20	0.790	20	0.790	4	0.785	8	0.667	9	0.577	4	0.547	4	0.502	4	0.468	20	0.424	4	0.371	20
13	5	0.796	5	0.795	20	0.788	6	0.671	6	0.633	9	0.552	7	0.545	20	0.470	8	0.425	8	0.395	18
14	13	0.797	8	0.795	5	0.794	4	0.730	7	0.634	6	0.563	9	0.548	7	0.502	2	0.446	13	0.406	13
15	9	0.798	9	0.796	9	0.796	9	0.737	4	0.657	7	0.566	5	0.550	6	0.512	7	0.448	2	0.421	7
16	8	0.798	13	0.797	13	0.797	2	0.778	3	0.664	5	0.581	6	0.551	2	0.524	9	0.449	9	0.423	9
17	2	0.799	2	0.798	2	0.797	3	0.781	2	0.673	3	0.587	2	0.551	9	0.527	6	0.449	5	0.426	5
18	6	0.800	6	0.800	7	0.797	20	0.787	5	0.673	2	0.605	3	0.560	5	0.535	5	0.455	6	0.435	2
19	3	0.803	3	0.803	6	0.800	13	0.790	13	0.754	13	0.728	20	0.584	3	0.539	3	0.458	7	0.436	6
20	7	0.803	7	0.803	3	0.803	5	0.798	20	0.785	20	0.737	13	0.590	13	0.541	13	0.496	3	0.438	3

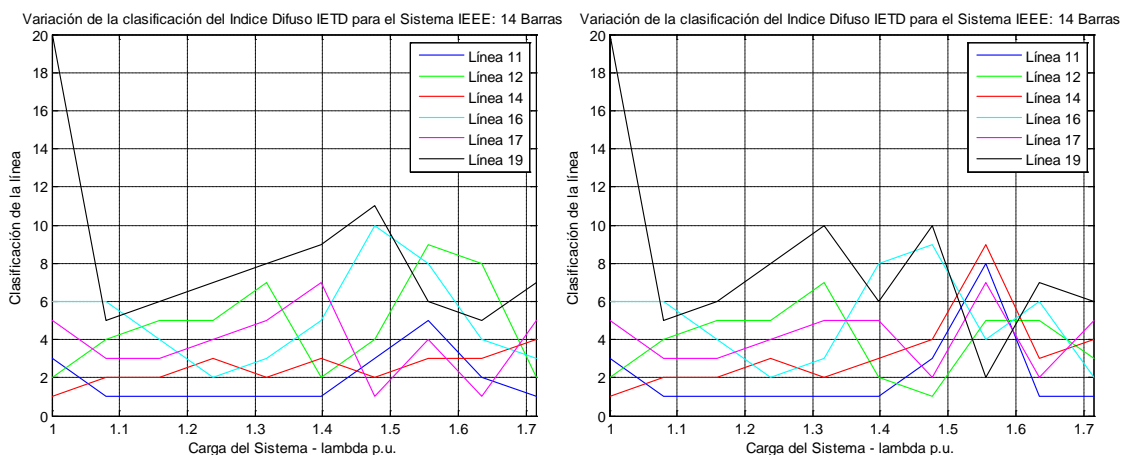
De los resultados mostrados se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- Al aplicarse la función de pertenencia tipo gaussiana a todos los índices del sistema de inferencia difuso realizado, se obtienen índices de estabilidad que permiten diferenciar con claridad los elementos críticos del sistema (aquellos que muestran los valores más bajos), presentándose muy pocos valores iguales para distintas líneas; lo cual representa una gran mejora en comparación con los análisis realizados para funciones de pertenencia triangular y trapezoidal.
- Para la gran mayoría de niveles de carga analizados, se repiten como los elementos más débiles del sistema los elementos: 11, 12, 17, 14, 16, 19 y 10, lo cual es totalmente corroborado con los resultados obtenidos a través del margen de cargabilidad. Cabe aclarar que la línea Nro. 10 aparece dentro de las líneas más débiles a partir de  $\lambda=1.476$  pu, es decir para niveles altos de carga. Las líneas más débiles detectadas para este sistema corresponden a la interconexión de los siguientes nodos:

**Tabla 4.6:** Áreas débiles del sistema IEEE 14 barras obtenidas a través del  $I_{ETD}$  (funciones de pertenencia gaussiana)

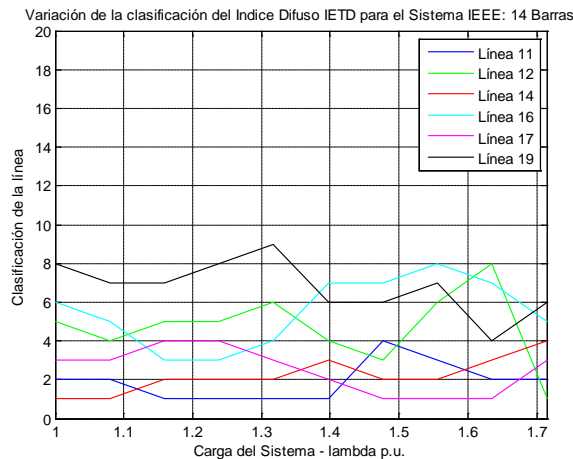
Áreas débiles sistema IEEE 14 barras obtenidas a través del Índice de Estabilidad de Tensión Difuso (funciones de pertenencia tipo gaussiana)			
Clasificación por nivel de criticidad	Línea	Barra i	Barra j
1	11	1	2
2	12	3	2
3	17	5	6
4	14	1	5
5	16	2	4
6	19	4	7
7	10	7	9
8	15	5	4
9	1	14	13
10	4	6	13

- Al analizar las líneas que resultan como las de mayor criticidad respecto a la estabilidad de tensión, podemos concluir que estas están relacionadas con las barras del sistema donde se interconectan la mayor cantidad de líneas de transmisión (barras: 1, 2, 4 y 5) y, adicionalmente los tres transformadores de potencia existentes en el sistema.
- En general, en todos los niveles de carga analizados, el 89% de las líneas más débiles respecto de la estabilidad de tensión obtenidas por el método convencional del flujo de potencia continuado (margen de cargabilidad) son detectadas a través del nuevo índice difuso de estabilidad de tensión propuesto. Se debe aclarar que si bien los resultados obtenidos mediante las dos metodologías mencionadas no coinciden exactamente en cuanto a la clasificación, la variación entre uno y otro método es mínima.
- Adicionalmente se debe tomar en cuenta que, el valor del índice difuso de estabilidad de tensión obtenido para los elementos más críticos puede servir como un indicativo real de la cercanía al colapso de tensión de todo el sistema por salida de operación de dichas líneas. Este valor también nos da una buena referencia para determinar las áreas donde se requieren realizar acciones de control por parte del operador del sistema para evitar el colapso de tensión, pero con la particularidad que se puede tomar decisiones operativas solamente sobre las líneas que realmente presenten valores bajos del índice.
- La obtención del índice usando la función de pertenencia gaussiana presenta mejores resultados en comparación con lo obtenido usando las otras dos funciones analizadas (triangular y trapezoidal), puesto que la clasificación de las líneas más débiles presentan poca variación ante el continuo aumento del nivel de carga. Esto se puede evidenciar en la comparación gráfica realizada en la siguiente figura.



a) Triangular

b) Trapezoidal



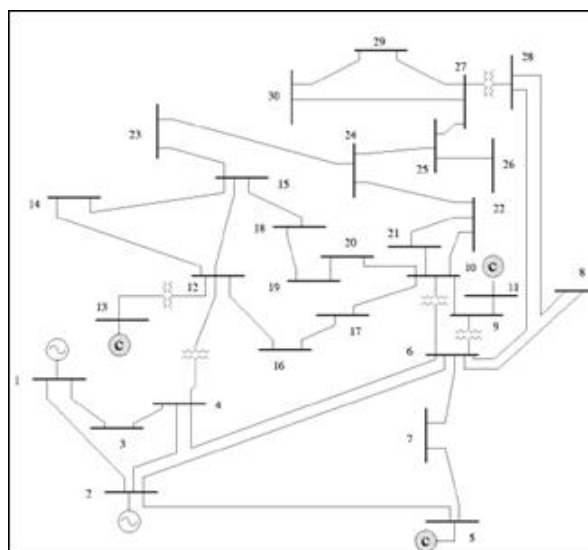
### c) Gaussiana

**Fig. 4.8** Variación de la clasificación de los elementos más débiles del Sistema IEEE 14 barras, analizado a través del índice  $I_{ETD}$  para las funciones de pertenencia: a) triangular, b) trapezoidal, c) gaussiana

Por lo citado anteriormente, en el presente trabajo de investigación se ha decidido realizar el cálculo del índice de estabilidad de tensión usando funciones de pertenencia tipo gaussiana, aunque los resultados obtenidos a través de las funciones de pertenencia triangular y trapezoidal también son mostrados para observar las diferencias presentadas.

### 4.3. Sistema IEEE 30 barras

El sistema de prueba IEEE 30 barras consta de 21 nodos de carga, 5 nodos de tensión controlada, el nodo de balance (nodo slack) alimentado por dos generadores, 4 condensadores síncronos y 41 elementos de transmisión (entre líneas y transformadores), tal como se muestra a continuación:



**Fig. 4.9** Sistema IEEE 30 barras [5].



Los resultados obtenidos para el sistema IEEE 30 barras a través del índice difuso de estabilidad de tensión para los tres tipos de funciones de pertenencia analizados, son mostrados en las Tablas 4.7, 4.7 y 4.9. En los dos primeros casos (funciones de pertenencia triangular y trapezoidal), los resultados son muy similares tanto en la clasificación como en los valores del índice obtenidos, sin embargo en el tercer caso (función gaussiana) muestra resultados mucho más cercanos a los esperados.

Cabe indicar que, solamente se presentan los resultados de los 21 elementos más críticos del sistema.

**Tabla 4.7:** Resultados del Sistema IEEE 30 barras obtenidos a través del índice  $I_{ETD}$ , para funciones de pertenencia tipo triangular

Resultados obtenidos a través del Índice de Estabilidad de Tensión Difuso (IETD), función de pertenencia tipo Triangular, Sistema IEEE 30 barras																					
Clasificación	$\lambda=1$		$\lambda=1.014$		$\lambda=1.029$		$\lambda=1.043$		$\lambda=1.057$		$\lambda=1.072$		$\lambda=1.086$		$\lambda=1.1$		$\lambda=1.115$		$\lambda=1.129$		Resultado Esperado - (Margen de Cargabilidad)
	Línea	IETD	Línea	IETD	Línea	IETD	Línea	IETD	Línea	IETD	Línea	IETD	Línea	IETD	Línea	IETD	Línea	IETD	Línea	IETD	
1	1	0.450	1	0.450	5	0.450	1	0.450	2	0.450	1	0.450	1	0.450	6	0.450	15	0.450	15	0.450	1
2	2	0.450	2	0.450	1	0.450	2	0.450	15	0.450	2	0.450	5	0.450	1	0.450	1	0.450	1	0.450	5
3	5	0.450	5	0.450	15	0.450	5	0.450	1	0.450	5	0.450	6	0.450	2	0.450	2	0.450	2	0.450	2
4	11	0.650	6	0.450	6	0.450	6	0.450	6	0.450	6	0.450	15	0.450	15	0.450	6	0.450	6	0.450	4
5	12	0.650	11	0.650	2	0.450	15	0.500	5	0.450	15	0.450	2	0.450	5	0.450	5	0.450	5	0.450	36
6	36	0.650	36	0.650	9	0.550	11	0.650	4	0.650	11	0.649	36	0.650	36	0.650	36	0.650	11	0.650	15
7	15	0.650	12	0.650	8	0.550	36	0.650	36	0.650	36	0.650	12	0.650	11	0.650	12	0.650	36	0.650	6
8	6	0.775	15	0.650	36	0.650	12	0.650	12	0.650	12	0.650	4	0.650	12	0.650	4	0.650	12	0.650	7
9	8	0.874	8	0.874	12	0.650	8	0.874	11	0.650	8	0.874	11	0.650	3	0.775	11	0.650	4	0.650	9
10	13	0.874	13	0.874	11	0.650	13	0.874	3	0.775	13	0.874	38	0.775	8	0.874	3	0.776	3	0.775	14
11	14	0.874	14	0.874	4	0.650	14	0.874	38	0.775	14	0.874	7	0.775	13	0.874	8	0.874	38	0.776	3
12	16	0.874	16	0.874	38	0.775	16	0.874	9	0.776	16	0.874	3	0.775	14	0.874	13	0.874	8	0.874	38
13	17	0.874	17	0.874	3	0.775	17	0.874	13	0.874	17	0.874	9	0.776	16	0.874	14	0.874	13	0.874	11
14	18	0.874	18	0.874	7	0.775	18	0.874	16	0.874	18	0.874	39	0.776	17	0.874	16	0.874	14	0.874	16
15	19	0.874	19	0.874	37	0.776	19	0.874	17	0.874	19	0.874	13	0.874	18	0.874	17	0.874	16	0.874	13
16	20	0.874	20	0.874	39	0.776	20	0.874	18	0.874	20	0.874	16	0.874	19	0.874	18	0.874	17	0.874	37
17	21	0.874	21	0.874	13	0.874	21	0.874	19	0.874	21	0.874	17	0.874	20	0.874	19	0.874	18	0.874	10
18	22	0.874	22	0.874	16	0.874	22	0.874	20	0.874	22	0.874	18	0.874	21	0.874	20	0.874	19	0.874	18
19	23	0.874	23	0.874	17	0.874	23	0.874	21	0.874	23	0.874	19	0.874	22	0.874	21	0.874	20	0.874	12
20	24	0.874	24	0.874	18	0.874	24	0.874	22	0.874	24	0.874	20	0.874	23	0.874	22	0.874	21	0.874	41
21	25	0.874	25	0.874	19	0.874	25	0.874	23	0.874	25	0.874	21	0.874	24	0.874	23	0.874	22	0.874	25

**Tabla 4.8:** Resultados del Sistema IEEE 30 barras obtenidos a través del índice  $I_{ETD}$ , para funciones de pertenencia tipo trapezoidal

Resultados obtenidos a través del Índice de Estabilidad de Tensión Difuso (IETD), función de pertenencia tipo Trapezoidal, Sistema IEEE 30 barras																						
Clasificación	$\lambda=1$		$\lambda=1.014$		$\lambda=1.029$		$\lambda=1.043$		$\lambda=1.057$		$\lambda=1.072$		$\lambda=1.086$		$\lambda=1.1$		$\lambda=1.115$		$\lambda=1.129$		Resultado Esperado - (Margen de Cargabilidad)	
	Línea	IETD	Línea	IETD	Línea	IETD	Línea	IETD	Línea	IETD	Línea	IETD	Línea	IETD	Línea	IETD	Línea	IETD	Línea	IETD		Línea
1	1	0.450	1	0.450	1	0.450	1	0.450	1	0.450	1	0.450	5	0.450	1	0.450	1	0.450	1	0.450	1	1
2	2	0.450	2	0.450	5	0.450	2	0.450	15	0.452	2	0.450	1	0.450	2	0.450	2	0.450	2	0.450	2	5
3	5	0.450	5	0.450	15	0.450	5	0.450	2	0.452	5	0.450	6	0.452	15	0.450	15	0.450	15	0.450	15	2
4	11	0.650	6	0.450	6	0.457	6	0.450	6	0.455	6	0.450	2	0.454	6	0.452	6	0.454	6	0.457	6	4
5	12	0.650	11	0.650	2	0.457	15	0.500	5	0.455	15	0.450	15	0.455	5	0.454	5	0.457	5	0.457	5	36
6	36	0.650	36	0.650	8	0.550	11	0.650	11	0.651	11	0.649	11	0.652	11	0.650	4	0.650	11	0.650	11	15
7	15	0.650	12	0.650	9	0.559	36	0.650	4	0.654	36	0.650	12	0.655	12	0.652	11	0.652	4	0.653	6	6
8	6	0.776	15	0.650	11	0.650	12	0.650	12	0.656	12	0.650	36	0.656	36	0.655	12	0.654	36	0.654	7	7
9	8	0.875	8	0.875	4	0.651	8	0.875	36	0.657	8	0.875	4	0.657	3	0.776	36	0.655	12	0.654	9	9
10	13	0.875	13	0.875	12	0.657	13	0.875	9	0.776	13	0.875	9	0.776	8	0.875	3	0.776	38	0.777	14	14
11	14	0.875	14	0.875	36	0.658	14	0.875	3	0.779	14	0.875	7	0.777	13	0.875	8	0.875	3	0.779	3	3
12	16	0.875	16	0.875	37	0.776	16	0.875	38	0.782	16	0.875	39	0.777	14	0.875	13	0.875	8	0.875	38	38
13	17	0.875	17	0.875	38	0.776	17	0.875	13	0.875	17	0.875	38	0.778	16	0.875	14	0.875	13	0.875	11	11
14	18	0.875	18	0.875	39	0.776	18	0.875	16	0.875	18	0.875	3	0.785	17	0.875	16	0.875	14	0.875	16	16
15	19	0.875	19	0.875	3	0.780	19	0.875	17	0.875	19	0.875	13	0.875	18	0.875	17	0.875	16	0.875	13	13
16	20	0.875	20	0.875	7	0.780	20	0.875	18	0.875	20	0.875	16	0.875	19	0.875	18	0.875	17	0.875	37	37
17	21	0.875	21	0.875	13	0.875	21	0.875	19	0.875	21	0.875	17	0.875	20	0.875	19	0.875	18	0.875	10	10
18	22	0.875	22	0.875	16	0.875	22	0.875	20	0.875	22	0.875	18	0.875	21	0.875	20	0.875	19	0.875	18	18
19	23	0.875	23	0.875	17	0.875	23	0.875	21	0.875	23	0.875	19	0.875	22	0.875	21	0.875	20	0.875	12	12
20	24	0.875	24	0.875	18	0.875	24	0.875	22	0.875	24	0.875	20	0.875	23	0.875	22	0.875	21	0.875	41	41
21	25	0.875	25	0.875	19	0.875	25	0.875	23	0.875	25	0.875	21	0.875	24	0.875	23	0.875	22	0.875	25	25

**Tabla 4.9:** Resultados del Sistema IEEE 30 barras obtenidos a través del índice  $I_{ETD}$ , para funciones de pertenencia tipo gaussiana

Resultados obtenidos a través del Índice de Estabilidad de Tensión Difuso (IETD), función de pertenencia tipo Gaussiana, Sistema IEEE 30 barras																						
Clasificación	$\lambda=1$		$\lambda=1.014$		$\lambda=1.029$		$\lambda=1.043$		$\lambda=1.057$		$\lambda=1.072$		$\lambda=1.086$		$\lambda=1.1$		$\lambda=1.115$		$\lambda=1.129$		Resultado Esperado - (Margen de Cargabilidad)	
	Línea	IETD	Línea	IETD	Línea	IETD	Línea	IETD	Línea	IETD	Línea	IETD	Línea	IETD	Línea	IETD	Línea	IETD	Línea	IETD		Línea
1	2	0.385	2	0.382	5	0.377	2	0.380	1	0.353	1	0.369	1	0.324	1	0.355	1	0.344	1	0.334	1	1
2	5	0.394	5	0.399	2	0.382	1	0.386	5	0.373	2	0.380	5	0.342	2	0.375	2	0.371	2	0.366	5	5
3	1	0.431	1	0.415	1	0.390	5	0.410	2	0.378	5	0.419	2	0.368	5	0.410	5	0.405	5	0.397	2	2
4	6	0.544	6	0.524	6	0.428	6	0.487	6	0.445	6	0.453	6	0.464	6	0.425	6	0.417	6	0.412	4	4
5	15	0.559	15	0.548	15	0.490	15	0.525	15	0.485	15	0.510	15	0.469	15	0.471	15	0.467	15	0.463	36	36
6	36	0.562	36	0.560	9	0.530	36	0.561	4	0.554	36	0.565	4	0.519	36	0.572	36	0.569	4	0.564	15	15
7	12	0.573	12	0.574	4	0.546	12	0.574	11	0.569	12	0.574	7	0.560	12	0.573	12	0.571	11	0.564	6	6
8	9	0.644	11	0.639	8	0.548	11	0.605	12	0.574	11	0.596	12	0.568	11	0.586	11	0.580	36	0.566	7	7
9	11	0.653	7	0.651	11	0.566	7	0.623	36	0.576	7	0.632	11	0.569	7	0.597	4	0.582	12	0.568	9	9
10	7	0.661	9	0.652	12	0.572	39	0.656	7	0.580	39	0.636	36	0.570	4	0.603	7	0.582	7	0.570	14	14
11	3	0.668	3	0.668	36	0.576	4	0.666	39	0.651	4	0.656	39	0.635	38	0.652	38	0.655	34	0.636	3	3
12	38	0.669	38	0.678	7	0.587	9	0.668	9	0.664	3	0.660	38	0.638	37	0.659	39	0.667	38	0.663	38	38
13	39	0.727	39	0.713	38	0.625	3	0.668	41	0.665	9	0.668	37	0.654	39	0.667	9	0.667	10	0.666	11	11
14	4	0.737	4	0.715	39	0.628	38	0.678	10	0.665	38	0.678	40	0.663	9	0.667	3	0.669	39	0.667	16	16
15	37	0.785	37	0.783	41	0.650	37	0.767	34	0.668	37	0.758	9	0.663	3	0.668	37	0.674	9	0.667	13	13
16	18	0.790	18	0.790	10	0.655	18	0.789	37	0.671	13	0.785	41	0.663	34	0.718	34	0.684	3	0.672	37	37
17	14	0.792	14	0.791	37	0.661	14	0.789	38	0.673	14	0.785	10	0.664	10	0.721	10	0.698	37	0.673	10	10
18	10	0.795	10	0.794	40	0.662	10	0.790	3	0.674	18	0.788	34	0.666	41	0.735	41	0.712	41	0.689	18	18
19	27	0.797	27	0.797	34	0.665	41	0.795	40	0.694	10	0.789	3	0.678	14	0.783	14	0.782	14	0.780	12	12
20	8	0.797	8	0.797	3	0.674	27	0.796	8	0.721	41	0.794	8	0.712	18	0.787	18	0.787	18	0.787	41	41
21	25	0.799	41	0.798	31	0.711	8	0.797	13	0.775	27	0.796	31	0.730	13	0.793	13	0.791	13	0.788	25	25

Los resultados mostrados en las tablas precedentes corresponden a la clasificación por nivel de criticidad (de mayor a menor) de las líneas que forman parte del sistema IEEE 30 barras, obtenidos a partir del cálculo del  $I_{ETD}$  para 10 niveles de carga comprendidos entre el caso base ( $\lambda=1$  pu) y el nivel crítico de carga del sistema ( $\lambda_{critico}=1.129$  pu).

Tomando como referencia la Tabla 4.9, la cual corresponde a la obtención del  $I_{ETD}$  mediante funciones de pertenencia tipo gaussiana, se puede inferir como resultados generales que, las líneas más débiles respecto a la estabilidad de tensión del sistema IEEE 30 barras son las siguientes:

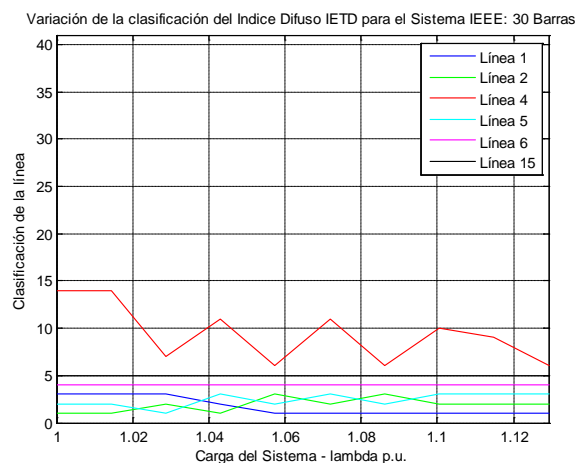


**Tabla 4.10:** Áreas débiles del sistema IEEE 30 barras obtenidas a través del índice  $I_{ETD}$ 

Áreas débiles sistema IEEE 30 barras obtenidas a través del Índice de Estabilidad de Tensión Difuso (IETD)			
Clasificación por nivel de criticidad	Línea	Barra i	Barra j
1	1	1	2
2	2	1	3
3	5	2	5
4	6	2	6
5	15	4	12
6	4	3	4
7	36	28	27
8	11	6	9
9	12	6	10
10	7	4	6

Si comparamos estos resultados con los obtenidos a través del margen de cargabilidad (APÉNDICE E) se puede concluir que, en general, el 90.67% de elementos críticos obtenidos a través del índice de estabilidad de tensión difuso  $I_{ETD}$  coinciden con los obtenidos a través del margen de cargabilidad (flujo de potencia continuado). Estos resultados muestran un buen desempeño del nuevo índice de estabilidad propuesto, puesto que en este sistema, el  $I_{ETD}$  tuvo la capacidad de detectar las áreas débiles del sistema con una eficiencia muy alta, inclusive en lo que respecta al orden de criticidad de las líneas más débiles.

Es importante resaltar el buen desempeño del índice difuso ante condiciones críticas de cargabilidad del sistema, puesto que, es en estas condiciones, en las cuales el sistema de inferencia difuso es capaz de alcanzar su mejor rendimiento, característica muy difícil de encontrar en los demás índices de estabilidad de tensión propuestos en la literatura. Para constatar una vez más la estabilidad del comportamiento del índice difuso, en la siguiente figura se muestra la variación en la clasificación obtenida por nivel de criticidad en algunos de los elementos más débiles del sistema IEEE 30 barras para todos los niveles de carga simulados.


**Fig. 4.10** Variación de la clasificación de los elementos más débiles del Sistema IEEE 30 barras, analizado a través del índice  $I_{ETD}$  para función de pertenencia gaussiana

#### 4.4. Sistema IEEE 118 barras

El sistema IEEE 118 barras representa una porción del sistema eléctrico del Medio Oeste de los Estados Unidos correspondiente al año 1962 y consta de 91 nodos de carga, 53 nodos de tensión controlada, un nodo de balance (slack), 14 capacitores y 186 elementos o vínculos de transmisión, tal como se muestra en la siguiente figura.

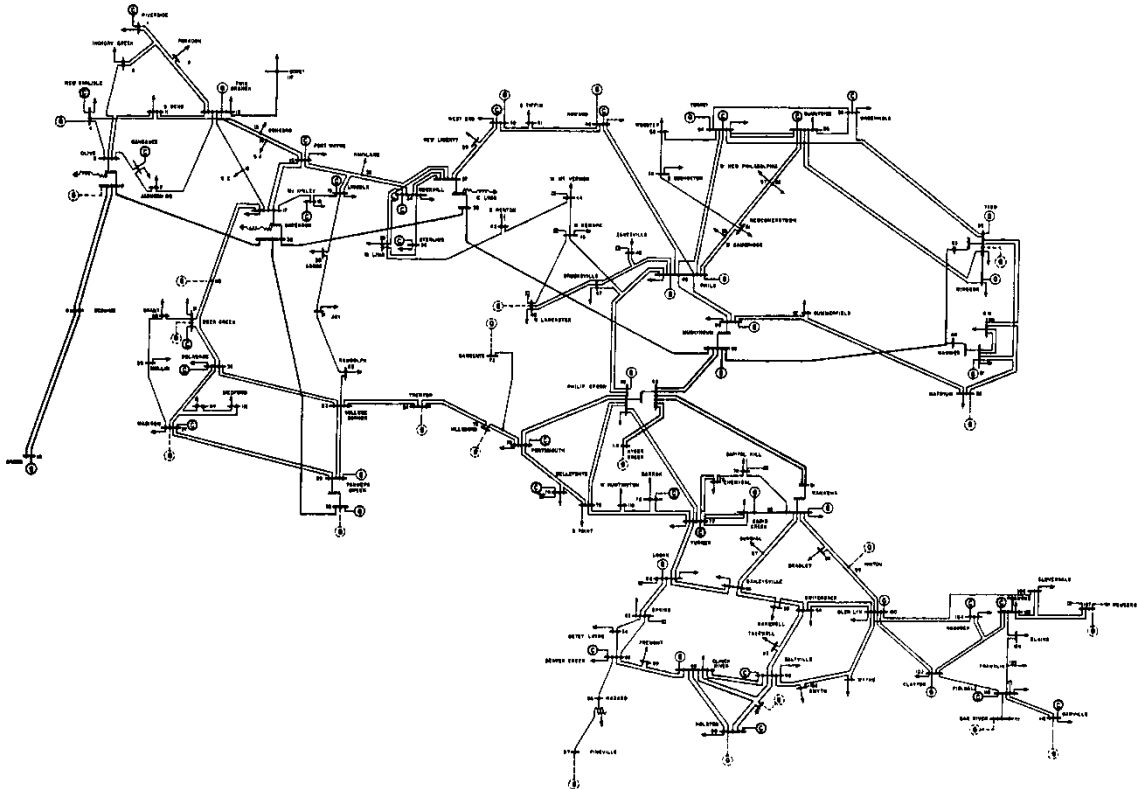


Fig. 4.11 Sistema IEEE 18 barras [18].

Las áreas débiles respecto a la estabilidad de tensión para el sistema IEEE 118 barras obtenidas a través del índice difuso  $I_{ETD}$  son detalladas en las Tablas 4.11, 4.12 y 4.13. Se muestran los 40 elementos más críticos del sistema.

Tal como se evidenció en los dos sistemas analizados anteriormente, los resultados obtenidos a través del índice difuso desarrollado por medio de las funciones de pertenencia tipo triangular y trapezoidal (Tablas 4.11 y 4.12) no permiten tener una clara diferenciación de la clasificación real de cada elemento, puesto que los valores del índice son los mismos para varios elementos que tienen el mismo nivel lingüístico (1, 2, 3, 4 ó 5), tal como se definió en el sistema difuso.



**Tabla 4.11:** Resultados del Sistema IEEE 118 barras obtenidos a través del índice  $I_{ETD}$ , para funciones de pertenencia tipo triangular.

Resultados obtenidos a través del Índice de Estabilidad de Tensión Difuso (IETD), función de pertenencia tipo Triangular, Sistema IEEE 118 barras (40 elementos más severos)																						
Clasificación	$\lambda=1$		$\lambda=1.125$		$\lambda=1.25$		$\lambda=1.375$		$\lambda=1.499$		$\lambda=1.624$		$\lambda=1.749$		$\lambda=1.874$		$\lambda=1.999$		$\lambda=2.123$		Resultado Esperado - (Margen de Cargabilidad)	
	Línea	IETD	Línea	IETD	Línea	IETD	Línea	IETD	Línea	IETD	Línea	IETD	Línea	IETD	Línea	IETD	Línea	IETD	Línea	IETD		Línea
1	108	0.450	141	0.250	141	0.250	167	0.250	51	0.250	163	0.250	116	0.075	116	0.075	38	0.080	96	0.080	8	
2	33	0.450	8	0.250	8	0.250	51	0.250	36	0.250	174	0.250	51	0.250	118	0.250	116	0.080	38	0.080	185	
3	38	0.450	33	0.350	33	0.350	36	0.250	116	0.250	164	0.250	76	0.250	36	0.250	41	0.250	116	0.080	51	
4	141	0.450	31	0.450	31	0.450	8	0.250	8	0.250	141	0.250	141	0.250	139	0.250	36	0.250	51	0.080	163	
5	93	0.450	98	0.450	66	0.450	31	0.450	108	0.350	36	0.250	163	0.250	75	0.250	75	0.250	52	0.250	96	
6	116	0.450	99	0.450	67	0.450	66	0.450	7	0.450	108	0.250	36	0.250	41	0.250	154	0.250	141	0.250	118	
7	8	0.450	139	0.450	98	0.450	67	0.450	31	0.450	51	0.250	75	0.250	154	0.250	76	0.250	27	0.250	50	
8	71	0.450	38	0.450	99	0.450	98	0.450	66	0.450	8	0.251	96	0.251	76	0.250	21	0.250	28	0.250	174	
9	51	0.450	163	0.450	38	0.450	99	0.450	67	0.450	33	0.252	118	0.251	163	0.250	27	0.250	11	0.250	3	
10	36	0.450	138	0.450	163	0.450	105	0.450	98	0.450	38	0.252	8	0.251	185	0.250	28	0.250	71	0.250	38	
11	31	0.650	36	0.450	145	0.450	116	0.450	99	0.450	116	0.253	33	0.252	51	0.250	141	0.250	21	0.250	36	
12	66	0.650	93	0.450	164	0.450	118	0.450	105	0.450	167	0.350	138	0.350	7	0.251	11	0.250	53	0.250	116	
13	67	0.650	71	0.450	93	0.450	38	0.450	106	0.450	41	0.350	139	0.350	9	0.251	93	0.250	75	0.250	97	
14	98	0.650	116	0.450	5	0.450	23	0.450	118	0.450	7	0.450	167	0.350	96	0.252	163	0.250	154	0.250	108	
15	99	0.650	108	0.450	142	0.450	33	0.450	136	0.450	9	0.450	41	0.350	108	0.252	31	0.251	93	0.250	167	
16	163	0.650	51	0.450	139	0.450	11	0.450	29	0.450	31	0.450	7	0.450	33	0.255	66	0.251	119	0.250	178	
17	32	0.650	66	0.650	108	0.450	41	0.450	141	0.450	66	0.450	9	0.450	8	0.255	67	0.251	41	0.250	33	
18	107	0.650	67	0.650	71	0.450	93	0.450	167	0.450	67	0.450	29	0.450	167	0.350	68	0.251	61	0.250	29	
19	118	0.650	7	0.650	36	0.450	141	0.450	5	0.450	96	0.450	31	0.450	142	0.350	105	0.251	29	0.251	32	
20	127	0.650	9	0.650	167	0.450	53	0.450	163	0.450	98	0.450	66	0.450	174	0.350	118	0.251	31	0.251	4	
21	137	0.650	32	0.650	51	0.450	145	0.450	23	0.450	99	0.450	67	0.450	138	0.350	108	0.252	66	0.251	21	
22	41	0.650	105	0.650	116	0.450	138	0.450	33	0.450	105	0.450	68	0.450	164	0.350	7	0.255	67	0.251	66	
23	139	0.650	107	0.650	174	0.450	108	0.450	38	0.450	106	0.450	98	0.450	4	0.450	9	0.255	68	0.251	67	
24	174	0.650	118	0.650	73	0.550	163	0.450	71	0.450	118	0.450	99	0.450	21	0.450	33	0.255	98	0.251	31	
25	5	0.650	127	0.650	105	0.650	164	0.450	166	0.450	136	0.450	105	0.450	28	0.450	8	0.255	99	0.251	28	
26	23	0.650	136	0.650	118	0.650	139	0.450	145	0.450	137	0.450	106	0.450	29	0.450	51	0.255	105	0.251	5	
27	142	0.650	137	0.650	137	0.650	142	0.450	93	0.450	144	0.450	123	0.450	31	0.450	167	0.350	106	0.251	94	
28	167	0.650	142	0.650	4	0.650	5	0.450	53	0.450	166	0.450	136	0.450	62	0.450	174	0.350	118	0.251	2	
29	11	0.650	11	0.650	7	0.650	71	0.450	52	0.450	52	0.450	137	0.450	66	0.450	142	0.350	163	0.251	13	
30	164	0.775	167	0.650	9	0.650	174	0.450	174	0.450	10	0.450	174	0.450	67	0.450	164	0.350	108	0.252	23	
31	144	0.775	164	0.650	21	0.650	107	0.500	41	0.450	138	0.450	71	0.450	68	0.450	138	0.350	167	0.252	93	
32	52	0.775	23	0.650	32	0.650	185	0.550	11	0.450	28	0.450	142	0.450	98	0.450	4	0.450	7	0.255	164	
33	145	0.775	174	0.650	68	0.650	73	0.550	28	0.450	139	0.450	154	0.450	99	0.450	23	0.450	9	0.255	61	
34	138	0.775	5	0.650	96	0.650	186	0.550	164	0.450	119	0.450	164	0.450	105	0.450	29	0.450	33	0.255	41	
35	185	0.776	41	0.650	106	0.650	4	0.650	177	0.450	93	0.450	185	0.450	106	0.450	89	0.450	8	0.255	62	
36	35	0.776	185	0.775	107	0.650	21	0.650	142	0.450	185	0.450	38	0.450	123	0.450	98	0.450	36	0.255	16	
37	34	0.776	144	0.775	123	0.650	106	0.650	139	0.450	23	0.450	103	0.450	136	0.450	99	0.450	174	0.350	68	
38	53	0.776	52	0.775	127	0.650	136	0.650	138	0.450	145	0.450	166	0.450	137	0.450	106	0.450	164	0.350	55	
39	73	0.776	53	0.775	136	0.650	137	0.650	107	0.500	142	0.450	70	0.450	141	0.450	117	0.450	142	0.350	22	
40	75	0.776	145	0.775	119	0.650	29	0.650	154	0.550	177	0.450	117	0.450	81	0.450	123	0.450	138	0.350	27	

**Tabla 4.12:** Resultados del Sistema IEEE 118 barras obtenidos a través del índice  $I_{ETD}$ , para funciones de pertenencia tipo trapezoidal.

Resultados obtenidos a través del Índice de Estabilidad de Tensión Difuso (IETD), función de pertenencia tipo Trapezoidal, Sistema IEEE 118 barras (40 elementos más severos)																					
Clasificación	$\lambda=1$		$\lambda=1.125$		$\lambda=1.25$		$\lambda=1.375$		$\lambda=1.499$		$\lambda=1.624$		$\lambda=1.749$		$\lambda=1.874$		$\lambda=1.999$		$\lambda=2.123$		Resultado Esperado - (Margen de Cargabilidad)
	Línea	IETD	Línea	IETD	Línea	IETD	Línea	IETD	Línea	IETD	Línea	IETD	Línea	IETD	Línea	IETD	Línea	IETD	Línea	IETD	
1	8	0.450	141	0.250	8	0.250	36	0.250	36	0.250	174	0.250	116	0.075	116	0.075	38	0.080	38	0.080	8
2	33	0.450	8	0.250	141	0.251	167	0.250	51	0.250	51	0.250	96	0.251	185	0.250	116	0.080	116	0.080	185
3	141	0.450	33	0.359	33	0.350	8	0.250	8	0.250	8	0.251	118	0.251	36	0.250	27	0.250	51	0.080	51
4	38	0.450	163	0.450	93	0.450	51	0.254	116	0.254	163	0.253	8	0.251	163	0.250	28	0.250	96	0.080	163
5	116	0.450	139	0.450	164	0.450	23	0.450	108	0.355	116	0.253	76	0.252	118	0.250	41	0.250	41	0.250	96
6	93	0.451	38	0.450	5	0.450	33	0.450	33	0.450	164	0.254	51	0.252	7	0.251	141	0.250	61	0.250	118
7	108	0.451	31	0.450	38	0.450	38	0.450	38	0.450	36	0.255	75	0.254	9	0.251	11	0.250	29	0.251	50
8	36	0.455	98	0.450	31	0.450	31	0.450	29	0.450	33	0.255	141	0.254	96	0.252	93	0.250	31	0.251	174
9	51	0.455	99	0.450	66	0.450	66	0.450	7	0.450	38	0.255	163	0.254	51	0.254	163	0.250	66	0.251	3
10	71	0.456	138	0.452	67	0.450	67	0.450	31	0.450	108	0.256	36	0.255	8	0.255	31	0.251	67	0.251	38
11	31	0.650	116	0.454	98	0.450	98	0.450	66	0.450	141	0.256	33	0.255	33	0.255	66	0.251	68	0.251	36
12	66	0.650	71	0.454	99	0.450	99	0.450	67	0.450	41	0.354	138	0.350	108	0.255	67	0.251	98	0.251	116
13	67	0.650	51	0.454	51	0.450	105	0.450	98	0.450	167	0.354	41	0.353	139	0.256	68	0.251	99	0.251	97
14	98	0.650	36	0.455	145	0.452	118	0.450	99	0.450	7	0.450	167	0.353	75	0.257	105	0.251	105	0.251	108
15	99	0.650	108	0.455	142	0.452	116	0.450	105	0.450	9	0.450	139	0.354	76	0.257	118	0.251	106	0.251	167
16	163	0.650	93	0.456	163	0.452	108	0.451	106	0.450	31	0.450	103	0.450	154	0.257	76	0.251	118	0.251	178
17	32	0.650	66	0.650	36	0.454	145	0.451	118	0.450	66	0.450	142	0.450	41	0.259	36	0.252	163	0.251	33
18	107	0.650	67	0.650	139	0.454	5	0.453	136	0.450	67	0.450	154	0.450	142	0.350	7	0.255	27	0.251	29
19	118	0.650	7	0.650	174	0.456	163	0.454	141	0.450	96	0.450	185	0.450	167	0.350	8	0.255	28	0.251	32
20	127	0.650	9	0.650	167	0.457	53	0.454	23	0.450	98	0.450	38	0.450	138	0.358	9	0.255	75	0.251	4
21	137	0.650	32	0.650	71	0.458	93	0.455	71	0.450	99	0.450	174	0.450	174	0.359	33	0.255	141	0.252	21
22	41	0.650	105	0.650	108	0.458	41	0.455	167	0.451	105	0.450	71	0.450	164	0.359	51	0.255	11	0.252	66
23	167	0.651	107	0.650	116	0.459	139	0.456	53	0.451	106	0.450	164	0.450	103	0.450	108	0.255	52	0.253	67
24	11	0.651	118	0.650	73	0.550	11	0.456	163	0.452	118	0.450	7	0.450	177	0.450	75	0.257	119	0.254	31
25	5	0.654	127	0.650	105	0.650	71	0.456	5	0.452	136	0.450	9	0.450	38	0.450	21	0.259	71	0.254	28
26	174	0.654	136	0.650	118	0.650	142	0.457	52	0.453	137	0.450	29	0.450	81	0.450	154	0.259	93	0.254	5
27	142	0.655	137	0.650	137	0.650	141	0.457	145	0.454	166	0.450	31	0.450	4	0.450	167	0.350	7	0.255	94
28	139	0.655	142	0.650	4	0.650	138	0.459	93	0.455	139	0.451	66	0.450	21	0.450	138	0.359	8	0.255	2
29	23	0.655	174	0.650	7	0.650	164	0.459	41	0.455	144	0.451	67	0.450	29	0.450	142	0.359	9	0.255	13
30	185	0.776	41	0.650	9	0.650	174	0.459	174	0.455	138	0.452	68	0.450	31	0.450	164	0.359	33	0.255	23
31	35	0.776	23	0.650	21	0.650	107	0.500	166	0.455	71	0.454	98	0.450	62	0.450	174	0.359	36	0.255	93
32	34	0.776	164	0.652	32	0.650	73	0.550	139	0.456	119	0.454	99	0.450	66	0.450	103	0.450	108	0.255	164
33	53	0.776	5	0.652	68	0.650	186	0.550	164	0.457	23	0.454	105	0.450	67	0.450	139	0.450	167	0.255	61
34	73	0.776	167	0.654	96	0.650	185	0.559	28	0.457	185	0.454	106	0.450	68	0.450	23	0.450	21	0.256	41
35	75	0.776	11	0.656	106	0.650	29	0.650	138	0.458	93	0.455	123	0.450	98	0.450	71	0.450	53	0.259	62
36	76	0.776	34	0.776	107	0.650	4	0.650	11	0.459	10	0.455	136	0.450	99	0.450	53	0.450	154	0.259	16
37	154	0.776	35	0.776	123	0.650	21	0.650	142	0.459	52	0.455	137	0.450	105	0.450	185	0.450	164	0.356	68
38	165	0.776	54	0.776	127	0.650	106	0.650	177	0.459	142	0.456	119	0.452	106	0.450	59	0.450	138	0.358	55
39	166	0.776	72	0.776	136	0.650	136	0.650	107	0.500	177	0.458	93	0.454	123	0.450	165	0.450	174	0.359	22
40	170	0.776	73	0.776	119	0.650	137	0.650	72	0.550	28	0.458	70	0.454	136	0.450	4	0.450	142	0.359	27

**Tabla 4.13:** Resultados del Sistema IEEE 118 barras obtenidos a través del índice  $I_{ETD}$ , para funciones de pertenencia tipo gaussiana.

Resultados obtenidos a través del Índice de Estabilidad de Tensión Difuso (IETD), función de pertenencia tipo Gaussiana, Sistema IEEE 118 barras (40 elementos más severos)																						
Clasificación	$\lambda=1$		$\lambda=1.125$		$\lambda=1.25$		$\lambda=1.375$		$\lambda=1.499$		$\lambda=1.624$		$\lambda=1.749$		$\lambda=1.874$		$\lambda=1.999$		$\lambda=2.123$		Resultado Esperado - (Margen de Cargabilidad)	
	Línea	IETD	Línea	IETD	Línea	IETD	Línea	IETD	Línea	IETD	Línea	IETD	Línea	IETD	Línea	IETD	Línea	IETD	Línea	IETD	Línea	
1	8	0.356	8	0.315	8	0.280	8	0.271	8	0.270	33	0.235	116	0.183	116	0.121	96	0.146	96	0.125	8	
2	33	0.359	141	0.321	33	0.314	116	0.298	51	0.273	116	0.245	33	0.215	36	0.187	8	0.187	51	0.142	7	
3	141	0.389	33	0.349	141	0.336	51	0.300	116	0.273	51	0.249	51	0.219	51	0.193	51	0.187	38	0.143	9	
4	51	0.389	51	0.369	51	0.336	33	0.314	36	0.286	36	0.262	36	0.239	33	0.215	36	0.189	116	0.186	185	
5	36	0.400	36	0.386	36	0.356	36	0.316	141	0.290	8	0.267	8	0.254	8	0.219	116	0.203	8	0.187	51	
6	93	0.442	71	0.389	98	0.379	141	0.345	33	0.314	141	0.273	141	0.301	108	0.271	33	0.215	36	0.187	163	
7	71	0.448	163	0.398	99	0.379	167	0.345	38	0.330	163	0.296	118	0.308	96	0.274	108	0.215	33	0.215	96	
8	31	0.458	31	0.399	31	0.382	108	0.353	108	0.333	38	0.305	41	0.312	9	0.278	38	0.225	108	0.215	118	
9	116	0.466	108	0.411	163	0.389	71	0.375	163	0.361	108	0.306	108	0.314	118	0.278	9	0.262	141	0.224	50	
10	108	0.477	98	0.423	71	0.394	31	0.379	167	0.362	164	0.341	38	0.314	41	0.291	7	0.263	163	0.224	174	
11	5	0.492	99	0.423	167	0.397	98	0.381	31	0.365	139	0.344	163	0.315	7	0.302	141	0.265	71	0.234	3	
12	38	0.494	116	0.432	139	0.397	99	0.381	71	0.368	118	0.350	139	0.319	154	0.305	118	0.268	41	0.254	38	
13	98	0.505	93	0.436	142	0.401	163	0.383	41	0.372	174	0.352	96	0.330	139	0.309	66	0.269	9	0.262	36	
14	99	0.505	38	0.445	93	0.411	5	0.383	174	0.374	167	0.355	167	0.344	38	0.314	67	0.269	7	0.262	116	
15	23	0.512	142	0.454	108	0.412	66	0.385	98	0.376	41	0.356	9	0.344	167	0.321	163	0.276	66	0.262	97	
16	66	0.524	139	0.454	66	0.418	67	0.385	99	0.376	96	0.360	174	0.354	141	0.322	105	0.283	67	0.262	108	
17	67	0.524	66	0.468	67	0.418	105	0.397	118	0.377	66	0.365	164	0.356	75	0.329	21	0.286	105	0.262	167	
18	11	0.525	67	0.468	116	0.418	118	0.397	66	0.379	67	0.365	138	0.359	93	0.341	68	0.295	53	0.263	178	
19	174	0.526	164	0.471	174	0.431	142	0.408	67	0.379	138	0.366	98	0.362	76	0.347	71	0.296	118	0.266	33	
20	142	0.527	174	0.480	38	0.440	93	0.409	23	0.382	31	0.368	99	0.362	71	0.348	28	0.302	31	0.270	29	
21	163	0.529	138	0.490	5	0.453	11	0.410	105	0.385	98	0.371	154	0.363	174	0.351	154	0.303	21	0.270	32	
22	139	0.534	23	0.492	145	0.463	139	0.413	139	0.386	99	0.371	7	0.365	163	0.351	167	0.314	68	0.274	4	
23	167	0.539	11	0.494	11	0.465	41	0.413	164	0.388	105	0.379	142	0.366	68	0.352	41	0.317	28	0.278	21	
24	41	0.608	5	0.494	105	0.469	174	0.416	5	0.388	106	0.384	93	0.367	164	0.353	31	0.319	93	0.282	66	
25	138	0.615	41	0.524	164	0.478	164	0.425	106	0.391	23	0.387	31	0.367	142	0.355	139	0.324	106	0.289	67	
26	186	0.621	167	0.526	138	0.495	38	0.425	11	0.394	7	0.387	66	0.367	138	0.357	93	0.325	119	0.290	31	
27	10	0.624	105	0.558	23	0.496	138	0.433	93	0.401	71	0.387	67	0.367	144	0.359	185	0.326	52	0.298	28	
28	164	0.631	10	0.563	118	0.497	23	0.448	138	0.402	93	0.388	75	0.367	117	0.359	11	0.330	185	0.310	5	
29	74	0.635	145	0.571	41	0.503	106	0.459	7	0.422	5	0.394	119	0.371	66	0.362	53	0.339	167	0.314	94	
30	73	0.636	137	0.578	52	0.507	52	0.469	52	0.429	11	0.394	185	0.374	67	0.362	75	0.342	154	0.314	2	
31	19	0.636	118	0.582	10	0.510	145	0.474	142	0.430	9	0.396	52	0.374	105	0.363	174	0.348	61	0.317	13	
32	118	0.638	136	0.592	144	0.530	10	0.486	177	0.431	142	0.397	106	0.374	31	0.365	164	0.350	139	0.322	23	
33	45	0.640	52	0.609	137	0.537	144	0.487	145	0.439	117	0.398	71	0.374	185	0.366	138	0.353	98	0.324	93	
34	107	0.641	144	0.610	136	0.544	53	0.512	166	0.453	119	0.398	144	0.379	98	0.368	142	0.353	99	0.324	164	
35	17	0.643	186	0.621	106	0.559	136	0.517	10	0.456	177	0.400	117	0.380	99	0.368	23	0.356	29	0.327	61	
36	32	0.646	74	0.622	53	0.599	137	0.521	144	0.461	52	0.404	105	0.385	145	0.372	177	0.358	27	0.330	41	
37	49	0.648	9	0.624	68	0.600	68	0.535	136	0.470	10	0.411	137	0.389	177	0.374	145	0.362	164	0.337	62	
38	185	0.650	7	0.627	4	0.607	185	0.549	53	0.477	185	0.423	23	0.391	137	0.376	61	0.362	174	0.338	16	
39	77	0.651	73	0.631	74	0.611	21	0.551	185	0.485	144	0.427	5	0.392	5	0.379	106	0.362	138	0.344	68	
40	110	0.652	25	0.637	73	0.614	4	0.551	137	0.486	136	0.428	11	0.392	11	0.380	144	0.363	142	0.347	55	

Al analizar los resultados mostrados en la Tabla 4.13 que corresponden a la clasificación obtenida por medio del índice difuso  $I_{ETD}$  a través de funciones de pertenencia tipo gaussiana, se puede concluir que la mayor parte de elementos críticos detectados a través de esta metodología corresponden con los obtenidos a través del índice del margen de cargabilidad (índice de referencia). Si bien la clasificación de algunos elementos no coincide exactamente con el resultado esperado (última columna de la tabla), en términos generales muchos de los elementos críticos han sido detectados por el índice difuso.

Al analizar 20 de los elementos más críticos obtenidos a través del  $I_{ETD}$  en todos los niveles de carga simulados, se puede determinar que el 75.5% de éstos coinciden con los 20 primeros elementos determinados por el índice de referencia; si bien este porcentaje es bastante bueno, es menor que los resultados obtenidos en los dos sistemas IEEE analizados anteriormente.

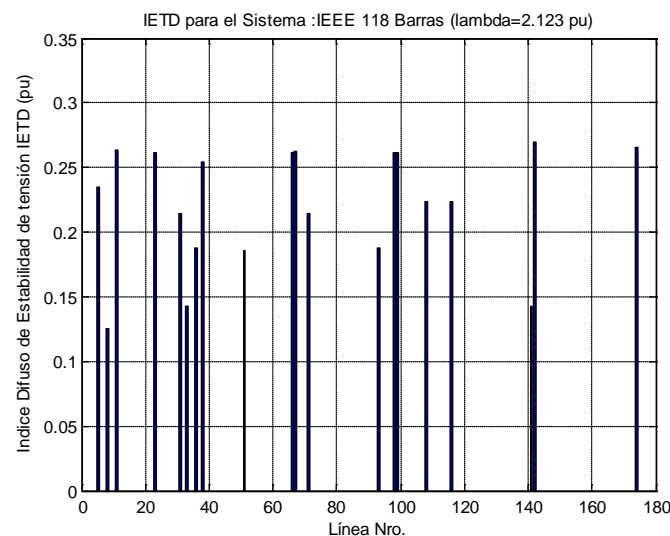
Como resultado general de las simulaciones realizadas para los 10 niveles de carga motivo de análisis se tiene que, las áreas débiles respecto de la estabilidad de tensión del sistema IEEE 118 barras son:

**Tabla 4.14:** Áreas débiles del sistema IEEE 118 barras obtenidas a través del índice  $I_{ETD}$ 

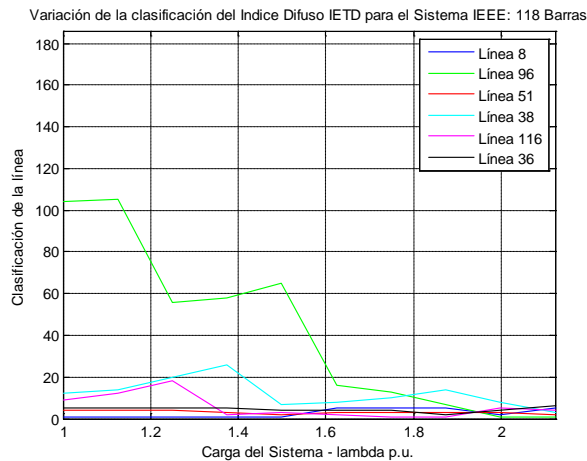
Áreas débiles sistema IEEE 118 barras obtenidas a través del Índice de Estabilidad de Tensión Difuso (IETD)			
Clasificación por nivel de criticidad	Línea	Barra i	Barra j
1	8	8	5
2	96	38	65
3	51	38	37
4	38	26	30
5	116	69	75
6	36	30	17
7	33	25	27
8	108	69	70
9	141	89	92
10	163	100	103
11	71	49	51
12	41	23	32
13	9	9	10
14	7	8	9
15	66	42	49

Es importante indicar que, así como el índice  $I_{ETD}$  detecta correctamente la mayor parte de áreas críticas respecto a la estabilidad de tensión, existen varios elementos que con esta metodología no han sido detectados como críticos, estos son los correspondientes a la numeración: 85, 118, 50, 3, 97 y 178. Adicionalmente se debe recalcar que el análisis de este sistema de prueba muestra que el índice  $I_{ETD}$  tiene un menor rendimiento que el logrado con los sistemas de 14 y 30 barras, especialmente en lo que respecta a la coincidencia en el orden de clasificación de los elementos críticos.

Para tener una idea gráfica de los valores del índice  $I_{ETD}$  obtenidos para los 20 elementos más críticos del sistema, se presenta a continuación un diagrama de barras con dicha información.


**Fig. 4.12** Índice de estabilidad de tensión  $I_{ETD}$  de los 20 elementos más críticos del sistema IEEE 118 barras

Para analizar la estabilidad de comportamiento del índice propuesto, a continuación se presenta una gráfica de la variación de la clasificación por nivel de criticidad de algunos de los elementos más críticos del sistema IEEE 118 barras.



**Fig. 4.13** Variación de la clasificación de los elementos más débiles del Sistema IEEE 118 barras, analizado a través del índice  $I_{ETD}$  para la función de pertenencia gaussiana.

Si comparamos estos resultados con los obtenidos en los dos sistemas de prueba analizados previamente, se puede evidenciar que la clasificación por criticidad de los elementos del sistema IEEE 118 barras es menos estable, puesto que algunos elementos muestran una considerable variación a lo largo de los distintos niveles de carga analizados.

Tomando como referencia el análisis realizado en los tres sistemas IEEE de prueba, se puede concluir que el índice difuso de estabilidad de tensión propuesto en el presente trabajo de investigación permite detectar con una precisión adecuada las áreas más críticas de un sistema eléctrico de potencia; sin embargo este comportamiento está supeditado a la eficiencia de los índices considerados como entradas del sistema difuso.

Una de las ventajas que presenta el desarrollo de este nuevo índice de estabilidad de tensión en comparación con los índices considerados como entradas del sistema difuso es que, el comportamiento presentado desde el caso base hasta el valor de carga máxima, es muy estable, incrementando inclusive su nivel de eficiencia mientras más cerca se encuentra del valor de carga crítica del sistema, característica que es muy difícil encontrar en otros índices de estabilidad de tensión.

Adicionalmente es importante hacer hincapié en el ahorro de tiempo que se obtiene al realizar la detección de áreas débiles respecto de la estabilidad de tensión a través del índice  $I_{ETD}$ , puesto que, al ser las entradas de cálculo rápido, el sistema difuso es capaz de inferir la salida de manera casi instantánea; este aspecto representa una gran ventaja con respecto al tiempo de cálculo requerido

para obtener los márgenes de cargabilidad en todos los elementos de un sistema eléctrico.

El tiempo de cálculo de los índices de estabilidad de tensión es uno de los aspectos más relevantes en el ambiente de la operación en tiempo real de los sistemas de potencia, ya que, de esto dependen las acciones de control que se decidan realizar por parte del operador para garantizar la estabilidad de tensión del sistema.

#### 4.5. Comparación de los resultados obtenidos a través del índice $I_{ETD}$ y los índices entradas del Sistema de Inferencia Difuso

En general, el desarrollo del índice difuso propuesto en el presente trabajo ( $I_{ETD}$ ) tiene como premisa extraer las bondades que presenta cada uno de los índices considerados como entradas del sistema de inferencia difuso (voltajes, pérdidas de potencia activa ( $P_{loss}$ ), pérdidas de potencia reactiva ( $Q_{loss}$ ) e índice de flujos de potencia activa y reactiva ( $I_{pq}$ ), en cuanto a la información que proporcionen para detectar las áreas débiles del sistema respecto a la estabilidad de tensión, es así que, en principio, se esperaría que el nuevo índice presente mejor eficiencia que todos los índices de entrada. En la Tabla 4.15 se muestra un cuadro comparativo de las líneas débiles del sistema que son detectados adecuadamente por cada uno de los índices que forman parte del sistema difuso.

**Tabla 4.15:** Comparación de la detección de áreas débiles respecto a la estabilidad de tensión a través de los índices entradas del sistema difuso e índice  $I_{ETD}$

Porcentaje de coincidencia de las líneas débiles detectadas a través de los índices entradas del Sistema Difuso e índice IETD con respecto al margen de cargabilidad					
Sistema	Voltajes	Ploss	Qloss	Ipq	IETD
IEEE 14 barras	44%	68%	85%	85%	89%
IEEE 30 barras	68%	67%	83%	82%	90.7%
IEEE 118 barras	27%	65%	64%	50%	75.5%

Se puede observar claramente que el índice  $I_{ETD}$  es el indicador que presenta mayor porcentaje de detección correcta de líneas críticas respecto a la estabilidad de tensión, en comparación con los resultados obtenidos de la clasificación por contingencias realizado a través de los márgenes de cargabilidad. En los tres sistemas de prueba IEEE analizados el  $I_{ETD}$  supera el desempeño de los índices considerados como entradas del sistema de inferencia difuso.

Con la finalidad de visualizar las ventajas adicionales que presenta la detección de áreas débiles del sistema respecto de la estabilidad de tensión, a través del uso del índice difuso  $I_{ETD}$ , a continuación se presenta la clasificación por contingencias obtenida a partir de todos los índices que forman parte del sistema difuso, para los tres sistemas de prueba.



**Tabla 4.16:** Comparación de Resultados obtenidos a través del  $I_{ETD}$  y los índices entradas del Sistema Difuso para el sistema IEEE 14 barras

Comparación de los Resultados obtenidos a través del IETD y los índices entradas del Sistema de Inferencia Difuso, Sistema IEEE 14 barras																					
Clasificación	$\lambda=1$										$\lambda=1.397$								Resultado Esperado - (Margen de Cargabilidad)		
	IETD		Voltajes		Ploss inverso		Qloss inverso		Ippq		IETD		Voltajes		Ploss inverso		Qloss inverso			Ippq	
	Línea	IETD	Línea	Voltaje	Línea	Ploss	Línea	Qloss	Línea	Ippq	Línea	IETD	Línea	Voltaje	Línea	Ploss	Línea	Qloss		Línea	Ippq
1	14	0.389	12	1.010	11	0.957	11	0.927	14	0.520	11	0.278	8	0.894	11	0.906	11	0.770	14	0.206	11
2	11	0.454	13	1.010	14	0.972	14	0.939	16	0.754	17	0.330	9	0.894	14	0.937	14	0.788	17	0.382	12
3	17	0.564	15	1.012	12	0.977	12	0.948	18	0.810	14	0.335	6	0.915	12	0.946	12	0.814	18	0.391	17
4	18	0.570	16	1.012	16	0.983	17	0.953	11	0.841	12	0.338	7	0.915	16	0.961	17	0.886	16	0.435	14
5	12	0.613	18	1.012	1	0.991	19	0.985	17	0.858	18	0.386	10	0.919	1	0.978	16	0.916	19	0.531	10
6	16	0.625	19	1.012	15	0.995	18	0.987	1	0.865	19	0.410	18	0.919	15	0.989	19	0.965	1	0.577	16
7	1	0.668	1	1.016	13	0.996	16	0.989	19	0.904	16	0.428	3	0.929	13	0.991	1	0.966	8	0.586	19
8	19	0.683	14	1.016	4	0.998	10	0.990	15	0.956	1	0.441	4	0.929	4	0.994	18	0.966	10	0.642	15
9	15	0.759	17	1.016	5	0.999	20	0.991	8	1.024	15	0.464	13	0.932	8	0.998	10	0.974	11	0.647	1
10	10	0.785	8	1.020	9	0.999	4	0.995	10	1.071	10	0.476	15	0.932	5	0.998	15	0.977	15	0.662	8
11	4	0.788	9	1.020	8	0.999	5	0.998	7	1.116	8	0.541	16	0.932	9	0.998	4	0.989	7	0.691	4
12	20	0.790	6	1.031	2	0.999	9	0.998	6	1.157	4	0.547	19	0.932	2	0.998	20	0.990	6	0.716	20
13	5	0.796	7	1.031	6	1.000	8	0.998	9	1.183	9	0.552	12	0.933	6	0.999	8	0.995	4	0.726	18
14	13	0.797	10	1.032	3	1.000	15	0.998	4	1.188	6	0.563	5	0.934	3	1.000	5	0.995	9	0.742	13
15	9	0.798	11	1.045	7	1.000	2	0.998	2	1.206	7	0.566	2	0.939	7	1.000	9	0.996	2	0.746	7
16	8	0.798	5	1.047	19	1.000	6	0.999	3	1.206	5	0.581	1	0.944	19	1.000	2	0.996	3	0.751	9
17	2	0.799	3	1.047	10	1.000	7	1.000	13	1.219	3	0.587	14	0.944	17	1.000	6	0.998	5	0.773	5
18	6	0.800	4	1.047	17	1.000	3	1.000	5	1.227	2	0.605	17	0.944	10	1.000	7	1.000	20	0.949	2
19	3	0.803	20	1.048	18	1.000	1	1.008	20	1.388	13	0.728	20	0.946	18	1.000	3	1.000	13	0.972	6
20	7	0.803	2	1.053	20	1.000	13	1.025	12	1.638	20	0.737	11	1.001	20	1.000	13	1.006	12	1.433	3

Clasificación	$\lambda=1.715$										Resultado Esperado - (Margen de Cargabilidad)
	IETD		Voltajes		Ploss inverso		Qloss inverso		Ippq		
	Línea	IETD	Línea	Voltaje	Línea	Ploss	Línea	Qloss	Línea	Ippq	
1	12	0.101	8	0.537	11	0.738	11	0.252	14	-0.152	11
2	11	0.102	9	0.537	14	0.818	14	0.291	17	-0.111	12
3	17	0.105	6	0.588	12	0.859	12	0.436	18	-0.054	17
4	14	0.105	7	0.588	16	0.889	17	0.621	16	0.040	14
5	16	0.155	3	0.596	1	0.937	16	0.687	19	0.056	10
6	19	0.214	4	0.596	15	0.972	1	0.830	8	0.060	16
7	18	0.215	10	0.599	13	0.978	18	0.870	10	0.087	19
8	10	0.235	18	0.599	4	0.980	19	0.871	1	0.111	15
9	1	0.259	2	0.613	8	0.989	10	0.901	7	0.117	1
10	20	0.260	5	0.613	2	0.993	15	0.917	4	0.121	8
11	15	0.276	19	0.660	9	0.994	4	0.960	6	0.123	4
12	4	0.371	20	0.660	5	0.994	13	0.961	2	0.124	20
13	8	0.395	17	0.661	6	0.998	8	0.976	9	0.128	18
14	13	0.406	13	0.716	7	0.999	20	0.981	3	0.141	13
15	2	0.421	15	0.716	3	0.999	2	0.986	5	0.172	7
16	9	0.423	16	0.716	10	1.000	9	0.987	15	0.210	9
17	5	0.426	12	0.716	17	1.000	5	0.988	11	0.260	5
18	6	0.435	1	0.748	18	1.000	6	0.996	20	0.377	2
19	7	0.436	14	0.748	19	1.000	7	0.998	13	0.416	6
20	3	0.438	11	0.887	20	1.000	3	0.999	12	0.473	3

**Tabla 4.17:** Comparación de Resultados obtenidos a través del  $I_{ETD}$  y los índices entradas del Sistema Difuso para el sistema IEEE 30 barras

Comparación de los Resultados obtenidos a través del IETD y los índices entradas del Sistema de Inferencia Difuso, Sistema IEEE 30 barras (20 elementos más críticos)																						
Clasificación	$\lambda=1$										$\lambda=1.072$										Resultado Esperado - (Margen de Cargabilidad)	
	IETD		Voltajes		Ploss inverso		Qloss inverso		I <sub>pq</sub>		IETD		Voltajes		Ploss inverso		Qloss inverso		I <sub>pq</sub>			
	Línea	IETD	Línea	Voltaje	Línea	Ploss	Línea	Qloss	Línea	I <sub>pq</sub>	Línea	IETD	Línea	Voltaje	Línea	Ploss	Línea	Qloss	Línea	I <sub>pq</sub>		Línea
1	2	0.385	38	0.992	1	0.948	1	0.903	5	0.490	1	0.369	38	0.985	1	0.940	1	0.878	5	0.436	1	
2	5	0.394	39	0.992	2	0.969	5	0.920	2	0.617	2	0.380	39	0.985	2	0.964	5	0.900	2	0.571	5	
3	1	0.431	34	1.000	5	0.971	2	0.930	6	0.715	5	0.419	34	0.994	5	0.966	2	0.912	6	0.675	2	
4	6	0.544	8	1.002	6	0.981	15	0.953	12	0.801	6	0.453	37	0.998	6	0.978	15	0.947	12	0.765	4	
5	15	0.559	9	1.002	3	0.990	6	0.980	1	0.811	15	0.510	8	1.000	3	0.988	6	0.971	1	0.778	36	
6	36	0.562	37	1.003	4	0.991	11	0.984	3	0.843	36	0.565	9	1.000	4	0.990	11	0.980	15	0.798	15	
7	12	0.573	36	1.007	7	0.994	4	0.984	15	0.846	12	0.574	36	1.004	7	0.993	4	0.980	3	0.812	6	
8	9	0.644	40	1.007	9	0.996	7	0.987	36	0.857	11	0.596	40	1.004	9	0.996	7	0.983	36	0.824	7	
9	11	0.653	41	1.007	18	0.998	36	0.987	11	0.895	7	0.632	41	1.004	18	0.998	12	0.985	38	0.866	9	
10	7	0.661	5	1.010	8	0.998	12	0.987	38	0.897	39	0.636	10	1.008	8	0.998	36	0.985	11	0.867	14	
11	3	0.668	10	1.010	38	0.998	14	0.992	9	0.909	4	0.656	6	1.008	38	0.998	13	0.990	9	0.891	3	
12	38	0.669	6	1.010	27	0.999	13	0.995	7	0.922	3	0.660	7	1.008	27	0.999	14	0.990	7	0.903	38	
13	39	0.727	7	1.010	10	0.999	18	0.996	39	0.938	9	0.668	11	1.008	10	0.999	18	0.995	39	0.910	11	
14	4	0.737	11	1.010	37	0.999	38	0.997	4	0.950	38	0.678	12	1.008	37	0.999	38	0.996	4	0.930	16	
15	37	0.785	12	1.010	25	0.999	27	0.998	37	0.975	37	0.758	3	1.009	25	0.999	27	0.997	37	0.950	13	
16	18	0.790	3	1.012	17	0.999	25	0.998	10	0.989	13	0.785	4	1.009	17	0.999	25	0.998	10	0.976	37	
17	14	0.792	4	1.012	41	0.999	37	0.998	41	0.994	14	0.785	15	1.009	41	0.999	37	0.998	41	0.982	10	
18	10	0.795	15	1.012	19	1.000	17	0.999	34	1.004	18	0.788	5	1.010	28	0.999	16	0.998	34	0.982	18	
19	27	0.797	33	1.017	28	1.000	16	0.999	40	1.045	10	0.789	33	1.013	31	0.999	17	0.998	40	1.036	12	
20	8	0.797	35	1.017	31	1.000	19	0.999	14	1.084	41	0.794	35	1.013	19	0.999	28	0.999	32	1.075	41	

Clasificación	$\lambda=1.129$										Resultado Esperado - (Margen de Cargabilidad)
	IETD		Voltajes		Ploss inverso		Qloss inverso		I <sub>pq</sub>		
	Línea	IETD	Línea	Voltaje	Línea	Ploss	Línea	Qloss	Línea	I <sub>pq</sub>	
1	1	0.334	38	0.965	1	0.933	1	0.858	5	0.373	1
2	2	0.366	39	0.965	2	0.959	5	0.879	2	0.530	5
3	5	0.397	34	0.975	5	0.961	2	0.894	6	0.619	2
4	6	0.412	37	0.979	6	0.974	15	0.940	12	0.693	4
5	15	0.463	8	0.983	3	0.987	6	0.960	15	0.715	36
6	4	0.564	9	0.983	4	0.989	4	0.976	1	0.749	15
7	11	0.564	36	0.989	7	0.992	11	0.978	36	0.750	6
8	36	0.566	40	0.989	9	0.995	7	0.981	3	0.760	7
9	12	0.568	41	0.989	18	0.997	36	0.983	38	0.791	9
10	7	0.570	5	0.991	38	0.998	12	0.983	11	0.800	14
11	34	0.636	10	0.992	8	0.998	14	0.989	9	0.829	3
12	38	0.663	6	0.994	27	0.999	13	0.991	39	0.836	38
13	10	0.666	7	0.994	10	0.999	18	0.994	7	0.851	11
14	39	0.667	11	0.994	37	0.999	16	0.996	37	0.876	16
15	9	0.667	12	0.994	25	0.999	38	0.996	4	0.884	13
16	3	0.672	33	0.995	17	0.999	27	0.997	34	0.909	37
17	37	0.673	35	0.995	19	0.999	3	0.997	10	0.917	10
18	41	0.689	3	0.997	41	0.999	25	0.998	41	0.923	18
19	14	0.780	4	0.997	28	0.999	37	0.998	40	0.975	12
20	18	0.787	15	0.997	31	0.999	17	0.998	31	1.004	41

**Tabla 4.18:** Comparación de Resultados obtenidos a través del  $I_{ETD}$  y los índices entradas del Sistema Difuso para el sistema IEEE 118 barras

Comparación de los Resultados obtenidos a través del IETD y los índices entradas del Sistema de Inferencia Difuso, Sistema IEEE 118 barras (20 elementos más críticos)																					
Clasificación	$\lambda=1$										$\lambda=1.624$										Resultado Esperado - (Margen de Cargabilidad)
	IETD		Voltajes		Ploss inverso		Qloss inverso		I <sub>pq</sub>		IETD		Voltajes		Ploss inverso		Qloss inverso		I <sub>pq</sub>		
	Línea	IETD	Línea	Voltaje	Línea	Ploss	Línea	Qloss	Línea	I <sub>pq</sub>	Línea	IETD	Línea	Voltaje	Línea	Ploss	Línea	Qloss	Línea	I <sub>pq</sub>	
1	8	0.356	118	0.943	33	0.936	8	0.673	33	0.212	33	0.235	118	0.888	33	0.830	8	0.175	33	-0.337	8
2	33	0.359	186	0.943	116	0.952	51	0.746	38	0.274	116	0.245	186	0.888	116	0.850	33	0.306	38	-0.160	7
3	141	0.389	73	0.946	9	0.953	36	0.772	167	0.495	51	0.249	185	0.895	9	0.873	51	0.390	108	0.138	9
4	51	0.389	74	0.946	7	0.954	141	0.851	108	0.556	36	0.262	114	0.912	7	0.880	36	0.436	167	0.145	185
5	36	0.400	185	0.949	31	0.958	33	0.852	116	0.561	8	0.267	117	0.912	108	0.889	141	0.519	116	0.176	51
6	93	0.442	77	0.952	141	0.960	98	0.874	174	0.564	141	0.273	115	0.923	38	0.893	31	0.555	164	0.271	163
7	71	0.448	79	0.952	38	0.960	99	0.874	41	0.568	163	0.296	116	0.923	141	0.895	98	0.605	174	0.271	96
8	31	0.458	87	0.952	108	0.966	31	0.876	139	0.578	38	0.305	120	0.923	31	0.896	99	0.605	41	0.284	118
9	116	0.466	170	0.952	96	0.968	93	0.896	138	0.581	108	0.306	73	0.928	96	0.898	108	0.654	139	0.313	50
10	108	0.477	172	0.952	66	0.968	107	0.908	164	0.589	164	0.341	74	0.928	66	0.906	66	0.662	138	0.321	174
11	5	0.492	78	0.954	67	0.968	66	0.944	154	0.612	139	0.344	27	0.930	67	0.906	67	0.662	154	0.358	3
12	38	0.494	80	0.954	98	0.970	67	0.944	141	0.614	118	0.350	28	0.930	105	0.908	116	0.667	75	0.359	38
13	98	0.505	82	0.954	99	0.970	137	0.948	142	0.618	174	0.352	72	0.934	98	0.917	7	0.712	76	0.362	36
14	99	0.505	85	0.954	139	0.971	136	0.956	76	0.622	167	0.355	25	0.938	99	0.917	107	0.724	141	0.376	116
15	23	0.512	86	0.954	41	0.972	118	0.966	75	0.625	41	0.356	29	0.941	139	0.921	93	0.739	142	0.382	97
16	66	0.524	1	0.955	105	0.973	71	0.970	145	0.644	96	0.360	51	0.942	41	0.921	9	0.742	51	0.424	108
17	67	0.524	2	0.955	71	0.977	32	0.971	53	0.670	66	0.365	54	0.942	106	0.922	38	0.746	145	0.425	167
18	11	0.525	75	0.955	163	0.977	5	0.972	170	0.680	67	0.365	96	0.942	163	0.935	139	0.772	36	0.444	178
19	174	0.526	76	0.955	167	0.978	4	0.972	172	0.687	138	0.366	147	0.942	167	0.939	105	0.773	71	0.478	33
20	142	0.527	84	0.955	106	0.978	127	0.975	71	0.702	31	0.368	156	0.942	71	0.943	136	0.812	53	0.493	29

Clasificación	$\lambda=1.129$										Resultado Esperado - (Margen de Cargabilidad)
	IETD		Voltajes		Ploss inverso		Qloss inverso		I <sub>pq</sub>		
	Línea	IETD	Línea	Voltaje	Línea	Ploss	Línea	Qloss	Línea	I <sub>pq</sub>	
1	96	0.125	27	0.855	33	0.683	7	-0.614	33	-0.847	8
2	51	0.142	28	0.855	116	0.711	9	-0.588	38	-0.471	7
3	38	0.143	25	0.858	9	0.770	8	-0.478	108	-0.253	9
4	116	0.186	59	0.858	108	0.772	33	-0.446	116	-0.142	185
5	8	0.187	60	0.858	7	0.781	96	-0.367	167	-0.089	51
6	36	0.187	118	0.860	66	0.790	38	-0.208	41	0.014	163
7	33	0.215	186	0.860	67	0.790	51	-0.132	164	0.064	96
8	108	0.215	51	0.864	96	0.791	36	0.000	174	0.101	118
9	141	0.224	54	0.864	105	0.804	66	0.136	51	0.104	50
10	163	0.224	96	0.864	38	0.809	67	0.136	139	0.105	174
11	71	0.234	61	0.869	141	0.823	141	0.151	75	0.107	3
12	41	0.254	44	0.875	31	0.824	108	0.159	138	0.116	38
13	9	0.262	48	0.875	106	0.835	31	0.186	76	0.118	36
14	7	0.262	24	0.881	41	0.838	98	0.240	36	0.165	116
15	66	0.262	26	0.881	98	0.846	99	0.240	154	0.168	97
16	67	0.262	45	0.881	99	0.846	116	0.250	53	0.185	108
17	105	0.262	29	0.882	139	0.860	107	0.367	141	0.200	167
18	53	0.263	185	0.882	163	0.877	105	0.428	142	0.209	178
19	118	0.266	46	0.883	167	0.894	139	0.519	8	0.219	33
20	31	0.270	49	0.883	119	0.894	41	0.521	71	0.248	29

Las Tablas 4.16, 4.16 y 4.18 muestran la clasificación de contingencias obtenida para los sistemas IEEE de 14, 30 y 118 barras, a través de los índices considerados como entradas del sistema de inferencia difuso y del nuevo índice propuesto ( $I_{ETD}$ ) para tres de los diez niveles de carga analizados, esto es: caso base, carga media y carga crítica.

Los resultados mostrados permiten concluir que, además de mejorar la eficiencia en la detección de áreas críticas, el  $I_{ETD}$  suministra muy buena información respecto de la criticidad real de las líneas que encabezan la clasificación por contingencias, esto se debe a que, el índice difuso presenta valores muy cercanos a cero para los elementos que, muy probablemente pudieran ocasionar la inestabilidad de tensión del sistema. Esta característica no se presenta en los demás índices analizados, ya que, para altos niveles de carga, los niveles de tensión, Ploss y Qloss, presentan valores altos (inclusive cercanos a 1) y en el caso del  $I_{pq}$  presenta valores negativos, lo cual desvirtúa la calidad de información presentada por estos índices.



En general, el nuevo índice de estabilidad de tensión  $I_{ETD}$  tiene mucho mejor desempeño que los índices considerados como entradas del sistema difuso, tanto en la detección de áreas débiles como en el propio significado físico del índice; características que permitirán al operador del sistema tomar decisiones operativas oportunas, para evitar que el sistema llegue a la inestabilidad de tensión y consecuentemente al colapso.

## CAPÍTULO V

### CONSIDERACIONES FINALES Y CONCLUSIONES

El análisis de la estabilidad de tensión ha tomado cada vez mayor importancia en el ambiente de la operación de los sistemas eléctricos de potencia, debido a que, los sistemas operan cada vez a mayores niveles de carga, como consecuencia del crecimiento continuo de la demanda de energía eléctrica. Este aspecto aumenta considerablemente la probabilidad de ocurrencia de contingencias que puedan llevar al sistema eléctrico a la inestabilidad de tensión y posterior colapso de tensión, ocasionando grandes perjuicios a los consumidores y la consecuente disminución de la calidad del servicio de energía eléctrica.

Ante este panorama se torna indispensable el monitoreo en línea del estado de operación del sistema eléctrico, con la finalidad de que, el operador sea capaz de determinar las contingencias más críticas y con ello tomar las decisiones óptimas en cortos tiempos que impidan la ocurrencia de eventos puedan provocar la inestabilidad de tensión del sistema.

El cálculo de los márgenes de cargabilidad permite establecer la distancia (en términos de carga) entre el punto de operación actual y el punto de colapso para cada una de las contingencias simples posibles, lo cual permite realizar una clasificación por contingencias y, con ello, determinar las áreas más críticas, cuyas salidas de operación pueden provocar la inestabilidad de tensión. Sin embargo, este indicador requiere grandes esfuerzos computacionales y consecuentemente elevados tiempos de cálculo, lo cual impide su aplicación en el ambiente de la operación en línea de los sistemas eléctricos.

Ante la imposibilidad de calcular los márgenes de cargabilidad en tiempo real y, debido a que no existe un indicador que, en corto tiempo sea capaz de detectar de forma eficiente las áreas débiles de un sistema eléctrico respecto de la estabilidad de tensión, en este trabajo se ha propuesto el desarrollo de un nuevo índice difuso de estabilidad de tensión, el mismo que, a través del uso de la Lógica Difusa, extrae las ventajas que presentan algunos índices de estabilidad propuestos en la literatura, en tiempos de cálculo razonables.

Como resultado de la aplicación de este índice se obtiene una clasificación de las contingencias críticas que con mayor severidad pueden provocar la inestabilidad de tensión, lo cual permitirá que el operador del sistema realice un estudio particular de cada una de estas contingencias, y de ser el caso, planificar las acciones de control necesarias para garantizar la estabilidad de tensión del sistema.

A continuación se presentan las conclusiones a las cuales se ha llegado luego de finalizado el presente trabajo:

- Fue posible utilizar la Lógica Difusa para el desarrollo de un nuevo índice de estabilidad de tensión, el mismo que, al ser obtenido en tiempos de cálculo razonables, es aplicable al análisis de seguridad de los sistemas eléctricos en tiempo real.
- El cálculo del índice de estabilidad de tensión difuso ( $I_{ETD}$ ) en los sistemas de prueba de la IEEE (de 14, 30 y 118 barras) permite realizar una clasificación de las contingencias más severas del sistema, las cuales al ocurrir, pueden provocar la inestabilidad de tensión y posterior colapso del sistema.
- La clasificación de contingencias obtenida a través del índice de estabilidad de tensión difuso ( $I_{ETD}$ ) permite detectar de forma eficiente las áreas débiles de un sistema eléctrico respecto a la estabilidad de tensión. En los sistemas IEEE de 14, 30 y 118 barras analizados se ha detectado correctamente el: 89%, 90.7% y 75.5% de las contingencias críticas respectivamente.
- El nuevo índice de estabilidad de tensión presenta mejores resultados que los obtenidos a través de los índices de estabilidad de tensión considerados como entradas del sistema de inferencia difuso, ya que, en todos los sistemas analizados, el índice ( $I_{ETD}$ ) presenta el mayor porcentaje de detección correcta de áreas débiles respecto a la estabilidad de tensión.
- El nuevo índice de estabilidad de tensión propuesto supera de alguna manera la no linealidad presentada por la mayor parte de índices de estabilidad de tensión propuestos en la literatura, ya que, la clasificación de contingencias obtenida para condiciones de incremento continuo del nivel de carga, presenta muy poca variación, especialmente en los elementos más críticos del sistema desde el punto de vista de la estabilidad de tensión.
- Se realizó el análisis de los resultados presentados por el índice de estabilidad de tensión difuso para varias condiciones de carga, desde el caso base hasta el valor de máxima cargabilidad, obteniéndose que, los mejores resultados se obtienen cuando el punto de operación se encuentra cerca del límite de estabilidad de tensión.
- Se pudo determinar que, el rendimiento del índice de estabilidad propuesto disminuye cuando se aplica a grandes sistemas eléctricos, sin embargo, el porcentaje de coincidencia de contingencias críticas (comparado con el obtenido a través del margen de cargabilidad) es bastante adecuado, llegando al 75.5% para el sistema IEEE 118 barras.
- La eficiencia del índice de estabilidad de tensión propuesto depende directamente del comportamiento de cada uno de los índices de estabilidad considerados como entradas del sistema de inferencia difuso. En este caso el índice que presentó el comportamiento menos eficiente corresponde a los niveles de tensión.



Como sugerencias para futuros trabajos de investigación, se puede indicar que los siguientes aspectos son susceptibles de análisis:

Estudiar el efecto de la aplicación de otros indicadores de estabilidad de tensión en el sistema de inferencia difuso propuesto.

Es posible analizar la aplicación de la metodología propuesta en los análisis de estabilidad de ángulo y estabilidad de frecuencia. Es recomendable que se aplique esta metodología en sistemas mayores a 500 nodos, con el fin de verificar su aplicación en sistemas de gran tamaño.



---

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] P. Kundur, "Power system stability and control", McGraw-Hill, 1994.
- [2] A. Expósito (editor), "Análisis y operación de sistemas de energía eléctrica, McGraw-Hill, 2003.
- [3] A. Expósito, A. Conejo, C. Cañizares, "Electric energy systems: analysis and operation", CRC Press, 2009.
- [4] T. Van Cutsem, C.Vournas, "Voltage stability in power systems", ISBN 0-7923-8139-4, Kluwer Academic Publishers, Boston, 1998.
- [5] V. Ajarapu, "Computacional techniques for voltage stability assessment and control", Iowa State University - USA, 2006.
- [6] D. Bedoya, "Obtenção da margem minima de estabilidade de tensão de sistemas eletricos de potencia", M Sc. Tesis, UNICAMP, Brasil, 2007.
- [7] A. Quintela, "Estudo de indices de proximidade ao limite de estabilidade de tensão e aplicação na seleção de contingencias", M Sc. Tesis, UNICAMP, Brasil, 2002.
- [8] C. Cañizares, "Voltage Stability Assessment: Concepts, Practices and Tools", IEEE-PES Power System Stability Subcommittee Special Publication, SP101PSS, August 2002.
- [9] S. Torres, "Evaluación de la estabilidad de tensión usando modelos neuro difusos", PHD Tesis, Universidad Nacional de San Juan, 2007.
- [10] E. Niño, "Estudo do fluxo de carga da continuacao: parametricao automática por perdas de potencia ativa em ramos", M Sc. Tesis, UNICAMP, Brasil, 2004.
- [11] A. Monticelli, "Fluxo de carga em redes de energía eléctrica", Editorial Edgar Bucher Ltda, Brasil, 1983.
- [12] Mario de Almeida e Albuquerque, "Selecao de contingencias com relacao a estabilidade de tensao para análise de seguridad em tiempo real", M Sc. Tesis, UNICAMP, Brasil, 2005.
- [13] The MathWorks, "Fuzzy Logic Toolbox User's Guide for Use with MATLAB".
- [14] Sivanandan S., Sumathi S., Deepa S., "Introduction to Fuzzy Logic using Matlab", Springer, 2007
- [15] IEEE-CIGRE classification (IEEE/CIGRE Join Task Force on Stability Terms and Definitions, "Definitions and Classification of Power Systems





- Stability”, IEEE Trans. Power Systems and CIGRE Technical Brochure 231, 2003).
- [16] J. Candelo, G. Caicedo, F. Castro, “Métodos para el estudio de la estabilidad de voltaje en sistemas de potencia”, paper, 2008.
- [17] F. Milano, “Power System Analysis Toolbox Documentation for PSAT version 1.3.4”, July 14, 2005.
- [18] <http://www.ee.washington.edu/research/pstca/>
- [19] P.A. LOF, G. Andersson y D. Hill, “Voltage stability indices for stressed power systems”, IEEE Trans. Power Systems, 1992, pp. 54-64.
- [20] B. Gao, G. K. Morison, y P. Kundur, “Voltage stability evaluation using modal analysis”. Presented at the IEEE/PES Summer Meeting, 1991.
- [21] J. Carpentier, R. Girard, y E. Scano, “Voltage collapse proximity indicators computed from at optimal power flow”. Presented at the 8<sup>th</sup> Conference at Power System Computation, 1984.
- [22] M. Rodríguez Castillo, “Sistema de Inferencia Difusa de Mamdani”, Fundación Universitaria Konrad Lorenz, Colombia, 2005.
- [23] F. Chevie, F. Guély, “Cuaderno Técnico de Schneider Electric Nro. 191: La Lógica Difusa”, 2002.
- [24] I. Misurin, T. K. Abdul Rahman, “Estimating maximum loadability for weak bus Identification using FVSI”, IEEE power engineering review, 2002.
- [25] Han Li, Y. H. Song, “Identification of weak busbar in large scale power system”, IEEE Transactions, 2002.
- [26] S. Green, I. Dobson, F. Alvarado, “Contingency ranking for voltage collapse via sensitivities from a single nose curve”, IEEE Transactions on power systems, Vol 14, Nro. 1, Febrero 1999.
- [27] C. Subramani, S. Sekhar Dash, M. Arun Bhaskar, M. Jagdeshkumar, “Simulation technique for voltage Stability analysis and contingency ranking in power systems”, International Journal of Recent Trends in Engineering, Vol 2, Nro. 5, Noviembre 2009.
- [28] T. He, S. Kolluri, S. Mandal, F. Galvan, P. Rastgoufard, “Identification of weak locations in bulk transmission systems using Voltage Stability Margin Index”, 8<sup>th</sup> International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, Iowa State University, Ames, Iowa, Septiembre 2004.

---

## APENDICE A: LA LÓGICA DIFUSA

### .A.1. Introducción

La Lógica Difusa es una herramienta de inteligencia artificial que permite obtener resultados a partir de una información altamente imprecisa, ambigua, vaga, incompleta y subjetiva. En la Lógica Clásica, el resultado de una afirmación solamente puede tener dos alternativas: VERDADERA o FALSA, sin embargo, en el campo de la Lógica Difusa, existe una variedad de opciones para definir el resultado de una afirmación.

Muchos de los conceptos que manejamos a menudo, no tienen una definición clara y precisa, por ejemplo: ¿A partir de qué altura se considera como alta a una persona?, ¿Cuál es el umbral para definir como viejo a un individuo?, ¿Cuándo es caro un producto? etc. Todas las respuestas que podamos dar a las preguntas planteadas dependen de la subjetividad de quién las contesta; es por esta razón que, la Lógica Difusa trata de dar una respuesta matemática a la imprecisión y a la ambigüedad, asignando un grado de pertenencia a un conjunto de elementos determinado.

Esta herramienta matemática no busca sustituir a la Lógica Clásica sino más bien ser un complemento a ella, la cual permita buscar soluciones mucho más reales, que si bien no disponen de un alto grado de exactitud, nos permitan tomar decisiones adecuadas en situaciones de bastante complejidad cuya resolución represente tiempos elevados de cálculo y utilizar modelos de alto nivel de dificultad; es por esta razón que debemos tener clara la respuesta a la siguiente interrogante, ¿Cuándo usar Lógica Difusa?. Existen varias condiciones en las cuales el uso de la Lógica Difusa representa una gran ventaja, estos son:

- En procesos complejos, cuyo modelo de solución sea muy complejo
- En procesos no lineales
- Cuando sea necesario introducir la experiencia de un operador “experto” que se base en conceptos imprecisos obtenidos de su experiencia
- Cuando ciertas partes del sistema a controlar son desconocidas y no puedan medirse de forma confiable
- Cuando el ajuste de una variable puede producir el desajuste de otras
- De forma general, cuando se requieran representar y operar con conceptos que tengan imprecisión o incertidumbre.

### .A.2. Definiciones

A diferencia de los conjuntos clásicos, la Lógica Difusa incorpora una serie de elementos adicionales que relacionan los distintos elementos de un conjunto de

acuerdo a un grado de pertenencia a través del cual se relacionan cada uno de ellos con un conjunto determinado, es por esta razón que, a continuación se hace referencia a los conceptos y definiciones de los principales aspectos que forman parte de un Sistema Difuso.

### .A.3. Los Conjuntos Difusos

Un conjunto difuso se define como un conjunto de elementos que tienen un determinado grado de pertenencia definido por la **Función de Pertenencia**, el cual enlaza o empareja los elementos de un dominio o Universo  $X$  con elementos del intervalo  $[0,1]$ .

Dado, el conjunto de elementos clásicos  $X$ , llamado Universo, cuyos elementos genéricos se denotan por  $x$ , para un sistema clásico, la función de pertenencia para un subconjunto de  $A$  de  $X$  es definida por una función característica  $\mu_A(X)$ , tal que :

$$\begin{aligned}\mu_A(X) &= 1, & \text{si y solo si } x \in A \\ \mu_A(X) &= 0, & \text{si y solo si } x \notin A\end{aligned}$$

El conjunto  $\{0,1\}$  es llamado el conjunto de validación.

Si el conjunto de validación corresponde a valores reales pertenecientes dentro del conjunto  $\{0,1\}$ ,  $A$  es un Conjunto Difuso.

#### .A.3.1. Funciones de Pertenencia

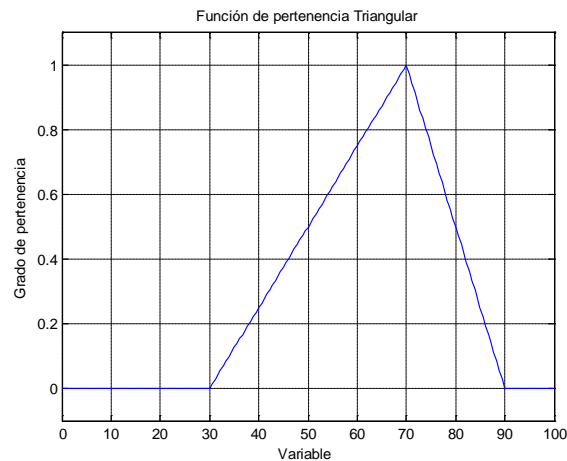
Los conjuntos difusos están definidos por su función de pertenencia, la cual corresponde a la noción de “función característica” en la lógica clásica; es decir es una función matemática que relaciona los elementos del conjunto con los elementos del intervalo  $[0,1]$ . A continuación se describen algunas de las funciones de pertenencia más utilizadas [9].

#### Función de Pertenencia Triangular

La función de pertenencia triangular está definido por tres parámetros  $\{a, b, c\}$  de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\mathit{triangular}(x: a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{b-x}, & b \leq x \leq c \\ 0, & x \geq c \end{cases} \quad (\text{B.1})$$

Donde  $a < b < c$ . En este caso los parámetros  $\{a, b, c\}$  definen los vértices de la función triangular. En la siguiente figura se muestra la función de pertenencia tipo triangular.



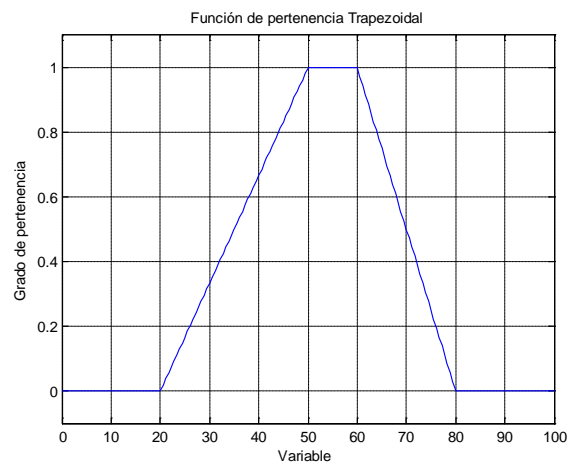
**Fig. A.1** Función de pertenencia triangular

### Función de Pertenencia Trapezoidal

La función de pertenencia trapezoidal está definida por cuatro parámetros  $\{a, b, c, d\}$ , los cuales forman la siguiente función:

$$\text{trapezoidal}(x: a, b, c, d) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, & c \leq x \leq d \\ 0, & x \geq d \end{cases} \quad (\text{B.2})$$

Donde:  $a < b < c < d$  y corresponden a los vértices del trapecio formado por los parámetros característicos de la función, lo cual se puede apreciar en la siguiente figura.



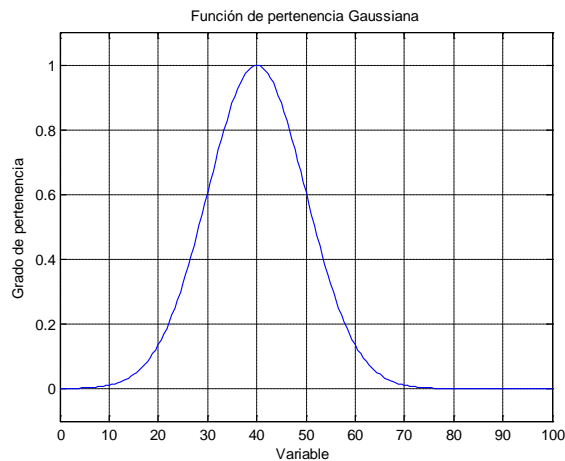
**Fig. A.2** Función de pertenencia trapezoidal

## Función de Pertenencia Gaussiana

La función de pertenencia gaussiana está definida por dos parámetros  $\{c, \sigma\}$  a través de la siguiente expresión:

$$gaussiana(x, c, \sigma) = e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-c}{\sigma}\right)^2} \quad (B.3)$$

La función de pertenencia gaussiana tiene la siguiente forma:



**Fig. A.3** Función de pertenencia gaussiana

Donde:

$c$ =centro de la función de pertenencia

$\sigma$ = ancho de la función de pertenencia

## Función de Pertenencia Campana generalizada (Cauchy)

La función de pertenencia campana generalizada es definida por los parámetros  $\{a, b, c\}$  de la siguiente forma:

$$campana(x, a, b, c) = \frac{1}{1 + \left|\frac{x-c}{a}\right|^{2b}} \quad (B.4)$$

La función de pertenencia campana generalizada es la siguiente:

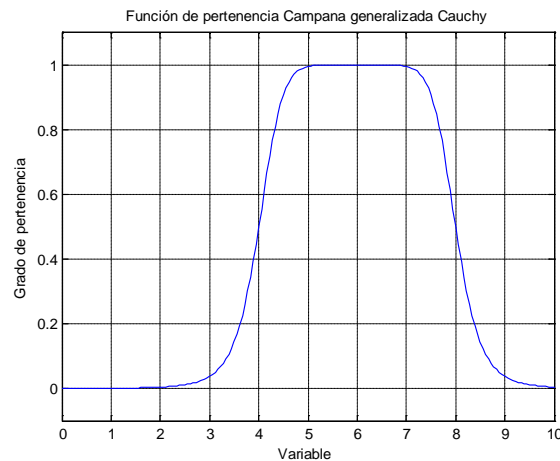


Fig. A.4 Función de pertenencia campana generalizada (Cauchy)

#### .A.3.1.1. Características de las Funciones de Pertenencia

La característica de una función de pertenencia está definida por tres propiedades, que son [14]:

- Soporte
- Corteza
- Límite

##### Soporte

El soporte de un conjunto difuso  $A$  es el conjunto de todos los puntos  $x$  en  $X$  tales que  $\mu_A(x) > 0$ .

##### Corteza

La corteza de un conjunto difuso  $A$  es el conjunto de todos los puntos  $x$  en  $X$  tales que  $\mu_A(x) = 1$ .

##### Límite

El límite de un conjunto difuso  $A$  es el conjunto de todos los puntos  $x$  en  $X$  tales que  $0 < \mu_A(x) < 1$ .

Estas tres propiedades de los conjuntos difusos pueden ser apreciadas gráficamente en la siguiente figura:

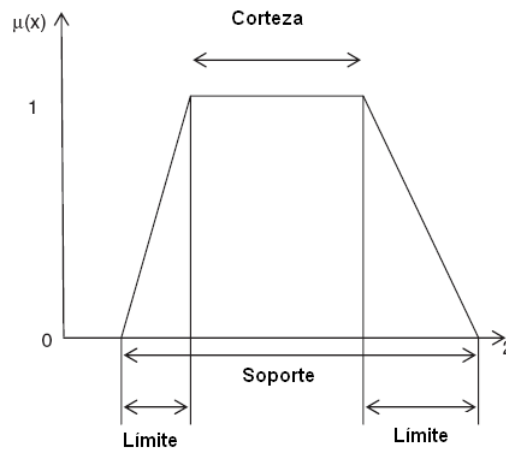


Fig. A.5 Propiedades de los conjuntos difusos.

### .A.3.1.2. Operaciones con Conjuntos Difusos

De igual forma que en la lógica clásica, dentro de la lógica difusa se tienen varias operaciones entre conjuntos, de las cuales las más utilizadas e importantes son: intersección, unión y complemento.

#### Intersección

El operador lógico correspondiente a la intersección de conjuntos es “Y”; la intersección de dos conjuntos difusos  $A$  y  $B$  es un conjunto difuso  $C$  cuya función de pertenencia relaciona  $A$  y  $B$  mediante la siguiente expresión:

$$\mu_C(x) = \mu(A \text{ Y } B) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x))$$

#### Unión

El operador lógico correspondiente a la intersección de conjuntos es “O”; la unión de dos conjuntos difusos  $A$  y  $B$  es un conjunto difuso  $C$  cuya función de pertenencia relaciona  $A$  y  $B$  mediante la siguiente expresión:

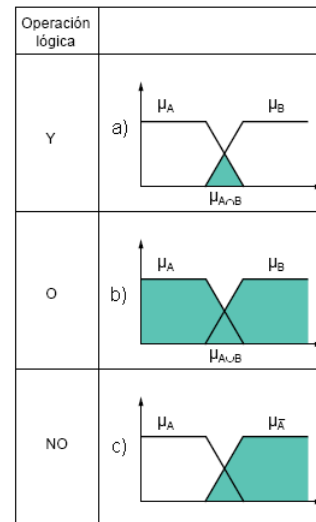
$$\mu_C(x) = \mu(A \text{ O } B) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x))$$

#### Complemento

El operador lógico correspondiente al complemento es la negación; el complemento de un conjunto difuso  $A$  se define de la siguiente forma:

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

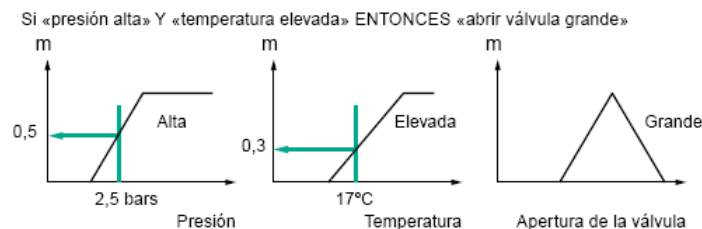
En la figura A.6 se muestran gráficamente las tres operaciones sobre conjuntos difusos indicadas, la misma que es tomada de la referencia [23].



**Fig. A.6** Operaciones sobre conjuntos difusos: a) Conjunto Difuso A Y B (Intersección); b) Conjunto difuso A O B (Unión) c) Conjunto difuso  $\bar{A}$  (negación de A) [23].

### .A.3.1.3. Fusificación

La fusificación es el proceso por medio del cual, los valores reales son convertidos en valores difusos, con la finalidad de representar la característica de imprecisión. La conversión a valores difusos es representada a través de las funciones de pertenencia; es decir, a través del proceso de fuzzificación se evalúan las funciones de pertenencia de las entradas del sistema, tal como se aprecia en la siguiente figura.



**Fig. A.7** Fusificación.

En este ejemplo, como resultado del proceso de fusificación para una de las entradas del sistema se tiene que, al tenerse una presión alta (2.5 bars) corresponde a un valor de 0.5 en la función de pertenencia correspondiente.

### .A.3.2. Reglas Difusas

Las reglas difusas son la base de la Lógica Difusa para obtener una salida difusa; estas reglas son el fruto del análisis y conocimiento previo del desarrollador del sistema respecto de las variables o fenómeno a estudiarse. Las reglas difusas generalmente tienen la de forma: **Si A- Entonces B**, donde A y B son etiquetas lingüísticas de conjuntos difusos caracterizados por funciones de pertenencia



adecuadas [9]. Estas reglas son empleadas para capturar modos imprecisos de razonamiento que permiten tomar decisiones en un ambiente de incertidumbre e imprecisión.

Un ejemplo de la forma que tienen las reglas difusas utilizadas en el presente trabajo se cita a continuación:

**Si** las pérdidas de potencia reactiva del sistema son altas, **entonces** el margen de estabilidad de tensión es bajo

En este ejemplo,  $x$  (pérdidas de potencia reactiva) y  $A$  (alto) es llamado antecedente o premisa, mientras que  $a$  y  $B$  (bajo) se conoce como consecuente o conclusión; además, los adjetivos alto y bajo son etiquetas lingüísticas.

### .A.3.3. Sistemas de Inferencia Difusos

Los sistemas de inferencia difusos son conocidos como sistemas basados en reglas difusas, modelos difusos, memorias asociativas difusas o controladores difusos [9, 14]. Los sistemas de inferencia difusa están compuestos básicamente de 5 bloques, tal como se muestra a continuación:

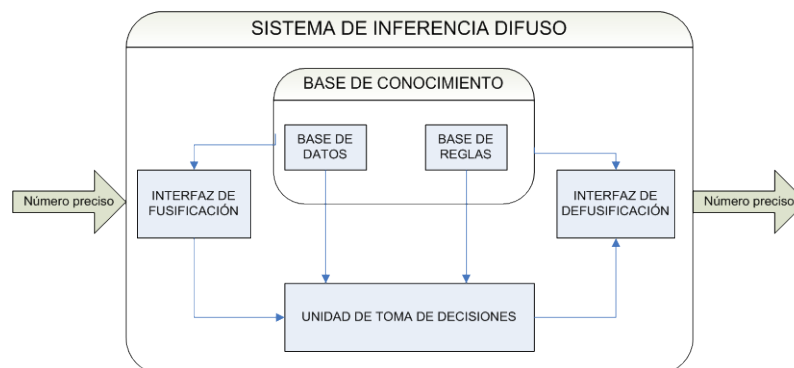


Fig. A.8 Sistema de Inferencia Difuso [9, 14].

- *Interfaz de Fusificación.*- transforma las entradas precisas en grados de correspondencia con las variables lingüísticas.
- *Base de Reglas.*- la cual contiene todas las reglas difusas “Si - entonces”.
- *Base de datos.*- en la que se encuentran definidas las funciones de pertenencia de los conjuntos difusos usados en las reglas difusas
- *Unidad de toma de decisiones.*- la cual elabora las operaciones de inferencia sobre las reglas
- *Interfaz de Defusificación.*- que transforma los resultados difusos de la inferencia en una salida precisa.

El proceso que se realiza dentro del sistema de inferencia difuso es el siguiente [14]:

- Las entradas reales son convertidas en difusas usando el método de fusificación.
- Después de realizado el proceso de fusificación, se forma la base de reglas difusas
- La base de reglas y la base de datos en conjunto son referidas a la base de conocimiento.
- La defusificación es usada para convertir valores difusos en un valor real, el cual es la salida del sistema.

Cabe indicar que existen varios tipos de sistemas de inferencia difusos, los mismos que se describen de forma breve a continuación [9]:

Modelo Tsukamoto: La salida general es el promedio ponderado entre la salida precisa de cada regla inducida por la fuerza de disparo de la regla (el producto o valor mínimo de los valores de pertenencia con la parte del antecedente) y las funciones de pertenencia de la salida; con lo cual, las funciones de pertenencia deben ser monótonas.

Modelo Mamdami: La salida difusa se obtiene aplicando la operación “max” a las salidas difusas apropiadas. Se han propuesto esquemas como el centroide de área, bisector de área, la media del máximo, el criterio del máximo, etc, para calcular la salida precisa final basada en la salida difusa general.

Modelo Sugeno: En este caso la salida de cada regla es una combinación lineal de las variables de entrada más un valor constante, y la salida final es el promedio ponderado de la salida de cada una de las reglas difusas.

El tipo de sistema de inferencia difuso más comúnmente utilizado es el modelo Mamdami, el mismo que también fue utilizado en el presente trabajo.

Los mecanismos de inferencia difusa comprenden las siguientes etapas [13].

## I. Fusificación de las entradas

El primer paso del sistema de inferencia difuso es tomar las entradas (valores reales) y determinar el grado correspondiente a cada apropiado conjunto difuso, esto se logra a través de las funciones de pertenencia; el proceso descrito corresponde a la fusificación. En la figura A.6 se puede observar gráficamente el proceso indicado.

## II. Grado de activación

Una vez que las entradas han sido fusificadas, ya se conoce el grado con que cada parte del antecedente ha sido satisfecho por cada regla. Si el antecedente de una regla difusa tiene más de una parte, el *operador difuso* es aplicado para obtener un número que represente el resultado del antecedente para cada regla. Este número será luego aplicado a la función de salida.

Como ya se indicó anteriormente, las operaciones más utilizadas son “Y” u “O”. Dentro de la Herramienta de Lógica Difusa incorporada en MATLAB, a la operación “Y” se pueden aplicar dos métodos: *min* (mínimo) y *prod* (producto); adicionalmente, dentro de la operación “O” también se pueden aplicar dos métodos: *max* (máximo) y *probor* (OR probabilístico); este último método (*probor*), conocido como suma algebraica es calculado de la siguiente forma

$$\text{probor}(a,b)=a+b-ab$$

Una vez determinado el operador difuso ha sido aplicado, se debe asignar el “peso” a cada regla difusa. El peso de las reglas es un número entre 0 y 1, el cual es aplicado al número dado por el antecedente. Generalmente este peso es 1 y no implica ningún efecto en siguiente proceso (proceso de implicación); sin embargo, su aplicación o no, se debe analizar en cada una de las reglas difusas.

### III. Implicación

La consecuencia de una regla es un conjunto difuso representado por una función de pertenencia, la misma que es reconfigurada usando una función asociada con el antecedente (un número simple). La entrada del proceso de implicación es un número simple dado por el antecedente, y la salida es un conjunto difuso. El método de implicación es aplicado a cada regla difusa. En la Herramienta de Lógica Difusa de MATLAB dos métodos son admitidos: *min* (mínimo), el cual trunca el conjunto difuso de la salida, y *prod* (producto), el cual escala el conjunto difuso de la salida. En la figura A.9 se muestra gráficamente los resultados del método de implicación para dos reglas difusas de un sistema de ejemplo.

### IV. Agregación

La agregación es el proceso por medio del cual, los conjuntos difusos que representan la salida de cada regla difusa son combinados en un solo conjunto difuso, para cada salida del sistema. La Herramienta de Lógica Difusa dispone de tres métodos: *max* (máximo), *probor* (OR probabilístico) y *sum* (suma simple del conjunto salida de cada regla). En la figura A.9 se muestra el conjunto difuso obtenido como resultado luego de aplicar el método de agregación a las dos reglas difusas mostradas, luego de aplicar el método *max*.

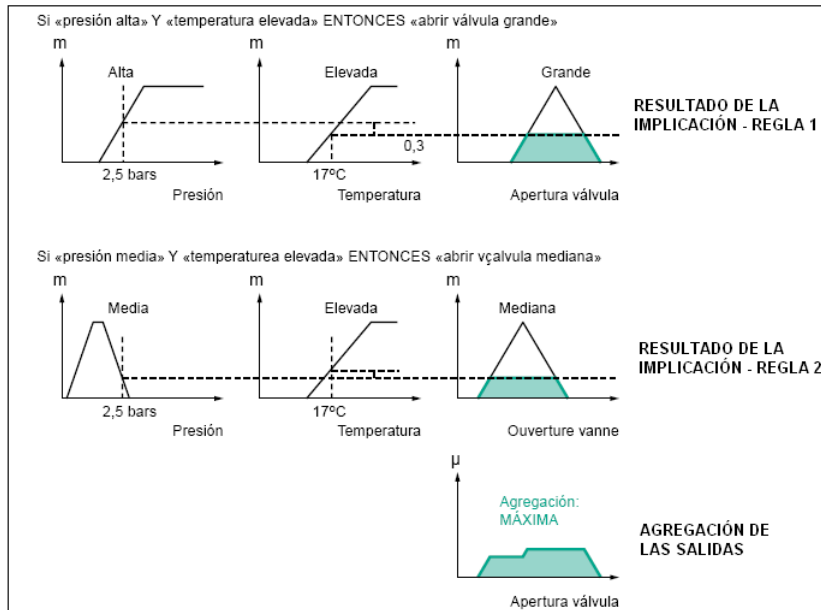


Fig. A.9 Implicación y agregación de las salidas en los sistemas de inferencia difusos [23].

## V. Defusificación

La entrada del proceso de defusificación es un conjunto difuso (el conjunto difuso resultado de la agregación de las salidas) y su salida es un número simple, es decir, es la metodología que permite convertir un conjunto difuso en un valor preciso, que representa la salida o resultado esperado del sistema de inferencia difuso.

En la Herramienta de Lógica Difusa se pueden aplicar 5 métodos de defusificación: centroide, bisector, medio del máximo, el mayor del máximo y el más pequeño del máximo; sin embargo el más utilizado es el cálculo del centroide. En la figura A. 10 se muestra el resultado del proceso de defusificación, obtenido a través del método del cálculo del centroide.

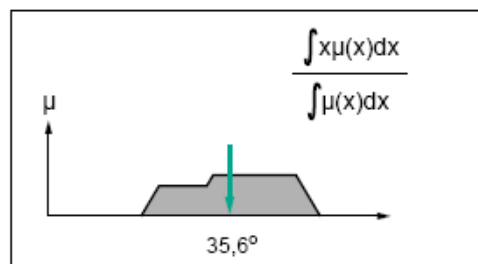


Fig. A.10 Defusificación [23].

## APENDICE B

### Datos de la red del sistema IEEE 14 barras

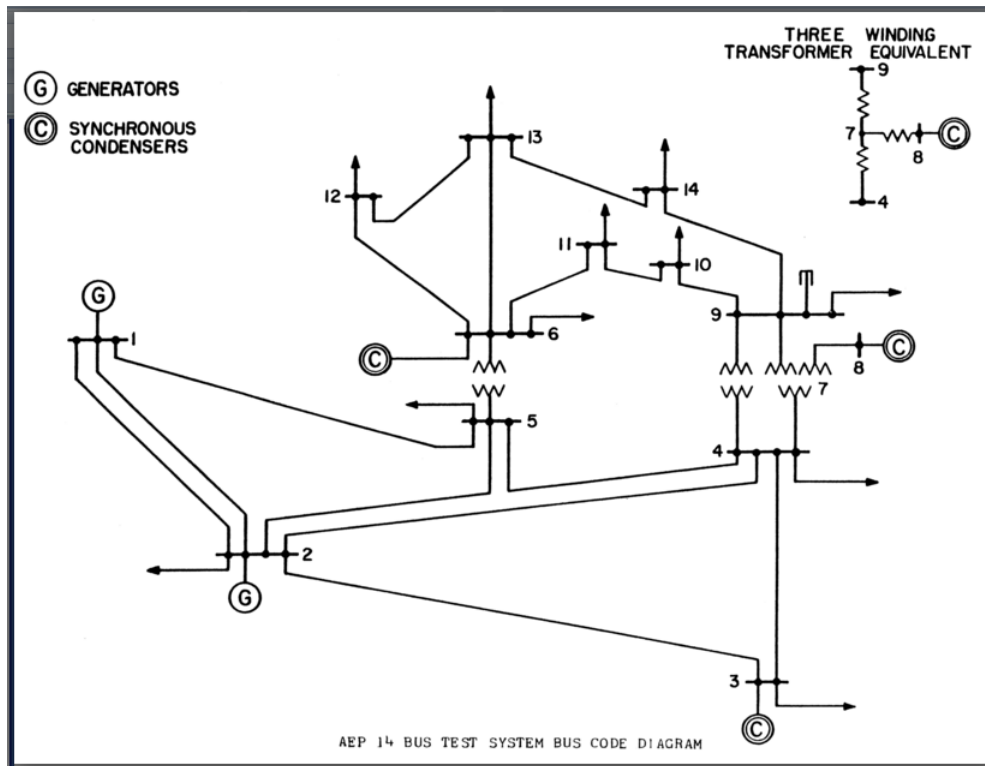


Fig. B.1- Diagrama unifilar del Sistema IEEE 14 barras [18].

**Tabla B.1-** Datos de las Líneas del Sistema IEEE 14 barras

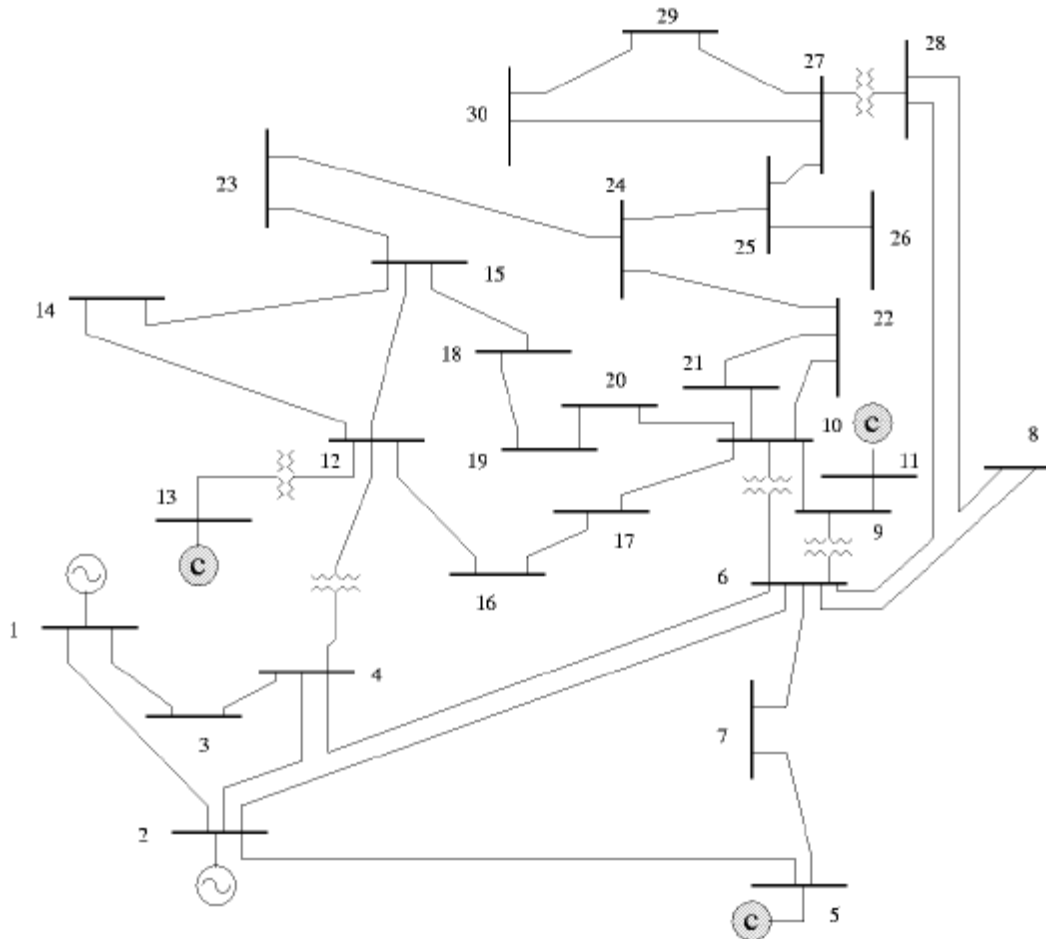
Datos de las Líneas del Sistema IEEE 14 barras							
Línea Nro.	Desde	Hasta	Resistencia (pu)	Reactancia (pu)	Suceptancia (pu)	Tipo de elemento	Tap
1	2	5	0.057	0.1739	0.034	LT	---
2	6	12	0.1229	0.2558	0	LT	---
3	12	13	0.2209	0.1999	0	LT	---
4	6	13	0.0662	0.1303	0	LT	---
5	6	11	0.095	0.1989	0	LT	---
6	11	10	0.082	0.1921	0	LT	---
7	9	10	0.0318	0.0845	0	LT	---
8	9	14	0.1271	0.2704	0	LT	---
9	14	13	0.1709	0.348	0	LT	---
10	7	9	0	0.11	0	LT	---
11	1	2	0.0194	0.0592	0.0528	LT	---
12	3	2	0.047	0.198	0.0438	LT	---
13	3	4	0.067	0.171	0.0346	LT	---
14	1	5	0.054	0.223	0.0492	LT	---
15	5	4	0.0134	0.0421	0.0128	LT	---
16	2	4	0.0581	0.1763	0.0374	LT	---
17	5	6	0	0.252	0	Trafo	0.932
18	4	9	0	0.5562	0	Trafo	0.969
19	4	7	0	0.2091	0	Trafo	0.978
20	8	7	0	0.1762	0	LT	---

**Tabla B.2-** Datos de las Barras del Sistema IEEE 14 barras

Datos de las Barras del Sistema IEEE 14 barras							
Barra	Tipo	Tensión	PL	QL	PG	Qmax	Qmin
1	V $\theta$	1.06	0	0	0.4	---	---
2	PV	1.045	0.217	0.127	0	0.5	-0.4
3	PV	1.01	0.942	0.19	0	0.4	0
4	PQ	---	0.478	0.04	0	---	---
5	PQ	---	0.076	0.016	0	---	---
6	PV	1.07	0.112	0.075	0	0.24	-0.06
7	PQ	---	0	0	0	---	---
8	PV	1.0867	0	0	0	0.24	-0.06
9	PQ	---	0.295	0.166	0	---	---
10	PQ	---	0.09	0.058	0	---	---
11	PQ	---	0.035	0.018	0	---	---
12	PQ	---	0.061	0.016	0	---	---
13	PQ	---	0.135	0.058	0	---	---
14	PQ	---	0.149	0.05	0	---	---

## APENDICE C

### Datos de la red del sistema IEEE 30 barras



**Fig. C.1-** Diagrama unifilar del Sistema IEEE 30 barras [5].

**Tabla C.1-** Datos de las Líneas del Sistema IEEE 30 barras

Datos de las Líneas del Sistema IEEE 30 barras							
Línea Nro.	Desde	Hasta	Resistencia (pu)	Reactancia (pu)	Suceptancia (pu)	Tipo de elemento	Tap
1	1	2	0.0192	0.0575	0.0528	LT	---
2	1	3	0.0452	0.1652	0.0408	LT	---
3	2	4	0.057	0.1737	0.0368	LT	---
4	3	4	0.0132	0.0379	0.0084	LT	---
5	2	5	0.0472	0.1983	0.0418	LT	---
6	2	6	0.0581	0.1763	0.0374	LT	---
7	4	6	0.0119	0.0414	0.009	LT	---
8	5	7	0.046	0.116	0.0204	LT	---
9	6	7	0.0267	0.082	0.017	LT	---
10	6	8	0.012	0.042	0.009	LT	---
11	6	9	0	0.208	0	Trafo	0.978
12	6	10	0	0.556	0	Trafo	0.969
13	9	11	0	0.208	0	LT	---
14	9	10	0	0.11	0	LT	---
15	4	12	0	0.256	0	Trafo	0.932
16	12	13	0	0.14	0	LT	---
17	12	14	0.1231	0.2559	0	LT	---
18	12	15	0.0662	0.1304	0	LT	---
19	12	16	0.0945	0.1987	0	LT	---
20	14	15	0.221	0.1997	0	LT	---
21	16	17	0.0524	0.1923	0	LT	---
22	15	18	0.1073	0.2185	0	LT	---
23	18	19	0.0639	0.1292	0	LT	---
24	19	20	0.034	0.068	0	LT	---
25	10	20	0.0936	0.209	0	LT	---
26	10	17	0.0324	0.0845	0	LT	---
27	10	21	0.0348	0.0749	0	LT	---
28	10	22	0.0727	0.1499	0	LT	---
29	21	22	0.0116	0.0236	0	LT	---
30	15	23	0.1	0.202	0	LT	---
31	22	24	0.115	0.179	0	LT	---
32	23	24	0.132	0.27	0	LT	---
33	24	25	0.1885	0.3292	0	LT	---
34	25	26	0.2544	0.38	0	LT	---
35	25	27	0.1093	0.2087	0	LT	---
36	28	27	0	0.396	0	Trafo	0.968
37	27	29	0.2198	0.4153	0	LT	---
38	27	30	0.3202	0.6027	0	LT	---
39	29	30	0.2399	0.4533	0	LT	---
40	8	28	0.0636	0.2	0.0428	LT	---
41	6	28	0.0169	0.0599	0.013	LT	---



**Tabla C.2-** Datos de las Barras del Sistema IEEE 30 barras

Datos de las Barras del Sistema IEEE 30 barras							
Barra	Tipo	Tensión	PL	QL	PG	Qmax	Qmin
1	Vθ	1.06	0.000	0.000	---	---	---
2	PV	1.043	0.217	0.127	0.40	0.50	-0.40
3	PQ	---	0.024	0.012	0.00	---	---
4	PQ	---	0.076	0.016	0.00	---	---
5	PV	1.01	0.942	0.190	0.00	0.40	-0.40
6	PQ	---	0.000	0.000	0.00	---	---
7	PQ	---	0.228	0.109	0.00	---	---
8	PV	1.01	0.300	0.300	0.00	0.40	-0.10
9	PQ	---	0.000	0.000	0.00	---	---
10	PQ	---	0.058	0.020	0.00	---	---
11	PV	1.082	0.000	0.000	0.00	0.24	-0.06
12	PQ	---	0.112	0.075	0.00	---	---
13	PV	1.071	0.000	0.000	0.00	0.24	-0.06
14	PQ	---	0.062	0.016	0.00	---	---
15	PQ	---	0.082	0.025	0.00	---	---
16	PQ	---	0.035	0.018	0.00	---	---
17	PQ	---	0.090	0.058	0.00	---	---
18	PQ	---	0.032	0.009	0.00	---	---
19	PQ	---	0.095	0.034	0.00	---	---
20	PQ	---	0.022	0.007	0.00	---	---
21	PQ	---	0.175	0.112	0.00	---	---
22	PQ	---	0.000	0.000	0.00	---	---
23	PQ	---	0.032	0.016	0.00	---	---
24	PQ	---	0.087	0.067	0.00	---	---
25	PQ	---	0.000	0.000	0.00	---	---
26	PQ	---	0.035	0.023	0.00	---	---
27	PQ	---	0.000	0.000	0.00	---	---
28	PQ	---	0.000	0.000	0.00	---	---
29	PQ	---	0.024	0.009	0.00	---	---
30	PQ	---	0.106	0.019	0.00	---	---



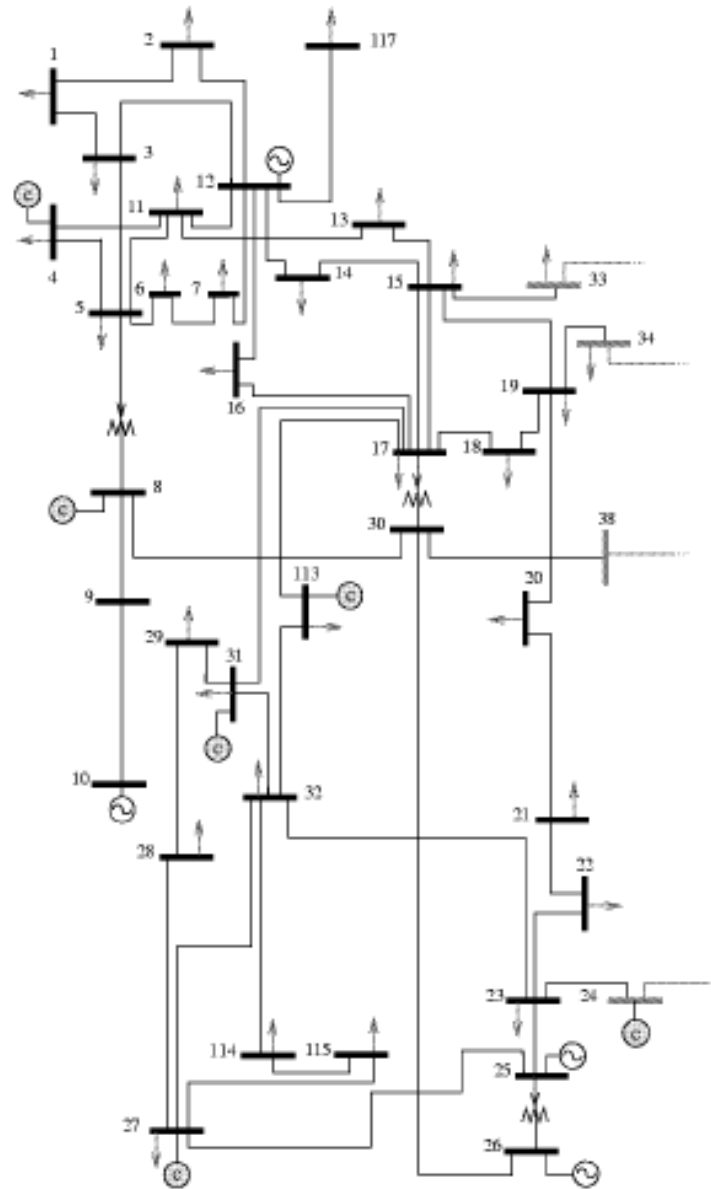


Fig. D.2- Diagrama unifilar de la parte principal del Sistema IEEE 118 barras [5].

**Tabla D.1- Datos de las Líneas del Sistema IEEE 118 barras**

Datos de las Líneas del Sistema IEEE 118 barras							
Línea Nro.	Desde	Hasta	Resistencia (pu)	Reactancia (pu)	Suceptancia (pu)	Tipo de elemento	Tap
1	1	2	0.0303	0.0999	0.0254	LT	---
2	1	3	0.0129	0.0424	0.0108	LT	---
3	4	5	0.0018	0.008	0.0021	LT	---
4	3	5	0.0241	0.108	0.0284	LT	---
5	5	6	0.0119	0.054	0.0143	LT	---
6	6	7	0.0046	0.0208	0.0055	LT	---
7	8	9	0.0024	0.0305	1.162	LT	---
8	8	5	0	0.0267	0	Trafo	0.985
9	9	10	0.0026	0.0322	1.23	LT	---
10	4	11	0.0209	0.0688	0.0175	LT	---
11	5	11	0.0203	0.0682	0.0174	LT	---
12	11	12	0.006	0.0196	0.005	LT	---
13	2	12	0.0187	0.0616	0.0157	LT	---
14	3	12	0.0484	0.16	0.0406	LT	---
15	7	12	0.0086	0.034	0.0087	LT	---
16	11	13	0.0222	0.0731	0.0188	LT	---
17	12	14	0.0215	0.0707	0.0182	LT	---
18	13	15	0.0744	0.2444	0.0627	LT	---
19	14	15	0.0595	0.195	0.0502	LT	---
20	12	16	0.0212	0.0834	0.0214	LT	---
21	15	17	0.0132	0.0437	0.0444	LT	---
22	16	17	0.0454	0.1801	0.0466	LT	---
23	17	18	0.0123	0.0505	0.013	LT	---
24	18	19	0.0112	0.0493	0.0114	LT	---
25	19	20	0.0252	0.117	0.0298	LT	---
26	15	19	0.012	0.0394	0.0101	LT	---
27	20	21	0.0183	0.0849	0.0216	LT	---
28	21	22	0.0209	0.097	0.0246	LT	---
29	22	23	0.0342	0.159	0.0404	LT	---
30	23	24	0.0135	0.0492	0.0498	LT	---
31	23	25	0.0156	0.08	0.0864	LT	---
32	26	25	0	0.0382	0	Trafo	0.96
33	25	27	0.0318	0.163	0.1764	LT	---
34	27	28	0.0191	0.0855	0.0216	LT	---
35	28	29	0.0237	0.0943	0.0238	LT	---
36	30	17	0	0.0388	0	Trafo	0.96
37	8	30	0.0043	0.0504	0.514	LT	---
38	26	30	0.008	0.086	0.908	LT	---
39	17	31	0.0474	0.1563	0.0399	LT	---
40	29	31	0.0108	0.0331	0.0083	LT	---
41	23	32	0.0317	0.1153	0.1173	LT	---
42	31	32	0.0298	0.0985	0.0251	LT	---
43	27	32	0.0229	0.0755	0.0193	LT	---
44	15	33	0.038	0.1244	0.0319	LT	---
45	19	34	0.0752	0.247	0.0632	LT	---
46	35	36	0.0022	0.0102	0.0027	LT	---
47	35	37	0.011	0.0497	0.0132	LT	---
48	33	37	0.0415	0.142	0.0366	LT	---
49	34	36	0.0087	0.0268	0.0057	LT	---
50	34	37	0.0026	0.0094	0.0098	LT	---
51	38	37	0	0.0375	0	Trafo	0.935
52	37	39	0.0321	0.106	0.027	LT	---
53	37	40	0.0593	0.168	0.042	LT	---
54	30	38	0.0046	0.054	0.422	LT	---
55	39	40	0.0184	0.0605	0.0155	LT	---
56	40	41	0.0145	0.0487	0.0122	LT	---
57	40	42	0.0555	0.183	0.0466	LT	---
58	41	42	0.041	0.135	0.0344	LT	---
59	43	44	0.0608	0.2454	0.0607	LT	---
60	34	43	0.0413	0.1681	0.0423	LT	---
61	44	45	0.0224	0.0901	0.0224	LT	---
62	45	46	0.04	0.1356	0.0332	LT	---
63	46	47	0.038	0.127	0.0316	LT	---
64	46	48	0.0601	0.189	0.0472	LT	---
65	47	49	0.0191	0.0625	0.016	LT	---
66	42	49	0.0715	0.323	0.086	LT	---
67	42	49	0.0715	0.323	0.086	LT	---
68	45	49	0.0684	0.186	0.0444	LT	---
69	48	49	0.0179	0.0505	0.0126	LT	---
70	49	50	0.0267	0.0752	0.0187	LT	---
71	49	51	0.0486	0.137	0.0342	LT	---
72	51	52	0.0203	0.0588	0.014	LT	---
73	52	53	0.0405	0.1635	0.0406	LT	---
74	53	54	0.0263	0.122	0.031	LT	---
75	49	54	0.073	0.289	0.0738	LT	---

**Tabla D.2-** Continuación de los datos de las Líneas del Sistema IEEE 118 barras

Línea Nro.	Desde	Hasta	Resistencia (pu)	Reactancia (pu)	Suceptancia (pu)	Tipo de elemento	Tap
76	49	54	0.0869	0.291	0.073	LT	---
77	54	55	0.0169	0.0707	0.0202	LT	---
78	54	56	0.0028	0.0096	0.0073	LT	---
79	55	56	0.0049	0.0151	0.0037	LT	---
80	56	57	0.0343	0.0966	0.0242	LT	---
81	50	57	0.0474	0.134	0.0332	LT	---
82	56	58	0.0343	0.0966	0.0242	LT	---
83	51	58	0.0255	0.0719	0.0179	LT	---
84	54	59	0.0503	0.2293	0.0598	LT	---
85	56	59	0.0825	0.251	0.0569	LT	---
86	56	59	0.0803	0.239	0.0536	LT	---
87	55	59	0.0474	0.2158	0.0565	LT	---
88	59	60	0.0317	0.145	0.0376	LT	---
89	59	61	0.0328	0.15	0.0388	LT	---
90	60	61	0.0026	0.0135	0.0146	LT	---
91	60	62	0.0123	0.0561	0.0147	LT	---
92	61	62	0.0082	0.0376	0.0098	LT	---
93	63	59	0	0.0386	0	Trafo	0.96
94	63	64	0.0017	0.02	0.216	LT	---
95	64	61	0	0.0268	0	Trafo	0.985
96	38	65	0.009	0.0986	1.046	LT	---
97	64	65	0.0027	0.0302	0.38	LT	---
98	49	66	0.018	0.0919	0.0248	LT	---
99	49	66	0.018	0.0919	0.0248	LT	---
100	62	66	0.0482	0.218	0.0578	LT	---
101	62	67	0.0258	0.117	0.031	LT	---
102	65	66	0	0.037	0	Trafo	0.935
103	66	67	0.0224	0.1015	0.0268	LT	---
104	65	68	0.0014	0.016	0.638	LT	---
105	47	69	0.0844	0.2778	0.0709	LT	---
106	49	69	0.0985	0.324	0.0828	LT	---
107	68	69	0	0.037	0	Trafo	0.935
108	69	70	0.03	0.127	0.122	LT	---
109	24	70	0.0022	0.4115	0.102	LT	---
110	70	71	0.0088	0.0355	0.0088	LT	---
111	24	72	0.0488	0.196	0.0488	LT	---
112	71	72	0.0446	0.18	0.0444	LT	---
113	71	73	0.0087	0.0454	0.0118	LT	---
114	70	74	0.0401	0.1323	0.0337	LT	---
115	70	75	0.0428	0.141	0.036	LT	---
116	69	75	0.0405	0.122	0.124	LT	---
117	74	75	0.0123	0.0406	0.0103	LT	---
118	76	77	0.0444	0.148	0.0368	LT	---
119	69	77	0.0309	0.101	0.1038	LT	---
120	75	77	0.0601	0.1999	0.0498	LT	---
121	77	78	0.0038	0.0124	0.0126	LT	---
122	78	79	0.0055	0.0244	0.0065	LT	---
123	77	80	0.017	0.0485	0.0472	LT	---
124	77	80	0.0294	0.105	0.0228	LT	---
125	79	80	0.0156	0.0704	0.0187	LT	---
126	68	81	0.0018	0.0202	0.808	LT	---
127	81	80	0	0.037	0	Trafo	0.935
128	77	82	0.0298	0.0853	0.0817	LT	---
129	82	83	0.0112	0.0366	0.038	LT	---
130	83	84	0.0625	0.132	0.0258	LT	---
131	83	85	0.043	0.148	0.0348	LT	---
132	84	85	0.0302	0.0641	0.0123	LT	---
133	85	86	0.035	0.123	0.0276	LT	---
134	86	87	0.0283	0.2074	0.0445	LT	---
135	85	88	0.02	0.102	0.0276	LT	---
136	85	89	0.0239	0.173	0.047	LT	---
137	88	89	0.0139	0.0712	0.0193	LT	---
138	89	90	0.0518	0.188	0.0528	LT	---
139	89	90	0.0238	0.0997	0.106	LT	---
140	90	91	0.0254	0.0836	0.0214	LT	---
141	89	92	0.0099	0.0505	0.0548	LT	---
142	89	92	0.0393	0.1581	0.0414	LT	---
143	91	92	0.0387	0.1272	0.0327	LT	---
144	92	93	0.0258	0.0848	0.0218	LT	---
145	92	94	0.0481	0.158	0.0406	LT	---
146	93	94	0.0223	0.0732	0.0188	LT	---
147	94	95	0.0132	0.0434	0.0111	LT	---
148	80	96	0.0356	0.182	0.0494	LT	---
149	82	96	0.0162	0.053	0.0544	LT	---
150	94	96	0.0269	0.0869	0.023	LT	---

Tabla D.3- Continuación de los datos de las Líneas del Sistema IEEE 118 barras

Línea Nro.	Desde	Hasta	Resistencia (pu)	Reactancia (pu)	Suceptancia (pu)	Tipo de elemento	Tap
151	80	97	0.0183	0.0934	0.0254	LT	---
152	80	98	0.0238	0.108	0.0286	LT	---
153	80	99	0.0454	0.206	0.0546	LT	---
154	92	100	0.0648	0.295	0.0472	LT	---
155	94	100	0.0178	0.058	0.0604	LT	---
156	95	96	0.0171	0.0547	0.0147	LT	---
157	96	97	0.0173	0.0885	0.024	LT	---
158	98	100	0.0397	0.179	0.0476	LT	---
159	99	100	0.018	0.0813	0.0216	LT	---
160	100	101	0.0277	0.1262	0.0328	LT	---
161	92	102	0.0123	0.0559	0.0146	LT	---
162	101	102	0.0246	0.112	0.0294	LT	---
163	100	103	0.016	0.0525	0.0536	LT	---
164	100	104	0.0451	0.204	0.0541	LT	---
165	103	104	0.0466	0.1584	0.0407	LT	---
166	103	105	0.0535	0.1625	0.0408	LT	---
167	100	106	0.0605	0.229	0.062	LT	---
168	104	105	0.0099	0.0378	0.0099	LT	---
169	105	106	0.014	0.0547	0.0143	LT	---
170	105	107	0.053	0.183	0.0472	LT	---
171	105	108	0.0261	0.0703	0.0184	LT	---
172	106	107	0.053	0.183	0.0472	LT	---
173	108	109	0.0105	0.0288	0.0076	LT	---
174	103	110	0.0391	0.1813	0.0461	LT	---
175	109	110	0.0278	0.0762	0.0202	LT	---
176	110	111	0.022	0.0755	0.02	LT	---
177	110	112	0.0247	0.064	0.062	LT	---
178	17	113	0.0091	0.0301	0.0077	LT	---
179	32	113	0.0615	0.203	0.0518	LT	---
180	32	114	0.0135	0.0612	0.0163	LT	---
181	27	115	0.0164	0.0741	0.0197	LT	---
182	114	115	0.0023	0.0104	0.0028	LT	---
183	68	116	0.0003	0.004	0.164	LT	---
184	12	117	0.0329	0.14	0.0358	LT	---
185	75	118	0.0145	0.0481	0.012	LT	---
186	76	118	0.0164	0.0544	0.0136	LT	---



Tabla D.4- Datos de las Barras del Sistema IEEE 118 barras

Datos de las Barras del Sistema IEEE 118 barras							
Barra	Tipo	Tensión	PL	QL	PG	Qmax	Qmin
1	PV	0.955	0.510	0.270	0.000	0.150	-0.050
2	PQ	---	0.200	0.090	0.000	---	---
3	PQ	---	0.390	0.100	0.000	---	---
4	PV	0.998	0.300	0.120	-0.090	3.000	-3.000
5	PQ	---	0.000	0.000	0.000	---	---
6	PV	0.990	0.520	0.220	0.000	0.500	-0.130
7	PQ	---	0.190	0.020	0.000	---	---
8	PV	1.015	0.000	0.000	-0.280	3.000	-3.000
9	PQ	---	0.000	0.000	0.000	---	---
10	PV	1.050	0.000	0.000	4.500	2.000	-1.470
11	PQ	---	0.700	0.230	0.000	---	---
12	PV	0.990	0.470	0.100	0.850	1.200	-0.350
13	PQ	---	0.340	0.160	0.000	---	---
14	PQ	---	0.140	0.010	0.000	---	---
15	PV	0.970	0.900	0.300	0.000	0.300	-0.100
16	PQ	---	0.250	0.100	0.000	---	---
17	PQ	---	0.110	0.030	0.000	---	---
18	PV	0.973	0.600	0.340	0.000	0.500	-0.160
19	PQ	---	0.450	0.250	0.000	---	---
20	PQ	---	0.180	0.030	0.000	---	---
21	PQ	---	0.140	0.080	0.000	---	---
22	PQ	---	0.100	0.050	0.000	---	---
23	PQ	---	0.070	0.030	0.000	---	---
24	PV	---	0.000	0.000	-0.130	3.000	-3.000
25	PV	1.050	0.000	0.000	2.200	1.400	-0.470
26	PV	1.015	0.000	0.000	3.140	10.000	-10.000
27	PV	0.968	0.620	0.130	-0.090	3.000	-3.000
28	PQ	---	0.170	0.070	0.000	---	---
29	PQ	---	0.240	0.040	0.000	---	---
30	PQ	---	0.000	0.000	0.000	---	---
31	PV	0.967	0.430	0.270	0.070	3.000	-3.000
32	PV	0.963	0.590	0.230	0.000	0.420	-0.140
33	PQ	---	0.230	0.090	0.000	---	---
34	PV	0.986	0.590	0.260	0.000	0.240	-0.080
35	PQ	---	0.330	0.090	0.000	---	---
36	PV	0.980	0.310	0.170	0.000	0.240	-0.080
37	PQ	---	0.000	0.000	0.000	---	---
38	PQ	---	0.000	0.000	0.000	---	---
39	PQ	---	0.270	0.110	0.000	---	---
40	PV	0.970	0.200	0.230	-0.460	3.000	-3.000
41	PQ	---	0.370	0.100	0.000	---	---
42	PV	0.985	0.370	0.230	-0.590	3.000	-3.000
43	PQ	---	0.180	0.070	0.000	---	---
44	PQ	---	0.160	0.080	0.000	---	---
45	PQ	---	0.530	0.220	0.000	---	---
46	PV	1.005	0.280	0.100	0.190	1.000	-1.000
47	PQ	---	0.340	0.000	0.000	---	---
48	PQ	---	0.200	0.110	0.000	---	---
49	PV	1.025	0.870	0.300	2.040	2.100	-0.850
50	PQ	---	0.170	0.040	0.000	---	---
51	PQ	---	0.170	0.080	0.000	---	---
52	PQ	---	0.180	0.050	0.000	---	---
53	PQ	---	0.230	0.110	0.000	---	---
54	PV	0.955	1.130	0.320	0.480	3.000	-3.000
55	PV	0.952	0.630	0.220	0.000	0.230	-0.080
56	PV	0.954	0.840	0.180	0.000	0.150	-0.080
57	PQ	---	0.120	0.030	0.000	---	---
58	PQ	---	0.120	0.030	0.000	---	---
59	PV	0.985	2.770	1.130	1.550	1.800	-0.600
60	PQ	---	0.780	0.030	0.000	---	---
61	PV	0.995	0.000	0.000	1.600	3.000	-1.000
62	PV	0.998	0.770	0.140	0.000	0.200	-0.200
63	PQ	---	0.000	0.000	0.000	---	---
64	PQ	---	0.000	0.000	0.000	---	---
65	PV	1.005	0.000	0.000	3.910	2.000	-0.670
66	PV	1.050	0.390	0.180	3.920	2.000	-0.670
67	PQ	---	0.280	0.070	0.000	---	---
68	PQ	---	0.000	0.000	0.000	---	---
69	Vθ	---	0.000	0.000	0.000	---	---
70	PV	0.984	0.660	0.200	0.000	0.320	-0.100
71	PQ	---	0.000	0.000	0.000	---	---
72	PV	0.980	0.000	0.000	-0.120	1.000	-1.000
73	PV	0.991	0.000	0.000	-0.060	1.000	-1.000
74	PV	0.958	0.680	0.270	0.000	0.090	-0.060
75	PQ	---	0.470	0.110	---	---	---

Tabla D.5- Continuación de los datos de las Barras del Sistema IEEE 118 barras

Barra	Tipo	Tensión	PL	QL	PG	Qmax	Qmin
76	PV	0.943	0.680	0.360	0.000	0.230	-0.080
77	PV	1.006	0.610	0.280	0.000	0.700	-0.200
78	PQ	---	0.710	0.260	0.000	---	---
79	PQ	---	0.390	0.320	0.000	---	---
80	PV	1.040	1.300	0.260	4.770	2.800	-1.650
81	PQ	---	0.000	0.000	0.000	---	---
82	PQ	---	0.540	0.270	0.000	---	---
83	PQ	---	0.200	0.100	0.000	---	---
84	PQ	---	0.110	0.070	0.000	---	---
85	PV	0.985	0.240	0.150	0.000	0.230	-0.080
86	PQ	---	0.210	0.100	0.000	---	---
87	PV	1.015	0.000	0.000	0.040	10.000	-1.000
88	PQ	---	0.480	0.100	0.000	---	---
89	PV	1.005	0.000	0.000	6.070	3.000	-2.100
90	PV	0.985	0.780	0.420	-0.850	3.000	-3.000
91	PV	0.980	0.000	0.000	-0.100	1.000	-1.000
92	PV	0.992	0.650	0.100	0.000	0.090	-0.030
93	PQ	---	0.120	0.070	0.000	---	---
94	PQ	---	0.300	0.160	0.000	---	---
95	PQ	---	0.420	0.310	0.000	---	---
96	PQ	---	0.380	0.150	0.000	---	---
97	PQ	---	0.150	0.090	0.000	---	---
98	PQ	---	0.340	0.080	0.000	---	---
99	PV	1.010	0.000	0.000	-0.420	1.000	-1.000
100	PV	1.017	0.370	0.180	2.520	1.550	-0.500
101	PQ	---	0.220	0.150	0.000	---	---
102	PQ	---	0.050	0.030	0.000	---	---
103	PV	1.001	0.230	0.160	0.400	0.400	-0.150
104	PV	0.971	0.380	0.250	0.000	0.230	-0.080
105	PV	0.965	0.310	0.260	0.000	0.230	-0.080
106	PQ	---	0.430	0.160	0.000	---	---
107	PV	0.952	0.280	0.120	-0.220	2.000	-2.000
108	PQ	---	0.020	0.010	0.000	---	---
109	PQ	---	0.080	0.030	0.000	---	---
110	PV	0.973	0.390	0.300	0.000	0.230	-0.080
111	PV	0.980	0.000	0.000	0.360	10.000	-1.000
112	PV	0.975	0.250	0.130	-0.430	10.000	-1.000
113	PV	0.993	0.000	0.000	-0.060	2.000	-1.000
114	PQ	---	0.080	0.030	0.000	---	---
115	PQ	---	0.220	0.070	0.000	---	---
116	PV	1.005	0.000	0.000	-1.840	10.000	-10.000
117	PQ	---	0.200	0.080	0.000	---	---
118	PQ	---	0.330	0.150	0.000	---	---



## APENDICE E

### Clasificación por contingencias de acuerdo a los Márgenes de Cargabilidad

**Tabla E.1-** Clasificación por contingencias de acuerdo a los márgenes de cargabilidad del Sistema IEEE 14 barras

Clasificación por contingencias de acuerdo a los Márgenes de Cargabilidad del Sistema IEEE 14 barras			
Clasificación	Línea en contingencia	Desde	Hasta
1	11	1	2
2	12	3	2
3	17	5	6
4	14	1	5
5	10	7	9
6	16	2	4
7	19	4	7
8	15	5	4
9	1	2	5
10	8	9	14
11	4	6	13
12	20	8	7
13	18	4	9
14	13	3	4
15	7	9	10
16	9	14	13
17	5	6	11
18	2	6	12
19	6	11	10
20	3	12	13

**Tabla E.2-** Clasificación por contingencias de acuerdo a los márgenes de cargabilidad del Sistema IEEE 30 barras

Clasificación por contingencias de acuerdo a los Márgenes de Cargabilidad del Sistema IEEE 30 barras			
Clasificación	Línea en contingencia	Desde	Hasta
1	1	1	2
2	5	2	5
3	2	1	3
4	4	3	4
5	36	28	27
6	15	4	12
7	6	2	6
8	7	4	6
9	9	6	7
10	14	9	10
11	3	2	4
12	38	27	30
13	11	6	9
14	16	12	13
15	13	9	11
16	37	27	29
17	10	6	8
18	18	12	15
19	12	6	10
20	41	6	28
21	25	10	20
22	27	10	21
23	35	25	27
24	24	19	20
25	30	15	23
26	31	22	24
27	19	12	16
28	22	15	18
29	39	29	30
30	17	12	14
31	8	5	7
32	26	10	17
33	24	19	20
34	40	8	28
35	21	16	17
36	32	23	24
37	23	18	19
38	20	14	15
39	33	24	25
40	29	21	22

**Tabla E.3-** Clasificación por contingencias de acuerdo a los márgenes de cargabilidad del Sistema IEEE 118 barras (50 contingencias más severas)

Clasificación por contingencias de acuerdo a los Márgenes de Cargabilidad del Sistema IEEE 118 barras			
Clasificación	Línea en contingencia	Desde	Hasta
1	8	8	5
2	7	8	9
3	9	9	10
4	185	75	118
5	51	38	37
6	163	100	103
7	96	38	65
8	118	76	77
9	50	34	37
10	174	103	110
11	3	4	5
12	38	26	30
13	36	30	17
14	116	69	75
15	97	64	65
16	108	69	70
17	167	100	106
18	178	17	113
19	33	25	27
20	29	22	23
21	32	26	25
22	4	3	5
23	21	15	17
24	66	42	49
25	67	42	49
26	31	23	25
27	28	21	22
28	5	5	6
29	94	63	64
30	2	1	3
31	13	2	12
32	23	17	18
33	93	63	59
34	164	100	104
35	61	44	45
36	41	23	32
37	62	45	46
38	16	11	13
39	68	45	49
40	55	39	40
41	22	16	17
42	27	20	21
43	11	5	11
44	98	49	66
45	99	49	66
46	53	37	40
47	10	4	11
48	52	37	39
49	48	33	37
50	59	43	44