# INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

**SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA


## CONTROL DIFUSO AUTOSINTONIZABLE DE VOLTAJE POR MEDIO DE LA BÚSQUEDA TABÚ Y ALGORITMOS PARA UN GENERADOR SÍNCRONO

# T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD**

**EN INGENIERÍA ELÉCTRICA**

PRESENTA:


**ADRIÁN RUBIO SOLÍS**

Director de Tesis: **Dr. DAVID ROMERO ROMERO**



**MÉXICO D.F. 2006**

SIP-14

# INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL

## SECRETARÍA DE INVESTIGACION Y POSGRADO

*ACTA DE REVISION DE TESIS*

En la Ciudad de México, D.F. siendo las 13:00 horas del día 2 del mes de MAYO del 2006 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de la ESIME ZAC. para examinar la tesis de grado titulada:

**"CONTROL DIFUSO AUTOSINTONIZABLE DE VOLTAJE PARA UN GENERADOR SINCRONO POR MEDIO DE LA BÚSQUEDA POR TABÚ Y ALGORITMOS GENÉTICOS "**

Presentada por el alumno:

| RUBIO | SOLÍS | ADRIÁN |
|---|---|---|
| Apellido paterno | materno | nombre(s) |

Con registro: A 0 4 0 5 0 6

aspirante al grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD EN INGENIERÍA ELÉCTRICA**

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron ***SU APROBACION DE LA TESIS***, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISION REVISORA

**DIRECTOR DE TESIS**

DR. DAVID ROMERO ROMERO

**PRESIDENTE**

DR. DANIEL OLGUIN SALINAS

**SECRETARIO**

DR. JAIME ROBLES GARCÍA

**SEGUNDO VOCAL**

DR. RAUL CORTES MATEOS

**TERCER VOCAL**

M. EN C. TOMAS IGNACIO ASIAIN OLIVARES

**SUPLENTE**

M. EN C. JESÚS REYES GARCÍA

I. P. N.
SECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACION

**EL PRESIDENTE DEL COLEGIO**

DR. JAIME ROBLES GARCÍA

# RESUMEN.

En esta tesis es mostrada la simulación referente a la regulación de voltaje de un generador síncrono por medio de técnicas inteligentes y un regulador convencional los cuales son sintonizados con el generador síncrono en vacío.

Durante la simulación se va a usar el modelo de la máquina bus infinito con una línea de transmisión corta y larga en diferentes puntos de operación usando la lógica difusa, la búsqueda por tabú y algoritmos genéticos son usados como métodos de optimización. La simulación muestra una falla trifásica en la línea y sus efectos sobre el generador síncrono. Las técnicas inteligentes son utilizadas como métodos de optimización sobre el control difuso que permiten encontrar la mejor tabla de reglas lingüísticas y funciones de membresía.

El control difuso basa su desempeño en la sintonización adecuada de la tabla de reglas lingüísticas y las funciones de membresía tales elementos permanecen estáticas durante la aplicación del control difuso tal característica no es una restricción para convertirse en elementos dinámicos pero es necesario conocer el comportamiento de la planta ante diversos puntos de operación, la búsqueda por tabú y algoritmos genéticos son herramientas heurísticas que permiten establecer condiciones inteligentes de funcionamiento basadas en eventos aleatorios de búsqueda.

La búsqueda por tabú será empleada para la sintonización de la tabla de reglas y las funciones de membresía debido a su flexibilidad para trabajar sobre cualquier espacio de búsqueda, por otro lado los algoritmos genéticos serán empleados en la sintonización de las funciones de membresía ambas técnicas serán comparadas contra el control difuso estático y contra un regulador convencional ST1.

En los resultados obtenidos se muestra que la búsqueda por tabú y algoritmos genéticos trabajando juntos fueron más robustos que el regulador ST1 sobre diferentes puntos de operación.

# ABSTRACT

Here is showed the simulation about the regulation of voltage of a syncronous generator by means intelligence techniques and conventional voltage regulators which are tuned with syncronous generators unload.

During the simulation is going to use the machine- infinite bus model with a short and long transmission line on diferent operation points using the fuzzy logic, the tabu search and genetic algorithms are used like optimization approachs. The simulation show a three phase short circuit fault at the network and its effects on the syncronous generator. The intelligence techniques are used like a optimization approachs on fuzzy control let to find the best linguistic rules table and membership functions.

The permorfing of the fuzzy control is based on appropiate tuning of the linguistic rules table and membership functions whose elements are statics during the application of the fuzzy control such characteristic is not necessary for become dinamyc elements but is necessary to know the performing about the plant on diferents operation points, the tabu search and genetic algorithms are heuristic tools that can establish the intelligent conditions of performing based search ramdom events.

The tabu search will be for tuning of the linguistic rules table and membership functions due its flexibility to work in any search space, by another hand the genetic algorithms will be employed solely on the optimization membership functions, both approachs will be compared against the static fuzzy control and the ST1 conventional regulator.

The final results show tabu search and genetic algorithms working together and they were more robust than the ST1 regulator on diferent points of operation.

# *Índice general*


| | *Página* |
|---|---|
| **Resumen** | i |
| **Abstract** | iii |
| **Índice general** | v |
| **Índice de figuras** | xi |
| **Índice de tablas** | xxxv |
| **Glosario de términos** | xxxvi |
| **1. Introducción.** | *1* |
| 1.1. Objetivo de la tesis | *1* |
| 1.2. Justificación. | *1* |
| 1.3. Estado del arte | *2* |
| 1.4. Contenido de la tesis | *3* |
| 1.5. Aportaciones | *4* |
| **2. Búsqueda tabú** | *5* |
| 2.1. Introducción. | *5* |
| 2.2. Memoria a corto plazo. | *7* |
| 2.2.1. Memoria explicita | *7* |
| 2.2.2. Memoria atributiva | *8* |
| 2.2.3. Criterio de aspiración. | *8* |
| 2.2.6. Solución elite. | *9* |
| 2.2.5. Lista de candidatos. | *10* |
| 2.2.6. Criterio de aspiración. | *10* |
| 2.3. Memoria a largo plazo | *12* |
| 2.3.1. Intensificación y diversificación. | *12* |
| 2.3.2. Memoria basada en la frecuencia, multas e incentivos. | *14* |
| **3. Algoritmos genéticos.** | *17* |
| 3.1. Introducción a los algoritmos genéticos. | *17* |
| 3.2. Algoritmo genético simple. | *18* |
| 3.2.1. Selección. | *19* |
| 3.2.2. Reproducción. | *20* |
| 3.2.3. Cruzamiento | *21* |
| 3.2.4. Mutación. | *22* |
| 3.3. Función aptitud | *23* |
| 3.4. Ventajas y desventajas de los algoritmos genéticos. | *24* |
| 3.3. Esquemas. | *25* |
| **4. Búsqueda por tabú y algoritmos genéticos con lógica difusa.** | *27* |
| 4.1. Introducción. | *27* |

*Página*

4.2. Autosintonización de la tabla de reglas lingüísticas empleando la búsqueda por tabú. *28*
4.2.1. Memoria a corto plazo. *32*
4.2.1.1. Examinar lista de candidatos. *34*
4.2.1.2. Memoria explicita. *35*
4.2.1.3 Verificación Tabú *36*
4.2.1.4. Selección de la actualización y evaluación de tabú creando multas *41*
4.2.1.5. Verificación de terminación. *41*
4.2.1.6. Ejecutar el movimiento. *42*
4.2.2. Autosintonización de las funciones de membresía empleando la búsqueda por tabú. *42*
4.2.3 Memoria a corto plazo para la sintonización de las funciones de membresía. *44*
4.2.3.1. Examinar lista de candidatos. *44*
4.2.3.2 Verificación del estado del atributo tabú, evaluación de tabú sin crear multas y prueba de aspiración. *47*
4.2.3.3. Selección de la actualización y evaluación de tabú creando multas. *48*
4.2.3.4. Verificación de terminación
4.2.3.5. Ejecutar el movimiento *50*
4.3 Memoria a largo plazo *50*
4.3.1 Memoria basada en la frecuencia. *52*
4.3.2. Intensificación. *52*
4.3.3. Diversificación *52*
4.3.4. Multas e incentivos. *53*
4.4. Algoritmos genéticos con lógica difusa. *56*
4.4.1. Creación de la población inicial *64*
4.4.2. Selección y reproducción. *65*
4.4.3. Cruzamiento y mutación *67*
4.5. Algoritmos genéticos y búsqueda por tabú con lógica difusa. *69*

**5. Pruebas y resultados.** *72*

5.1. Introducción. *72*
5.2. Resultados obtenidos después de simular el generador síncrono utilizando el regulador convencional tipo ST1. *72*
5.2.1. Introducción. *72*
***5.3. Resultados obtenidos después de realizar una autosintonización sobre una tabla de 25 y 49 reglas lingüísticas empleando la búsqueda por tabú por vecindades laterales.*** *80*
5.3.1. Introducción. *80*
5.3.2. Resultados obtenidos después de realizar una prueba de autosintonización sobre una tabla de 25 reglas lingüísticas por el criterio de alta influencia empleando una línea de transmisión larga. *80*
5.3.3. Resultados obtenidos después de realizar una prueba de autosintonización sobre una tabla de 25 reglas lingüísticas por el criterio de alta influencia empleando una línea de transmisión corta. *95*

*Página*

5.3.4. Resultados obtenidos después de realizar una prueba de autosintonización sobre una tabla de 25 reglas lingüísticas por el criterio de baja influencia empleando una línea de transmisión larga. *99*

5.3.5. Resultados obtenidos después de realizar una prueba de autosintonización sobre una tabla de 25 reglas lingüísticas por el criterio de baja influencia empleando una línea de transmisión corta. *114*

5.3.6. Resultados obtenidos después de realizar una prueba de autosintonización sobre una tabla de 49 reglas lingüísticas por el criterio de alta influencia empleando una línea de transmisión larga. *116*

5.3.6.1. Introducción. *116*

5.3.7. Resultados obtenidos después de realizar una prueba de autosintonización sobre una tabla de 49 reglas lingüísticas por el criterio de alta influencia empleando una línea de transmisión corta. *127*

5.3.8. Resultados obtenidos después de realizar una prueba de autosintonización sobre una tabla de 49 reglas lingüísticas por el criterio de baja influencia empleando una línea de transmisión larga. *129*

5.3.9. Resultados obtenidos después de realizar una prueba de autosintonización sobre una tabla de 49 reglas lingüísticas por el criterio de baja influencia empleando una línea de transmisión corta. *137*

5.3.10. Análisis del criterio de alta influencia y el criterio de baja influencia sobre una búsqueda tabú empleando vecindades laterales. *139*

***5.4. Resultados obtenidos después de realizar una autosintonización sobre una tabla de 49 y 81 reglas lingüísticas empleando la búsqueda por tabú por entorno.*** *142*

5.4.1. Introducción. *142*

5.4.2. Resultados obtenidos después de realizar una autosintonización sobre una tabla de 81 reglas lingüísticas *142*

5.4.3. Resultados obtenidos después de realizar una autosintonización sobre una tabla de 49 reglas lingüísticas empleando la búsqueda por tabú por entorno. *157*

5.4.4. Análisis de la búsqueda por entorno *170*

***5.5. Resultados obtenidos después de realizar una prueba sobre la sintonización de 5 y 7 funciones de membresía por medio de la búsqueda por tabú.*** *171*

5.5.1. Introducción. *171*

5.5.2. Resultados obtenidos después de realizar una prueba de autosintonización sobre 5 funciones de membresía utilizando la búsqueda por tabú por el criterio de alta influencia con una línea de transmisión larga y corta. *171*

*Página*

5.5.3. Resultados obtenidos después de realizar una prueba de autosintonización sobre 5 funciones de membresía utilizando la búsqueda por tabú por el criterio de baja influencia con una línea de transmisión larga y corta. *185*

5.5.3.1. Introducción. *185*

5.5.4. Resultados obtenidos después de realizar una prueba de autosintonización sobre 7 funciones de membresía utilizando la búsqueda por tabú por el criterio de alta influencia con una línea de transmisión larga y corta. *198*

5.5.4.1. Introducción. *198*

5.5.5. Resultados obtenidos después de realizar una prueba de autosintonización sobre 7 funciones de membresía utilizando una búsqueda por tabú por el criterio de baja influencia con una línea de transmisión larga y corta. *207*

5.5.5.1. Introducción. *207*

5.5.6. Análisis del comportamiento del criterio de alta influencia y el criterio de baja influencia. *215*

***5.6 Resultados obtenidos después de realizar una prueba sobre la sintonización de las funciones de membresía de un control difuso por medio de los algoritmos genéticos.*** *218*

5.6.1. Introducción. *218*

5.6.2. Resultados obtenidos después de la aplicación de los algoritmos genéticos sobre la sintonización de 5 funciones de membresía de un controlador difuso empleando una línea de transmisión larga y corta. *219*

5.6.2.1. Introducción *219*

5.6.2.2. Intervalos resultantes después de la aplicación de los algoritmos genéticos para la sintonización de un controlador difuso de 5 funciones de membresía empleando una línea de transmisión larga. *231*

5.6.2.3. Resultados obtenidos después de la aplicación de los algoritmos genéticos sobre la sintonización de 5 funciones de membresía de un controlador difuso empleando una línea de transmisión corta. *232*

5.6.3. Resultados obtenidos después de la sintonización de un control difuso con 7 funciones de membresía empleando una línea de transmisión larga y corta. *236*

5.6.3.1. Introducción. *236*

5.6.3.2. Resultados obtenidos después de la aplicación de los algoritmos genéticos sobre la sintonización de 7 funciones de membresía de un controlador difuso empleando una línea de transmisión corta. *248*

5.6.4. Resultados obtenidos después de sintonizar un controlador difuso de 5 funciones de membresía por algoritmos genéticos simulando 300 generaciones empleando una línea de transmisión larga. *251*

*Página*

5.6.5. Resultados obtenidos después de sintonizar un controlador difuso de 7 funciones de membresía por algoritmos genéticos simulando 300 generaciones empleando una línea de transmisión larga. *255*

5.6.6. Funciones de membresía resultantes después de realizar una prueba de sintonización sobre las funciones de membresia de un control difuso con 7 funciones de membresía empleando una línea de transmisión larga para 300 y 500 generaciones. *257*

5.6.7. Análisis del comportamiento de los algoritmos genéticos sobre la optimización del control difuso. *261*

***5.7 Resultados obtenidos después de aplicar los algoritmos genéticos y la búsqueda por tabú para la sintonización de las funciones de membresía y la tabla de reglas lingüísticas.*** *263*

5.7.1. Introducción.

5.7.2 Resultados obtenidos después de aplicar algoritmos genéticos y búsqueda por tabú para un control difuso con 5 funciones de membresía. *263*

5.7.2.1. Introducción. *263*

5.7.3. Resultados obtenidos durante la aplicación de algoritmos genéticos y búsqueda por tabú sobre una tabla de 49 reglas lingüísticas y 7 funciones de membresía. *279*

5.7.3.1. Introducción *279*

5.7.4. Análisis del trabajo de algoritmos genéticos y búsqueda por tabú. *289*

5.7.5. Comportamiento del generador síncrono empleando el controlador difuso optimizado. *291*

**6. Conclusiones y recomendaciones.** *298*

6.1. Conclusiones. *298*

6.2. Recomendaciones a trabajos futuros. *300*

**REFERENCIAS.** *301*

**Apéndices.** *30*

**Apéndice A.** *304*

A.1 Parámetros del controlador difuso. *304*

A.1.2 Funciones de membresía y tabla de reglas lingüísticas utilizadas *304*

**Apéndice B.** *308*

B.1 Índices de funcionamiento. *308*

**Apéndice C.** *310*

C.1 Modelo matemático. *310*

C.1.1 Modelo máquina-bus infinito. *310*

C.1.2 Modelo del sistema de excitación. *311*

C.1.3 Modelo de la turbina y gobernador de velocidad *312*

C.2 Modelo del regulador convencional ST1. *312*

C.3 Condiciones iniciales. *314*

**Apéndice D.** *316*

D.1 Conceptos de optimización y lógica difusa. *316*

| | *Página* |
|---|---|
| D.4 Lógica difusa | *317* |
| **Apéndice F.** | *320* |
| F.1 Simulación digital. | *320* |
| F.2 diagrama de flujo para la simulación del generador sincrono con la optimización del control difuso empleando los algoritmos genétiscos y búsqueda por tabú. | *322* |
| F.3 biblioteca bagts.h utilizada por agts.cpp | *345* |

## ÍNDICE DE FIGURAS.


| *Figura* | *Descripción* | *Pagina* |
|---|---|---|
| 2.1 | Método descendente | *6* |
| 2.2 | Vecindario reducido N*(x). | *8* |
| 2.3 | Número de movimientos examinados durante una búsqueda tabú clásica. | *9* |
| 2.4 | Construcción de la solución elite | *9* |
| 2.5 | Secuencia de la lista de candidatos. | *10* |
| 2.6 | Estructura lógica de las operaciones de la memoria a corto plazo | *11* |
| 2.7 | Diagrama de flujo de la estrategia de intensificación | *14* |
| 3.1 | Operadores genéticos ejecutados durante una generación para AG. | *18* |
| 3.2 | Representación binaria para el cruzamiento. | *21* |
| 3.3 | Tipos clásicos de cruzamiento. | *22* |
| 3.4 | Mutación por representación binaria | *23* |
| 3.5 | Optimización por Algoritmos genéticos. | *24* |
| 3.6 | Conceptos generales utilizados en un esquema. | *26* |
| 4.1 | Arquitectura básica del controlador lógico difuso sintonizado manualmente | *28* |
| 4.2 | Diagrama de flujo para TS durante una iteración del método de integración | *29* |
| 4.3 | Arquitectura del controlador lógico difuso utilizando TS en la optimización de la tabla de reglas lingüísticas | *30* |
| 4.4 | Tabla de 49 reglas lingüísticas formando vecindarios extremos en diferentes posiciones de la tabla. | *30* |
| 4.5 | Tabla de 49 reglas lingüísticas formando vecindarios de entorno | *31* |
| 4.6 | Movimiento y vecindad N(x) generador por TS en corto plazo | *33* |
| 4.7 | Vecindario N(x), por búsqueda de vecindario lateral | *34* |
| 4.8 | Vecindario N(x), por búsqueda de vecindario de entorno | *35* |
| 4.9 | Movimientos realizados y registrados sobre la tabla de reglas lingüísticas | *35* |
| 4.10 | Movimientos realizados y registrados sobre la memoria explicita que mantiene las mismas dimensiones que la tabla de reglas lingüísticas | *36* |
| 4.11 | Base Tabú para elementos eliminados y sumados | *36* |
| 4.12 | Elementos analizados por TS | *37* |
| 4.13 | Memoria atributiva cuando I = 1 para elemento sumado y elemento eliminado | *37* |
| 4.14 | Memoria explícita cuando I = 1. | *37* |
| 4.15 | Memoria explicita y atributiva | *38* |
| 4.16 | Listas maestras cuando t = 4segundos | *39* |
| 4.17 | Estructuras resultantes cuando t = 4 segundos | *41* |
| 4.18 | Solución elite de prueba que será analizada por TS para el próximo intervalo de la memoria a corto plazo | *41* |
| 4.19 | Espacio de búsqueda X para la derivada del error | *42* |
| 4.20 | Diagrama de flujo empleando la búsqueda por tabú sobre la sintonización de las funciones de membresía | *43* |
| 4.21 | Arquitectura del controlador lógico difuso utilizando TS en la optimización de las funciones de membresía | *44* |

| *Figura* | *Descripción* | *Página* |
|---|---|---|
| 4.22 | Vecindario asociado N(x) compuesto por X∈ error y X ∈ derivada del error. Espacio de búsqueda X | *44* |
| 4.23 | Composición para el elemento $x_1$ y $x_2$ de las funciones de membresía | *45* |
| 4.24 | Lista de candidatos | *45* |
| 4.25 | Tabla resultante después de ordenar las funciones objetivo de mejor a peor | *46* |
| 4.26 | Memoria explícita | *46* |
| 4.27 | Memorias y estructuras utilizadas por la memoria basada en lo reciente o de corto plazo | *48* |
| 4.28 | Memorias resultantes después de una búsqueda donde iteración = k + 1 | *49* |
| 4.29 | Vecindarios formados durante la búsqueda | *50* |
| 4.30 | Memoria de frecuencia en t = 0 segundos y t = 10 segundos | *51* |
| 4.31 | Estructura de la memoria de frecuencia | *52* |
| 4.32 | Base Tabú para elementos eliminados y sumados | *54* |
| 4.33 | Tabla de reglas lingüísticas | *54* |
| 4.34 | Base de los numeradores para los elementos eliminados-sumados | *54* |
| 4.35 | Base tabú | *55* |
| 4.36 | Genotipo | *57* |
| 4.37 | Campo de búsqueda para los algoritmos genéticos | *58* |
| 4.38 | Cromosoma cuando las funciones están reducidas | *59* |
| 4.39 | Espacio de búsqueda Y | *60* |
| 4.40 | Arquitectura del controlador lógico difuso utilizando AG en la optimización de las funciones de membresía | *61* |
| 4.41 | Espacio generado X | *62* |
| 4.42 | Representación de las operaciones ejecutadas durante la aplicación de los AG sobre lógica difusa. | *63* |
| 4.43 | Espacio generado de búsqueda para el universo de discusión | *64* |
| 4.44 | Rueda-Ruleta secciones pertenecientes a cada individuo | *65* |
| 4.45 | Simulación de AG para vT = 1 p.u. θ = 57.19 con 2 ciclos de falla cuando t = 1segundo con pc = 0.987 y pc = 0.123, No. máximo de generaciones = 500 | *68* |
| 4.46 | Arquitectura del controlador lógico difuso utilizando AG y TS | *69* |
| 4.47 | Diagrama de flujo para la optimización del controlador difuso empleando TS y AG para una iteración | *70* |
| 5.1 | Diagrama a bloques del regulador convencional ST1 | *72* |
| 5.2 | Comportamiento del generador ante un incremento de UG (entrada del gobernador) utilizando un regulador convencional tipo ST1 | *73* |
| 5.3 | Comportamiento del generador síncrono utilizando un regulador convencional tipo ST1 cuando: Tipo de línea de transmisión: *larga*, no. de ciclos de duración de la falla: *15 ciclos,* Voltaje en terminales vt = 1.0 p.u., ángulo del vt (θ) = 0º | *74* |
| 5.4 | Comportamiento del generador síncrono utilizando un regulador convencional tipo ST1 cuando: Tipo de línea de transmisión: *larga*, no. de ciclos de duración de la falla: *3 ciclos,* Voltaje en terminales vt = 1.0 p.u., ángulo del vt (θ) = 52.3339º | *75* |

| *Figura* | *Descripción* | *Página* |
|---|---|---|
| 5.5 | Comportamiento del generador síncrono utilizando un regulador convencional tipo ST1 cuando: Tipo de línea de transmisión: *larga*, no. de ciclos de duración de la falla: *3 ciclos,* Voltaje en terminales vt = 1.0 p.u., ángulo del vt (θ) = 57.19º | *76* |
| 5.6 | Comportamiento del generador síncrono utilizando un regulador convencional tipo ST1 cuando: Tipo de línea de transmisión: *larga*, no. de ciclos de duración de la falla: *20 ciclos,* Voltaje en terminales vt = 1.0 p.u., ángulo del vt (θ) = 10º | *77* |
| 5.7 | Comportamiento del generador síncrono utilizando un regulador convencional tipo ST1 cuando: Tipo de línea de transmisión: *corta*, no. de ciclos de duración de la falla: *10 ciclos,* Voltaje en terminales vt = 1.0 p.u., ángulo del vt (θ) = 0º | *78* |
| 5.8 | Comportamiento del generador síncrono utilizando un regulador convencional tipo ST1 cuando: Tipo de línea de transmisión: *corta*, no. de ciclos de duración de la falla: *9 ciclos,* Voltaje en terminales vt = 1.0 p.u., ángulo del vt (θ) = 6.8079º | *79* |
| 5.9 | Comportamiento del Generador síncrono cuando existe un incremento de carga | *82* |
| 5.10 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional cuando: Tipo de línea de transmisión: *larga,* no. de ciclos de duración de la falla: *15 ciclos, c*riterio de aspiración: ***alta influencia***, θ = 0º, $v_T$ = 1 p.u., tipo de búsqueda: *Vecindades laterales sobre una tabla de 25 reglas lingüísticas.* | *83* |
| 5.11 | Tablas resultantes después de la aplicación de TS por el criterio de aspiración de ***alta influencia*** con θ = 0º, $v_T$ = 1.0 p.u. y simulando una duración de falla de 15 ciclos | *84* |
| 5.12 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional cuando: Tipo de línea de transmisión: *larga,* no. de ciclos de duración de la falla: *15 ciclos, c*riterio de aspiración: ***alta influencia***, θ = 15º, $v_T$ = 1 p.u., tipo de búsqueda: *Vecindades laterales sobre una tabla de 25 reglas lingüísticas.* | *85* |
| 5.13 | Tablas resultantes después de la aplicación de TS por el criterio de aspiración de alta influencia con θ = 15º, $v_T$ = 1.0 p.u. y simulando una duración de falla de 15 ciclos | *86* |
| 5.14 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional cuando: Tipo de línea de transmisión: *larga,* no. de ciclos de duración de la falla: *6 ciclos, c*riterio de aspiración: ***alta influencia***, θ = 43.8728º, $v_T$ = 1 p.u., tipo de búsqueda: *Vecindades laterales sobre una tabla de 25 reglas lingüísticas.* | *87* |
| 5.15 | Tablas resultantes después de la aplicación de TS por el criterio de aspiración de alta influencia con θ = 43.8728º, $v_T$ = 1.0 p.u. y simulando una falla con una duración de 6 ciclos | *88* |

| *Figura* | *Descripción* | *Página* |
|---|---|---|
| 5.16 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional cuando: Tipo de línea de transmisión: *larga,* no. de ciclos de duración de la falla: *4 ciclos, c*riterio de aspiración: ***alta influencia***, θ = 47.9942º, $v_T$ = 1 p.u., tipo de búsqueda: *Vecindades laterales sobre una tabla de 25 reglas lingüísticas.* | *89* |
| 5.17 | Tablas resultantes después de la aplicación de TS por el criterio de aspiración de alta influencia con θ = 47.9942º, $v_T$ = 1.0 p.u. y simulando una duración de falla de 4 ciclos | *90* |
| 5.18 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional cuando: Tipo de línea de transmisión: *larga,* no. de ciclos de duración de la falla: *6 ciclos, c*riterio de aspiración: ***alta influencia***, θ = 47.9942º, $v_T$ = 1 p.u., tipo de búsqueda: *Vecindades laterales sobre una tabla de 25 reglas lingüísticas.* | *91* |
| 5.19 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional cuando: Tipo de línea de transmisión: *larga,* no. de ciclos de duración de la falla: *3 ciclos, c*riterio de aspiración: ***alta influencia***, θ = 52.3339º, $v_T$ = 1 p.u., tipo de búsqueda: *Vecindades laterales sobre una tabla de 25 reglas lingüísticas.* | *92* |
| 5.20 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional cuando: Tipo de línea de transmisión: *larga,* no. de ciclos de duración de la falla: *3 ciclos, c*riterio de aspiración: ***alta influencia***, θ = 57.19º, $v_T$ = 1 p.u., tipo de búsqueda: *Vecindades laterales sobre una tabla de 25 reglas lingüísticas.* | *93* |
| 5.21 | Tablas resultantes después de la aplicación de TS por el criterio de aspiración de alta influencia con θ = 57.19º, $v_T$ = 1.0 p.u. y simulando una duración de falla de 2ciclos | *94* |
| 5.22 | Simulación del generador desde el punto de vacío donde la potencia activa igual a 0 p.u. hasta un punto donde la potencia activa es igual a 1.0 p.u. simulando también una falla cuando t = 20 seg. Con una duración de 20 ciclos | *96* |
| 5.23 | Estructuras asociadas a la búsqueda por tabú simulando el generador durante 150 segundos con una falla de 20 ciclos cuando t = 20 segundos correspondiente a la figura 5.23 | *96* |
| 5.24 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional cuando: Tipo de línea de transmisión: *corta,* no. de ciclos de duración de la falla: *10 ciclos, c*riterio de aspiración: ***alta influencia***, θ = 0º, $v_T$ = 1 p.u., tipo de búsqueda: *Vecindades laterales sobre una tabla de 25 reglas lingüísticas.* | *97* |
| 5.25 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional cuando: Tipo de línea de transmisión: *corta,* no. de ciclos de duración de la falla: 9 *ciclos, c*riterio de aspiración: ***alta influencia***, θ = 6.8074º, $v_T$ = 1 p.u., tipo de búsqueda: *Vecindades laterales sobre una tabla de 25 reglas lingüísticas.* | *98* |

| *Figura* | *Descripción* | *Página* |
|---|---|---|
| 5.26 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional cuando: Tipo de línea de transmisión: *larga,* no. de ciclos de duración de la falla: 15 *ciclos, c*riterio de aspiración: ***baja influencia***, $\theta = 0^{o}$, $v_T = 1$ p.u., tipo de búsqueda: *Vecindades laterales sobre una tabla de 25 reglas lingüísticas.* | *100* |
| 5.27 | Tablas resultantes después de la aplicación de TS por el criterio de aspiración de Baja influencia con $\theta = 0^{o}$, $v_T = 1.0$ p.u. y simulando una duración de falla de 25 ciclos. | *101* |
| 5.28 | Tablas resultantes después de la aplicación de TS por el criterio de aspiración de Baja influencia con $\theta = 20^{o}$, $v_T = 1.0$ p.u. y simulando una duración de falla de 15 ciclos. | *101* |
| 5.29 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional cuando: Tipo de línea de transmisión: *larga,* no. de ciclos de duración de la falla: 15 *ciclos, c*riterio de aspiración: ***baja influencia***, $\theta = 20^{o}$, $v_T = 1$ p.u., tipo de búsqueda: *Vecindades laterales sobre una tabla de 25 reglas lingüísticas.* | *102* |
| 5.30 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional cuando: Tipo de línea de transmisión: *larga,* no. de ciclos de duración de la falla: 15 *ciclos, c*riterio de aspiración: ***baja influencia***, $\theta = 10^{o}$, $v_T = 1$ p.u., tipo de búsqueda: *Vecindades laterales sobre una tabla de 25 reglas lingüísticas.* | *103* |
| 5.31 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional cuando: Tipo de línea de transmisión: *larga,* no. de ciclos de duración de la falla: 6 *ciclos, c*riterio de aspiración: ***baja influencia***, $\theta = 43.8728^{o}$, $v_T = 1$ p.u., tipo de búsqueda: *Vecindades laterales sobre una tabla de 25 reglas lingüísticas.* | *104* |
| 5.32 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional cuando: Tipo de línea de transmisión: *larga,* no. de ciclos de duración de la falla: 6 *ciclos, c*riterio de aspiración: ***baja influencia***, $\theta = 47.9942^{o}$, $v_T = 1$ p.u., tipo de búsqueda: *Vecindades laterales sobre una tabla de 25 reglas lingüísticas.* | *105* |
| 5.33 | Tablas resultantes después de la aplicación de TS por el criterio de aspiración de Baja influencia con $\theta = 47.9942^{o}$, $v_T = 1.0$ p.u. y simulando una duración de falla de 6 ciclos correspondientes a la figura 5.35 | *106* |
| 5.34 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional cuando: Tipo de línea de transmisión: *larga,* no. de ciclos de duración de la falla: 3 *ciclos, c*riterio de aspiración: ***baja influencia***, $\theta = 52.3999^{o}$, $v_T = 1$ p.u., tipo de búsqueda: *Vecindades laterales sobre una tabla de 25 reglas lingüísticas.* | *107* |
| 5.35 | Tablas resultantes después de la aplicación de TS por el criterio de aspiración de baja influencia con $\theta = 52.3999^{o}$, $v_T = 1.0$ p.u. y simulando una duración de falla de 3 ciclos | *108* |

| *Figura* | *Descripción* | *Página* |
|---|---|---|
| 5.36 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional cuando: Tipo de línea de transmisión: *larga,* no. de ciclos de duración de la falla: 5 *ciclos, c*riterio de aspiración: ***baja influencia***, $\theta$ = 52.3999º, $v_T$ = 1 p.u., tipo de búsqueda: *Vecindades laterales sobre una tabla de 25 reglas lingüísticas.* | *109* |
| 5.37 | Tablas resultantes después de la aplicación de TS por el criterio de aspiración de Baja influencia con $\theta$ = 52.3999º, $v_T$ = 1.0 p.u. y simulando una duración de falla de 5 ciclos | *110* |
| 5.38 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional cuando: Tipo de línea de transmisión: *larga,* no. de ciclos de duración de la falla: 2 *ciclos, c*riterio de aspiración: ***baja influencia***, $\theta$ = 57.19º, $v_T$ = 1 p.u., tipo de búsqueda: *Vecindades laterales sobre una tabla de 25 reglas lingüísticas.* | *111* |
| 5.39 | Tablas resultantes después de la aplicación de TS por el criterio de aspiración de Baja influencia con $\theta$ = 57.19º, $v_T$ = 1.0 p.u. y simulando una duración de falla de 2 ciclos | *112* |
| 5.40 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional cuando: Tipo de línea de transmisión: *larga,* no. de ciclos de duración de la falla: 2 *ciclos, c*riterio de aspiración: ***baja influencia***, $\theta$ = 57.19º, $v_T$ = 1 p.u., tipo de búsqueda: *Vecindades laterales sobre una tabla de 25 reglas lingüísticas.* | *113* |
| 5.41 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional cuando: Tipo de línea de transmisión: *corta,* no. de ciclos de duración de la falla: 10 *ciclos, c*riterio de aspiración: ***baja influencia***, $\theta$ = 3º, $v_T$ = 1 p.u., tipo de búsqueda: *Vecindades laterales sobre una tabla de 25 reglas lingüísticas.* | *114* |
| 5.42 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional cuando: Tipo de línea de transmisión: *corta,* no. de ciclos de duración de la falla: 9 *ciclos, c*riterio de aspiración: ***baja influencia***, $\theta$ = 6.8074º, $v_T$ = 1 p.u., tipo de búsqueda: *Vecindades laterales sobre una tabla de 25 reglas lingüísticas.* | *115* |
| 5.43 | Comportamiento del generador síncrono y estructuras finales asociadas empleando 7 funciones de membresía | *119* |
| 5.44 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional cuando: Tipo de línea de transmisión: *larga,* no. de ciclos de duración de la falla: *15 ciclos, c*riterio de aspiración: ***alta influencia***, $\theta$ = 15º, $v_T$ = 1 p.u., tipo de búsqueda: *Vecindades laterales sobre una tabla de 25 reglas lingüísticas.* | *120* |

| *Figura* | *Descripción* | *Página* |
|---|---|---|
| 5.45 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional cuando: Tipo de línea de transmisión: *larga,* no. de ciclos de duración de la falla: *3 ciclos, c*riterio de aspiración: ***alta influencia***, $\theta$ = 43.8728º, $v_T$ = 1 p.u., tipo de búsqueda: *Vecindades laterales sobre una tabla de 25 reglas lingüísticas.* | *121* |
| 5.46 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional cuando: Tipo de línea de transmisión: *larga,* no. de ciclos de duración de la falla: *7 ciclos, c*riterio de aspiración: ***alta influencia***, $\theta$ = 43.8728º, $v_T$ = 1 p.u., tipo de búsqueda: *Vecindades laterales sobre una tabla de 25 reglas lingüísticas.* | *122* |
| 5.47 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional cuando: Tipo de línea de transmisión: *larga,* no. de ciclos de duración de la falla: *5 ciclos, c*riterio de aspiración: ***alta influencia***, $\theta$ = 47.9942º, $v_T$ = 1 p.u., tipo de búsqueda: *Vecindades laterales sobre una tabla de 25 reglas lingüísticas.* | *123* |
| 5.48 | Tablas resultantes después de la aplicación de TS por el criterio de aspiración de alta influencia con $\theta$ = 47.9942º, $v_T$ = 1.0 p.u. y simulando una duración de falla de 5 ciclos correspondientes a la figura 5.53. | *124* |
| 5.49 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional cuando: Tipo de línea de transmisión: *larga,* no. de ciclos de duración de la falla: *3 ciclos, c*riterio de aspiración: ***alta influencia***, $\theta$ = 57.19º, $v_T$ = 1 p.u., tipo de búsqueda: *Vecindades laterales sobre una tabla de 25 reglas lingüísticas.* | *125* |
| 5.50 | Tablas resultantes después de la aplicación de TS por el criterio de aspiración de alta influencia con $\theta$ = 57.19º, $v_T$ = 1.0 p.u. y simulando una duración de falla de 5 ciclos | *126* |
| 5.51 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional cuando: Tipo de línea de transmisión: *corta,* no. de ciclos de duración de la falla: 10 *ciclos, c*riterio de aspiración: ***alta influencia***, $\theta$ = 3º, $v_T$ = 1 p.u., tipo de búsqueda: *Vecindades laterales sobre una tabla de 25 reglas lingüísticas.* | *127* |
| 5.52 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional cuando: Tipo de línea de transmisión: *corta,* no. de ciclos de duración de la falla: 9 *ciclos, c*riterio de aspiración: ***alta influencia***, $\theta$ = 6.8074º, $v_T$ = 1 p.u., tipo de búsqueda: *Vecindades laterales sobre una tabla de 25 reglas lingüísticas.* | *128* |
| 5.53 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional cuando: Tipo de línea de transmisión: *larga,* no. de ciclos de duración de la falla: *27 ciclos, c*riterio de aspiración: ***baja influencia***, $\theta$ = 0º, $v_T$ = 1 p.u., tipo de búsqueda: *Vecindades laterales sobre una tabla de 25 reglas lingüísticas.* | *129* |

| *Figura* | *Descripción* | *Página* |
|---|---|---|
| 5.54 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional cuando: Tipo de línea de transmisión: *larga,* no. de ciclos de duración de la falla: 2*0 ciclos, c*riterio de aspiración: ***baja influencia***, $\theta = 10^{o}$, $v_T = 1$ p.u., tipo de búsqueda: *Vecindades laterales sobre una tabla de 25 reglas lingüísticas.* | *130* |
| 5.55 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional cuando: Tipo de línea de transmisión: *larga,* no. de ciclos de duración de la falla: *7 ciclos, c*riterio de aspiración: ***baja influencia***, $\theta = 43.8728^{o}$, $v_T = 1$ p.u., tipo de búsqueda: *Vecindades laterales sobre una tabla de 25 reglas lingüísticas.* | *131* |
| 5.56 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional cuando: Tipo de línea de transmisión: *larga,* no. de ciclos de duración de la falla: *5 ciclos, c*riterio de aspiración: ***baja influencia***, $\theta = 47.9942^{o}$, $v_T = 1$ p.u., tipo de búsqueda: *Vecindades laterales sobre una tabla de 25 reglas lingüísticas.* | *132* |
| 5.57 | Tablas resultantes después de la aplicación de TS por el criterio de aspiración de alta influencia con $\theta = 47.9942^{o}$, $v_T = 1.0$ p.u. y simulando una duración de falla de 7 ciclos | *133* |
| 5.58 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional cuando: Tipo de línea de transmisión: *larga,* no. de ciclos de duración de la falla: *7 ciclos, c*riterio de aspiración: ***baja influencia***, $\theta = 47.9942^{o}$, $v_T = 1$ p.u., tipo de búsqueda: *Vecindades laterales sobre una tabla de 25 reglas lingüísticas.* | *134* |
| 5.59 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional cuando: Tipo de línea de transmisión: *larga,* no. de ciclos de duración de la falla: *4 ciclos, c*riterio de aspiración: ***baja influencia***, $\theta = 57.19^{o}$, $v_T = 1$ p.u., tipo de búsqueda: *Vecindades laterales sobre una tabla de 25 reglas lingüísticas.* | *135* |
| 5.60 | Tabla de reglas lingüísticas resultante después de la aplicación de TS por el criterio de aspiración de alta influencia con $\theta = 57.19^{o}$, $v_T = 1.0$ p.u. y simulando una duración de falla de 4 ciclos | *136* |
| 5.61 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional cuando: Tipo de línea de transmisión: *corta,* no. de ciclos de duración de la falla: 10 *ciclos, c*riterio de aspiración: ***baja influencia***, $\theta = 3^{o}$, $v_T = 1$ p.u., tipo de búsqueda: *Vecindades laterales sobre una tabla de 25 reglas lingüísticas.* | *137* |
| 5.62 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional cuando: Tipo de línea de transmisión: *corta,* no. de ciclos de duración de la falla: 9 *ciclos, c*riterio de aspiración: ***baja influencia***, $\theta = 6.8074^{o}$, $v_T = 1$ p.u., tipo de búsqueda: *Vecindades laterales sobre una tabla de 25 reglas lingüísticas.* | *138* |
| 5.63 | Estructuras finales de la búsqueda | *139* |

| *Figura* | *Descripción* | *Página* |
|---|---|---|
| 5.64 | Criterio de alta influencia vs criterio de baja influencia, para un punto donde $v_T$ = 1.0 p.u., θ = 47.994, ciclos de falla 5 | *140* |
| 5.65 | Resultados obtenidos después de simular el generador con $v_T$ = 1.0 p.u., θ = 47.994, ciclos de falla 5 utilizando TS por el criterio de ***alta y baja influencia*** | *141* |
| 5.66 | Comportamiento del generador síncrono empleando 9 funciones de membresía con la búsqueda por tabú | *143* |
| 5.67 | Comportamiento del generador difuso empleando la búsqueda por tabú con una tabla de 81 reglas lingüísticas | *144* |
| 5.68 | Tabla resultante después de simular el controlador empleando la búsqueda por tabú | *144* |
| 5.69 | Comportamiento del generador ante un incremento de la potencia activa de 0 a 0.78 p.u. utilizando un control difuso de 9 funciones de membresía y 81 reglas lingüísticas cuando: tipo de línea de transmisión: *larga,* no. de ciclos de duración de la falla: *0 ciclos,* criterio de aspiración: ***alta influencia****,* θ = 0º a 98º, $v_T$ = 1 p.u., tipo de búsqueda: *Por entorno sobre una tabla de 81 reglas lingüísticas.* | *146* |
| 5.70 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 81 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional cuando: Tipo de línea de transmisión: *larga,* no. de ciclos de duración de la falla: 25 *ciclos, c*riterio de aspiración: ***alta influencia***, θ = 0º, $v_T$ = 1 p.u., tipo de búsqueda: *Vecindades laterales sobre una tabla de 25 reglas lingüísticas.* | *147* |
| 5.71 | Estructuras correspondientes a la figura 5.70 después de realizar una prueba empleando una búsqueda por tabú por el criterio de alta influencia sobre entorno | *148* |
| 5.72 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 81 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional cuando: Tipo de línea de transmisión: *larga,* no. de ciclos de duración de la falla: 25 *ciclos, c*riterio de aspiración: ***alta influencia***, θ = 0º, $v_T$ = 1 p.u., tipo de búsqueda: *Vecindades laterales sobre una tabla de 25 reglas lingüísticas.* | *149* |
| 5.73 | Estructuras correspondientes a la figura 5.72 después de la aplicación de TS por el criterio de alta influencia sobre una búsqueda de ***entorno*** con un vt = 1.0 p.u. y θ = 10º con una simulación de falla de duración de 15 ciclos | *150* |
| 5.74 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 81 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional cuando: Tipo de línea de transmisión: *larga,* no. de ciclos de duración de la falla: 10 *ciclos, c*riterio de aspiración: ***alta influencia***, θ = 25º, $v_T$ = 1 p.u., tipo de búsqueda: *Vecindades laterales sobre una tabla de 25 reglas lingüísticas.* | *151* |
| 5.75 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 81 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional cuando: Tipo de línea de transmisión: *larga,* no. de ciclos de duración de la falla: 5 *ciclos, c*riterio de aspiración: ***alta influencia***, θ = 47.9942º, $v_T$ = 1 p.u., tipo de búsqueda: *Vecindades laterales sobre una tabla de 25 reglas lingüísticas.* | *152* |

| *Figura* | *Descripción* | *Página* |
|---|---|---|
| 5.76 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 81 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional cuando: Tipo de línea de transmisión: *larga,* no. de ciclos de duración de la falla: 8 *ciclos, c*riterio de aspiración: ***alta influencia***, $\theta$ = 47.9942º, $v_T$ = 1 p.u., tipo de búsqueda: *Vecindades laterales sobre una tabla de 25 reglas lingüísticas.* | *153* |
| 5.77 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 81 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional cuando: Tipo de línea de transmisión: *larga,* no. de ciclos de duración de la falla: 4 *ciclos, c*riterio de aspiración: ***alta influencia***, $\theta$ = 57.19º, $v_T$ = 1 p.u., tipo de búsqueda: *Vecindades laterales sobre una tabla de 25 reglas lingüísticas.* | *154* |
| 5.78 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 81 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional cuando: Tipo de línea de transmisión: *larga,* no. de ciclos de duración de la falla: 5 *ciclos, c*riterio de aspiración: ***alta influencia***, $\theta$ = 57.19º, $v_T$ = 1 p.u., tipo de búsqueda: *Vecindades laterales sobre una tabla de 25 reglas lingüísticas.* | *155* |
| 5.79 | Estructuras correspondientes a la figura 5.78 después de realizar una prueba empleando una búsqueda por tabú por el criterio de ***alta influenci***a sobre entorno con un vt = 1.0 p.u. y $\theta$ = 57.19º con una simulación de falla de duración de 5 ciclos | *156* |
| 5.80 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional cuando: Tipo de línea de transmisión: *larga,* no. de ciclos de duración de la falla: 25 *ciclos, c*riterio de aspiración: ***alta influencia***, $\theta$ = 0º, $v_T$ = 1 p.u., tipo de búsqueda: *Vecindades laterales sobre una tabla de 25 reglas lingüísticas.* | *157* |
| 5.81 | Tablas resultantes correspondientes a la figura 5.87 después de la aplicación de TS por entorno por el criterio de aspiración de ***alta influencia*** con $\theta$ = 0º, $v_T$ = 1.0 p.u. y simulando una falla de 25 ciclos de duración | *159* |
| 5.82 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional cuando: Tipo de línea de transmisión: *larga,* no. de ciclos de duración de la falla: 10 *ciclos, c*riterio de aspiración: ***alta influencia***, $\theta$ = 20º, $v_T$ = 1 p.u., tipo de búsqueda: *Vecindades laterales sobre una tabla de 25 reglas lingüísticas.* | *160* |
| 5.83 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional cuando: Tipo de línea de transmisión: *larga,* no. de ciclos de duración de la falla: 7 *ciclos, c*riterio de aspiración: ***alta influencia***, $\theta$ = 41º, $v_T$ = 1 p.u., tipo de búsqueda: *Vecindades laterales sobre una tabla de 25 reglas lingüísticas.* | *161* |

| *Figura* | *Descripción* | *Página* |
|---|---|---|
| 5.84 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional cuando: Tipo de línea de transmisión: *larga,* no. de ciclos de duración de la falla: 5 *ciclos, c*riterio de aspiración: ***alta influencia***, θ = 43.8728º, $v_T$ = 1 p.u., tipo de búsqueda: *Vecindades laterales sobre una tabla de 25 reglas lingüísticas.* | *162* |
| 5.85 | Tablas resultantes de reglas lingüísticas después de la aplicación de TS por entorno por el criterio de aspiración de ***alta influencia*** con θ = 43.8728º, $v_T$ = 1.0 p.u. y simulando una duración de falla de 7 ciclos. | *163* |
| 5.86 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional cuando: Tipo de línea de transmisión: *larga,* no. de ciclos de duración de la falla: 8 *ciclos, c*riterio de aspiración: ***alta influencia***, θ = 43.8728º, $v_T$ = 1 p.u., tipo de búsqueda: *Vecindades laterales sobre una tabla de 25 reglas lingüísticas.* | *164* |
| 5.87 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional cuando: Tipo de línea de transmisión: *larga,* no. de ciclos de duración de la falla: 3 *ciclos, c*riterio de aspiración: ***alta influencia***, θ = 52.399º, $v_T$ = 1 p.u., tipo de búsqueda: *Vecindades laterales sobre una tabla de 25 reglas lingüísticas.* | *165* |
| 5.88 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional cuando: Tipo de línea de transmisión: *larga,* no. de ciclos de duración de la falla: 5 *ciclos, c*riterio de aspiración: ***alta influencia***, θ = 52.399º, $v_T$ = 1 p.u., tipo de búsqueda: *Vecindades laterales sobre una tabla de 25 reglas lingüísticas.* | *166* |
| 5.89 | Tabla resultantes correspondientes a la figura 5.97 después de la aplicación de TS por entorno por el criterio de aspiración de alta influencia con θ = 52.3999º, $v_T$ = 1.0 p.u. y simulando una duración de falla de 3 ciclos | *167* |
| 5.90 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional cuando: Tipo de línea de transmisión: *larga,* no. de ciclos de duración de la falla: 3 *ciclos, c*riterio de aspiración: ***alta influencia***, θ = 57.19º, $v_T$ = 1 p.u., tipo de búsqueda: *Vecindades laterales sobre una tabla de 25 reglas lingüísticas.* | *168* |
| 5.91 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional cuando: Tipo de línea de transmisión: *larga,* no. de ciclos de duración de la falla: 4 *ciclos, c*riterio de aspiración: ***alta influencia***, θ = 57.19º, $v_T$ = 1 p.u., tipo de búsqueda: *Vecindades laterales sobre una tabla de 25 reglas lingüísticas.* | *169* |
| 5.92 | Tablas resultantes después de la búsqueda por entorno | *170* |

| *Figura* | *Descripción* | *Página* |
|---|---|---|
| 5.93 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional cuando: tipo de línea de transmisión: *larga, n*o. de ciclos de duración de la falla: *30ciclos,* criterio de aspiración: ***alta influencia***, $\theta = 0^{o}$, $v_T = 1$ p.u., $\Delta e = 0.01$, $\Delta de = 0.0005$, tipo de búsqueda: Sintonización de funciones de membresía. | *172* |
| 5.94 | Funciones de membresía resultantes correspondientes a la figura 5.93 después de aplicar TS por el criterio de ***alta influencia***, donde $\theta = 0^{o}$, $v_T = 1$ p.u. empleando una línea de transmisión larga simulando una falla con una duración de 30 ciclos | *173* |
| 5.95 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional cuando: tipo de línea de transmisión: *larga, n*o. de ciclos de duración de la falla: *15 ciclos,* criterio de aspiración: ***alta influencia***, $\theta = 7^{o}$, $v_T = 1$ p.u., $\Delta e = 0.01$, $\Delta de = 0.0005$, tipo de búsqueda: Sintonización de funciones de membresía. | *174* |
| 5.96 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional cuando: tipo de línea de transmisión: *larga, n*o. de ciclos de duración de la falla: *10 ciclos,* criterio de aspiración: ***alta influencia***, $\theta = 30^{o}$, $v_T = 1$ p.u., $\Delta e = 0.01$, $\Delta de = 0.0005$, tipo de búsqueda: Sintonización de funciones de membresía. | *175* |
| 5.97 | Funciones de membresía resultantes correspondientes a la figura 5.96 después de aplicar TS por el criterio de ***alta influencia*** con: $\Delta e = 0.01$, $\Delta de = 0.0005$, tipo de línea de transmisión: *larga,* No. de ciclos de duración de la falla: *10 ciclos,* $\theta = 25^{o}$, $v_T = 1$ p.u. | *176* |
| 5.98 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional cuando: tipo de línea de transmisión: *larga, n*o. de ciclos de duración de la falla: *7 ciclos,* criterio de aspiración: ***alta influencia***, $\theta = 43.8728^{o}$, $v_T = 1$ p.u., $\Delta e = 0.01$, $\Delta de = 0.0005$, tipo de búsqueda: Sintonización de funciones de membresía. | *177* |
| 5.99 | Funciones de membresía resultantes correspondientes a la figura 5.98 después de aplicar TS por el criterio de ***alta influencia*** con: $\Delta e = 0.01$, $\Delta de = 0.0005$, tipo de línea de transmisión: *larga,* No. de ciclos de duración de la falla: *7 ciclos,* $\theta = 43.8728^{o}$, $v_T = 1$ p.u. | *178* |
| 5.100 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional cuando: tipo de línea de transmisión: *larga, n*o. de ciclos de duración de la falla: 4 *ciclos,* criterio de aspiración: ***alta influencia***, $\theta = 52.3999^{o}$, $v_T = 1$ p.u., $\Delta e = 0.01$, $\Delta de = 0.0005$, tipo de búsqueda: Sintonización de funciones de membresía. | *179* |
| 5.101 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional cuando: tipo de línea de transmisión: *larga, n*o. de ciclos de duración de la falla: *3 ciclos,* criterio de aspiración: ***alta influencia***, $\theta = 57.19^{o}$, $v_T = 1$ p.u., $\Delta e = 0.01$, $\Delta de = 0.0005$, tipo de búsqueda: Sintonización de funciones de membresía. | *180* |

| *Figura* | *Descripción* | *Página* |
|---|---|---|
| 5.102 | Funciones de membresía resultantes correspondientes a la figura 5.101 después de aplicar TS por el criterio de ***alta influencia*** con: $\Delta e = 0.01$, $\Delta de=0.0005$, tipo de línea de transmisión: *larga,* No. de ciclos de duración de la falla: 3 *ciclos,* $\theta = 57.19º$, $v_T = 1$ p.u. | *181* |
| 5.103 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional cuando: tipo de línea de transmisión: *corta, n*o. de ciclos de duración de la falla: *30 ciclos,* criterio de aspiración: ***alta influencia***, $\theta = 0º$, $v_T = 1$ p.u., $\Delta e = 0.01$, $\Delta de= 0.0005$, tipo de búsqueda: Sintonización de funciones de membresía. | *182* |
| 5.104 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional cuando: tipo de línea de transmisión: *corta, n*o. de ciclos de duración de la falla: 15 *ciclos,* criterio de aspiración: ***alta influencia***, $\theta = 3º$, $v_T = 1$ p.u., $\Delta e = 0.01$, $\Delta de= 0.0005$, tipo de búsqueda: Sintonización de funciones de membresía. | *183* |
| 5.105 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional cuando: tipo de línea de transmisión: *corta, n*o. de ciclos de duración de la falla: *9 ciclos,* criterio de aspiración: ***alta influencia***, $\theta = 6.8079º$, $v_T = 1$ p.u., $\Delta e = 0.01$, $\Delta de= 0.0005$, tipo de búsqueda: Sintonización de funciones de membresía. | *184* |
| 5.106 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional cuando: tipo de línea de transmisión: *larga, n*o. de ciclos de duración de la falla: *30 ciclos,* criterio de aspiración: ***Baja influencia***, $\theta = 0º$, $v_T = 1$ p.u., $\Delta e = 0.01$, $\Delta de= 0.0005$, tipo de búsqueda: Sintonización de funciones de membresía. | *186* |
| 5.107 | Funciones de membresía resultantes correspondientes a la figura 5.106 después de aplicar TS por el criterio de baja influencia con: $\Delta e = 0.01$, $\Delta de=0.0005$, tipo de, línea de transmisión: *larga,* $\theta = 0º$, $v_T = 1$ p.u., no. de ciclos de duración de la falla: *30 ciclos* | *187* |
| 5.108 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional cuando: tipo de línea de transmisión: *larga, n*o. de ciclos de duración de la falla: 15 *ciclos,* criterio de aspiración: ***Baja influencia***, $\theta = 7º$, $v_T = 1$ p.u., $\Delta e = 0.01$, $\Delta de= 0.0005$, tipo de búsqueda: Sintonización de funciones de membresía. | *188* |
| 5.109 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional cuando: tipo de línea de transmisión: *larga, n*o. de ciclos de duración de la falla: 10 *ciclos,* criterio de aspiración: ***Baja influencia***, $\theta = 30º$, $v_T = 1$ p.u., $\Delta e = 0.01$, $\Delta de= 0.0005$, tipo de búsqueda: Sintonización de funciones de membresía. | *189* |

| *Figura* | *Descripción* | *Página* |
|---|---|---|
| 5.110 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional cuando: tipo de línea de transmisión: *larga, n*o. de ciclos de duración de la falla: 7 *ciclos,* criterio de aspiración: ***baja influencia***, $\theta$ = 47.8728º, $v_T$ = 1 p.u., $\Delta e$ = 0.01, $\Delta de$= 0.0005, tipo de búsqueda: Sintonización de funciones de membresía. | *190* |
| 5.111 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional cuando: tipo de línea de transmisión: *larga, n*o. de ciclos de duración de la falla: 4 *ciclos,* criterio de aspiración: ***baja influencia***, $\theta$ = 52.3339º, $v_T$ = 1 p.u., $\Delta e$ = 0.01, $\Delta de$= 0.0005, tipo de búsqueda: Sintonización de funciones de membresía. | *191* |
| 5.112 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional cuando: tipo de línea de transmisión: *larga, n*o. de ciclos de duración de la falla: 3 *ciclos,* criterio de aspiración: ***baja influencia***, $\theta$ = 57.19º, $v_T$ = 1 p.u., $\Delta e$ = 0.01, $\Delta de$= 0.0005, tipo de búsqueda: Sintonización de funciones de membresía. | *192* |
| 5.113 | Funciones de membresía resultantes correspondientes a la figura 5.110 después de aplicar TS por el criterio de alta influencia con: tipo de línea de transmisión: *Baja,* no. de ciclos de duración de la falla: *3 ciclos,* $\theta$ = 57.19º, $v_T$ = 1 p.u., $\Delta e$ = 0.01, $\Delta de$=0.0005 | *193* |
| 5.114 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional cuando: tipo de línea de transmisión: *larga, n*o. de ciclos de duración de la falla: 4 *ciclos,* criterio de aspiración: ***alta vs baja influencia***, $\theta$ = 47.9942º, $v_T$ = 1 p.u., $\Delta e$ = 0.01, $\Delta de$= 0.0005. | *193* |
| 5.115 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional cuando: tipo de línea de transmisión: *larga, n*o. de ciclos de duración de la falla: 7 *ciclos,* criterio de aspiración: ***Alta vs Baja influencia***, $\theta$ = 47.8328º, $v_T$ = 1 p.u., $\Delta e$ = 0.01, $\Delta de$= 0.0005. | *194* |
| 5.116 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional cuando: tipo de línea de transmisión: *larga, n*o. de ciclos de duración de la falla: 2 *ciclos,* criterio de aspiración: ***alta vs baja influencia***, $\theta$ = 57.19º, $v_T$ = 1 p.u., $\Delta e$ = 0.01, $\Delta de$= 0.0005. | *194* |
| 5.117 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional cuando: tipo de línea de transmisión: *larga, n*o. de ciclos de duración de la falla: 3 *ciclos,* criterio de aspiración: ***alta vs baja influencia***, $\theta$ = 57.19º, $v_T$ = 1 p.u., $\Delta e$ = 0.01, $\Delta de$= 0.0005. | *194* |

| *Figura* | *Descripción* | *Página* |
|---|---|---|
| 5.118 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional cuando: tipo de línea de transmisión: *corta, n*o. de ciclos de duración de la falla: 3 *ciclos,* criterio de aspiración: ***baja influencia***, $\theta$ = 57.19º, $v_T$ = 1 p.u., $\Delta e$ = 0.01, $\Delta de$= 0.0005, tipo de búsqueda: Sintonización de funciones de membresía. | *195* |
| 5.119 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional cuando: tipo de línea de transmisión: *corta, n*o. de ciclos de duración de la falla: 15 *ciclos,* criterio de aspiración: ***baja influencia***, $\theta$ = 3º, $v_T$ = 1 p.u., $\Delta e$ = 0.01, $\Delta de$= 0.0005, tipo de búsqueda: Sintonización de funciones de membresía. | *196* |
| 5.120 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional cuando: tipo de línea de transmisión: *corta, n*o. de ciclos de duración de la falla: 9 *ciclos,* criterio de aspiración: ***baja influencia***, $\theta$ = 6.8074º, $v_T$ = 1 p.u., $\Delta e$ = 0.01, $\Delta de$= 0.0005, tipo de búsqueda: Sintonización de funciones de membresía. | *197* |
| 5.121 | Comportamiento del generador síncrono empleando TS y ST1 | *198* |
| 5.122 | Comportamiento del generador síncrono empleando TS y ST1 | *199* |
| 5.123 | Funciones de membresía resultantes | *199* |
| 5.124 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional cuando: tipo de línea de transmisión: *larga, n*o. de ciclos de duración de la falla: 10 *ciclos,* criterio de aspiración: ***alta influencia,*** $\theta$ = 0º, $v_T$ = 1 p.u., $\Delta e$ = 0.01, $\Delta de$= 0.0005. | *200* |
| 5.125 | Funciones de membresía y estructuras resultantes correspondientes a la figura 5.124 después de aplicar TS por el criterio de alta influencia con: tipo de línea de transmisión: *larga,* criterio de aspiración: ***alta influencia****,* no. de ciclos de duración de la falla: 1*0 ciclos,* $\theta$ = 0º, $v_T$ = 1 p.u., $\Delta e$ = 0.001, $\Delta de$=0.0001 | *201* |
| 5.126 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional cuando: tipo de línea de transmisión: *larga, n*o. de ciclos de duración de la falla: 10 *ciclos,* criterio de aspiración: ***alta influencia***, $\theta$ = 25º, $v_T$ = 1 p.u., $\Delta e$ = 0.01, $\Delta de$= 0.0005. | *202* |
| 5.127 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional cuando: tipo de línea de transmisión: *larga, n*o. de ciclos de duración de la falla: 3 *ciclos,* criterio de aspiración: ***alta influencia***, $\theta$ = 57.19º, $v_T$ = 1 p.u., $\Delta e$ = 0.01, $\Delta de$= 0.0005. | *203* |
| 5.128 | Funciones de membresía resultantes correspondientes a la figura 5.127 después de aplicar TS por el criterio de alta influencia con: tipo de línea de transmisión: *larga,* criterio de aspiración: ***alta influencia****,* no. de ciclos de duración de la falla: 3 *ciclos,* $\theta$ = 57.19º, $v_T$ = 1 p.u., $\Delta e$ = 0.001, $\Delta de$=0.0001 | *204* |

| *Figura* | *Descripción* | *Página* |
|---|---|---|
| 5.129 | Funciones de membresía resultantes correspondientes a la figura 5.124 después de aplicar TS por el criterio de alta influencia con: tipo de línea de transmisión: *corta,* criterio de aspiración: ***alta influencia****,* no. de ciclos de duración de la falla: 1*0 ciclos,* $\theta = 0^{o}$, $v_T = 1$ p.u., $\Delta e = 0.001$, $\Delta de=0.0001$ | *205* |
| 5.130 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional cuando: tipo de línea de transmisión: *corta, n*o. de ciclos de duración de la falla: 9 *ciclos,* criterio de aspiración: ***alta influencia***, $\theta = 6.8074^{o}$, $v_T = 1$ p.u., $\Delta e = 0.01$, $\Delta de= 0.0005$. | *206* |
| 5.131 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional cuando: tipo de línea de transmisión: *larga, n*o. de ciclos de duración de la falla: 10 *ciclos,* criterio de aspiración: ***baja influencia***, $\theta = 0^{o}$, $v_T = 1$ p.u., $\Delta e = 0.01$, $\Delta de= 0.0005$. | *208* |
| 5.132 | Funciones de membresía resultantes correspondientes a la figura 5.131 después de aplicar TS por el criterio de alta influencia con: tipo de línea de transmisión: *corta,* criterio de aspiración: ***baja influencia****,* no. de ciclos de duración de la falla: 1*0 ciclos,* $\theta = 0^{o}$, $v_T = 1$ p.u., $\Delta e = 0.001$, $\Delta de=0.0001$ | *209* |
| 5.133 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional cuando: tipo de línea de transmisión: *larga, n*o. de ciclos de duración de la falla: 10 *ciclos,* criterio de aspiración: ***baja influencia***, $\theta = 25^{o}$, $v_T = 1$ p.u., $\Delta e = 0.01$, $\Delta de= 0.0005$. | *210* |
| 5.134 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional cuando: tipo de línea de transmisión: *larga, n*o. de ciclos de duración de la falla: 3 *ciclos,* criterio de aspiración: *Baja influencia*, $\theta = 57.19^{o}$, $v_T = 1$ p.u., $\Delta e = 0.01$, $\Delta de= 0.0005$. | *211* |
| 5.135 | Funciones de membresía resultantes correspondientes a la figura 5.134 después de aplicar TS por el criterio de alta influencia con: tipo de línea de transmisión: *corta,* criterio de aspiración: ***alta influencia****,* no. de ciclos de duración de la falla: 3 *ciclos,* $\theta = 57.19^{o}$, $v_T = 1$ p.u., $\Delta e = 0.001$, $\Delta de=0.0001$ | *212* |
| 5.136 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional cuando: tipo de línea de transmisión: *corta, n*o. de ciclos de duración de la falla: 10 *ciclos,* criterio de aspiración: ***baja influencia***, $\theta = 0^{o}$, $v_T = 1$ p.u., $\Delta e = 0.01$, $\Delta de= 0.0005$. | *213* |
| 5.137 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional cuando: tipo de línea de transmisión: *corta, n*o. de ciclos de duración de la falla: 9 *ciclos,* criterio de aspiración: ***baja influencia,*** $\theta = 6.8079^{o}$, $v_T = 1$ p.u., $\Delta e = 0.01$, $\Delta de= 0.0005$. | *214* |
| 5.138 | Criterio de alta influencia vs. Criterio de baja influencia | *216* |
| 5.139 | Estructuras auxiliares de la búsqueda por tabú en diferentes puntos del tiempo de la simulación | *217* |

| *Figura* | *Descripción* | *Página* |
|---|---|---|
| 5.140 | Comportamiento del generador síncrono con una duración de simulación de 250 segundos comenzando desde vacío hasta un punto de operación donde la potencia activa es igual a 0.775 p.u. y un ángulo de carga de 97º. | *221* |
| 5.141 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con AG, difuso y regulador convencional cuando: tipo de línea de transmisión: larga, no. de ciclos de duración de la falla: 15 ciclos, no. de generaciones: 500, $\theta$ = 0º, $v_T$ = 1 p.u., $\Delta e$ = 0.01, $\Delta de$= 0.0005 | *223* |
| 5.142 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con AG, difuso y regulador convencional cuando: tipo de línea de transmisión: larga, no. de ciclos de duración de la falla: 15 ciclos, no. de generaciones: 500, $\theta$ = 6.8074º, $v_T$ = 1 p.u., $\Delta e$ = 0.01, $\Delta de$= 0.0005 | *224* |
| 5.143 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con AG, difuso y regulador convencional cuando: tipo de línea de transmisión: larga, no. de ciclos de duración de la falla: 25 ciclos, no. de generaciones: 500, $\theta$ = 10º, $v_T$ = 1 p.u., $\Delta e$ = 0.01, $\Delta de$= 0.0005 | *225* |
| 5.144 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con AG, difuso y regulador convencional cuando: tipo de línea de transmisión: larga, no. de ciclos de duración de la falla: 8 ciclos, no. de generaciones: 500, $\theta$ = 43.8728º, $v_T$ = 1 p.u., $\Delta e$ = 0.01, $\Delta de$= 0.0005 | *226* |
| 5.145 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con AG, difuso y regulador convencional cuando: tipo de línea de transmisión: larga, no. de ciclos de duración de la falla: 5 ciclos, no. de generaciones: 500, $\theta$ = 47.9942º, $v_T$ = 1 p.u., $\Delta e$ = 0.01, $\Delta de$= 0.0005 | *227* |
| 5.146 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con AG, difuso y regulador convencional cuando: tipo de línea de transmisión: larga, no. de ciclos de duración de la falla: 7 ciclos, no. de generaciones: 500, $\theta$ = 47.9942º, $v_T$ = 1 p.u., $\Delta e$ = 0.01, $\Delta de$= 0.0005 | *228* |
| 5.147 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con AG, difuso y regulador convencional cuando: tipo de línea de transmisión: larga, no. de ciclos de duración de la falla: 3 ciclos, no. de generaciones: 500, $\theta$ = 57.19º, $v_T$ = 1 p.u., $\Delta e$ = 0.01, $\Delta de$= 0.0005 | *229* |
| 5.148 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con AG, difuso y regulador convencional cuando: tipo de línea de transmisión: larga, no. de ciclos de duración de la falla: 4 ciclos, no. de generaciones: 500, $\theta$ = 57.19º, $v_T$ = 1 p.u., $\Delta e$ = 0.01, $\Delta de$= 0.0005 | *230* |

| *Figura* | *Descripción* | *Página* |
|---|---|---|
| 5.149 | Intervalos resultantes para 5 funciones de membresía después de aplicar AG con 500 generaciones para una condición de $v_T = 1.0$ p.u. y $\theta = 0^o$, con una falla de duración de 15 ciclos cuando t =1 seg. | *231* |
| 5.150 | Intervalos resultantes para 5 funciones de membresía después de aplicar AG con 500 generaciones para una condición de $v_T = 1.0$ p.u. y $\theta = 0^o$, con una falla de duración de 25 ciclos cuando t =1 seg. | *231* |
| 5.151 | Intervalos resultantes para 5 funciones de membresía después de aplicar AG con 500 generaciones para una condición de $v_T = 1.0$ p.u. y $\theta = 0^o$, Potencia activa = 0.0 p.u. con un incremento a $v_T = 1.0$ p.u. $\theta = 98^o$ y potencia activa = 0.785 p.u. | *231* |
| 5.152 | Intervalos resultantes para 5 funciones de membresía después de aplicar AG con 500 generaciones para una condición de $v_T = 1.0$ p.u. y $\theta = 43.8728^o$, con una falla de duración de 9 ciclos cuando t =1 seg. | *231* |
| 5.153 | Intervalos resultantes para 5 funciones de membresía después de aplicar AG con 500 generaciones para una condición de $v_T = 1.0$ p.u. y $\theta = 47.9942^o$, con una falla de duración de 7 ciclos cuando t =1 seg. | *232* |
| 5.154 | Intervalos resultantes para 5 funciones de membresía después de aplicar AG con 500 generaciones para una condición de $v_T = 1.0$ p.u. y $\theta = 57.19^o$, con una falla de duración de 4 ciclos cuando t =1 seg. | *232* |
| 5.155 | Intervalos resultantes para 5 funciones de membresía después de aplicar AG con 500 generaciones para una condición de $v_T = 1.0$ p.u. y $\theta = 43.8728^o$, con una falla de duración de 8 ciclos cuando t =1 seg. | *232* |
| 5.156 | Intervalos resultantes para 5 funciones de membresía después de aplicar AG con 500 generaciones para una condición de $v_T = 1.0$ p.u. y $\theta = 57.19^o$, con una falla de duración de 3 ciclos cuando t =1 seg. | *232* |
| 5.157 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con AG, difuso y regulador convencional cuando: tipo de línea de transmisión: corta, no. de ciclos de duración de la falla: 20 ciclos, no. de generaciones: 500, $\theta = 0^o$, $v_T = 1$ p.u., $\Delta e = 0.01$, $\Delta de = 0.0005$ | *233* |
| 5.158 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con AG, difuso y regulador convencional cuando: tipo de línea de transmisión: corta, no. de ciclos de duración de la falla: 20 ciclos, no. de generaciones: 500, $\theta = 3^o$, $v_T = 1$ p.u., $\Delta e = 0.01$, $\Delta de = 0.0005$ | *234* |
| 5.159 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con AG, difuso y regulador convencional cuando: tipo de línea de transmisión: corta, no. de ciclos de duración de la falla: 9 ciclos, no. de generaciones: 500, $\theta = 6.8974^o$, $v_T = 1$ p.u., $\Delta e = 0.01$, $\Delta de = 0.0005$ | *235* |
| 5.160 | Comportamiento del generador empleando 9 y 7 funciones de membresía realizando una comparación gráfica entre la optimización hecha por los algoritmos genéticos y la búsqueda por tabú. | *236* |

| *Figura* | *Descripción* | *Página* |
|---|---|---|
| 5.161 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con AG, difuso y regulador convencional cuando: tipo de línea de transmisión: larga, no. de ciclos de duración de la falla: 10 ciclos, no. de generaciones: 500, $\theta = 0^{o}$, $v_T = 1$ p.u., $\Delta e = 0.01$, $\Delta de = 0.0005$ | *240* |
| 5.162 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con AG, difuso y regulador convencional cuando: tipo de línea de transmisión: larga, no. de ciclos de duración de la falla: 25 ciclos, no. de generaciones: 500, $\theta = 0^{o}$, $v_T = 1$ p.u., $\Delta e = 0.01$, $\Delta de = 0.0005$ | *241* |
| 5.163 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con AG, difuso y regulador convencional cuando: tipo de línea de transmisión: larga, no. de ciclos de duración de la falla: 15 ciclos, no. de generaciones: 500, $\theta = 15^{o}$, $v_T = 1$ p.u., $\Delta e = 0.01$, $\Delta de = 0.0005$ | *242* |
| 5.164 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con AG, difuso y regulador convencional cuando: tipo de línea de transmisión: larga, no. de ciclos de duración de la falla: 7 ciclos, no. de generaciones: 500, $\theta = 47.9942^{o}$, $v_T = 1$ p.u., $\Delta e = 0.001$, $\Delta de = 0.0001$ | *243* |
| 5.165 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con AG, difuso y regulador convencional cuando: tipo de línea de transmisión: larga, no. de ciclos de duración de la falla: 8 ciclos, no. de generaciones: 500, $\theta = 43.8728^{o}$, $v_T = 1$ p.u., $\Delta e = 0.001$, $\Delta de = 0.0001$ | *244* |
| 5.166 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con AG, difuso y regulador convencional cuando: tipo de línea de transmisión: larga, no. de ciclos de duración de la falla: 5 ciclos, no. de generaciones: 500, $\theta = 52.3999^{o}$, $v_T = 1$ p.u., $\Delta e = 0.001$, $\Delta de = 0.0001$ | *245* |
| 5.167 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con AG, difuso y regulador convencional cuando: tipo de línea de transmisión: larga, no. de ciclos de duración de la falla: 3 ciclos, no. de generaciones: 500, $\theta = 57.19^{o}$, $v_T = 1$ p.u., $\Delta e = 0.001$, $\Delta de = 0.0001$ | *246* |
| 5.168 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con AG, difuso y regulador convencional cuando: tipo de línea de transmisión: larga, no. de ciclos de duración de la falla: 4 ciclos, no. de generaciones: 500, $\theta = 57.19^{o}$, $v_T = 1$ p.u., $\Delta e = 0.001$, $\Delta de = 0.0001$ | *247* |
| 5.169 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con AG, difuso y regulador convencional cuando: tipo de línea de transmisión: corta, no. de ciclos de duración de la falla: 20 ciclos, no. de generaciones: 500, $\theta = 0^{o}$, $v_T = 1$ p.u., $\Delta e = 0.001$, $\Delta de = 0.0001$ | *248* |

| *Figura* | *Descripción* | *Página* |
|---|---|---|
| 5.170 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con AG, difuso y regulador convencional cuando: tipo de línea de transmisión: corta, no. de ciclos de duración de la falla: 20 ciclos, no. de generaciones: 500, $\theta = 3^{o}$, $v_T = 1$ p.u., $\Delta e = 0.001$, $\Delta de = 0.0001$ | *249* |
| 5.171 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con AG, difuso y regulador convencional cuando: tipo de línea de transmisión: corta, no. de ciclos de duración de la falla: 9 ciclos, no. de generaciones: 500, $\theta = 6.8079^{o}$, $v_T = 1$ p.u., $\Delta e = 0.001$, $\Delta de = 0.0001$ | *250* |
| 5.172 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con AG, difuso y regulador convencional cuando: tipo de línea de transmisión: larga, no. de ciclos de duración de la falla: 30 ciclos, no. de generaciones: 300, $\theta = 0^{o}$, $v_T = 1$ p.u., $\Delta e = 0.01$, $\Delta de = 0.0005$ | *251* |
| 5.171 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con AG, difuso y regulador convencional cuando: tipo de línea de transmisión: larga, no. de ciclos de duración de la falla: 10 ciclos, no. de generaciones: 300, $\theta = 10^{o}$, $v_T = 1$ p.u., $\Delta e = 0.01$, $\Delta de = 0.0005$ | *252* |
| 5.174 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con AG, difuso y regulador convencional cuando: tipo de línea de transmisión: larga, no. de ciclos de duración de la falla: 10 ciclos, no. de generaciones: 300, $\theta = 25^{o}$, $v_T = 1$ p.u., $\Delta e = 0.01$, $\Delta de = 0.0005$ | *253* |
| 5.175 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con AG, difuso y regulador convencional cuando: tipo de línea de transmisión: larga, no. de ciclos de duración de la falla: 3 ciclos, no. de generaciones: 300, $\theta = 57.19^{o}$, $v_T = 1$ p.u., $\Delta e = 0.01$, $\Delta de = 0.0005$ | *254* |
| 5.176 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con AG, difuso y regulador convencional cuando: tipo de línea de transmisión: larga, no. de ciclos de duración de la falla: 30 ciclos, no. de generaciones: 300, $\theta = 0^{o}$, $v_T = 1$ p.u., $\Delta e = 0.001$, $\Delta de = 0.0001$ | *255* |
| 5.177 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con AG, difuso y regulador convencional cuando: tipo de línea de transmisión: larga, no. de ciclos de duración de la falla: 3 ciclos, no. de generaciones: 300, $\theta = 57.19^{o}$, $v_T = 1$ p.u., $\Delta e = 0.001$, $\Delta de = 0.0001$ | *256* |
| 5.178 | Funciones de membresía resultantes después de aplicar AG por selección de rueda-ruleta con los siguientes datos: $\Delta e = 0.0001$, $\Delta de = 0.00001$, no. de generaciones: 500, pc: 0.987, pm: 0.123, tipo de línea de transmisión: *larga,* no. de ciclos de duración de la falla: *30 ciclos,* $\theta = 0^{o}$, $v_T = 1$ p.u. | *257* |

| *Figura* | *Descripción* | *Página* |
|---|---|---|
| 5.179 | Funciones de membresía resultantes después de aplicar AG por selección de rueda-ruleta con los siguientes datos: Δe = 0.0001, Δde=0.00001, no. de generaciones: 500, pc: 0.987, pm: 0.123, tipo de línea de transmisión: *larga,* no. de ciclos de duración de la falla: *15 ciclos,* θ = 15º, $v_T$ = 1 p.u. | *257* |
| 5.180 | Funciones de membresía resultantes después de aplicar AG por selección de rueda-ruleta con los siguientes datos: Δe = 0.0001, Δde=0.00001, no. de generaciones: 500, pc: 0.987, pm: 0.123, tipo de línea de transmisión: *larga,* no. de ciclos de duración de la falla: *7 ciclos,* θ = 47.9942º, $v_T$ = 1 p.u. | *258* |
| 5.181 | Funciones de membresía resultantes después de aplicar AG por selección de rueda-ruleta con los siguientes datos: Δe = 0.0001, Δde=0.00001, no. de generaciones: 500, pc: 0.987, pm: 0.123, tipo de línea de transmisión: *larga,* no. de ciclos de duración de la falla: 5 *ciclos,* θ = 52.3999º, $v_T$ = 1 p.u. | *258* |
| 5.182 | Funciones de membresía resultantes después de aplicar AG por selección de rueda-ruleta con los siguientes datos: Δe = 0.0001, Δde=0.00001, no. de generaciones: 500, pc: 0.987, pm: 0.123, tipo de línea de transmisión: *larga,* no. de ciclos de duración de la falla: *3 ciclos,* θ = 57.19º, $v_T$ = 1 p.u. | *258* |
| 5.183 | Funciones de membresía resultantes después de aplicar AG por selección de rueda-ruleta con los siguientes datos: Δe = 0.0001, Δde=0.00001, no. de generaciones: 300, pc: 0.987, pm: 0.123, tipo de línea de transmisión: *larga,* no. de ciclos de duración de la falla: *30 ciclos,* θ = 0º, $v_T$ = 1 p.u. | *259* |
| 5.184 | Funciones de membresía resultantes después de aplicar AG por selección de rueda-ruleta con los siguientes datos: Δe = 0.0001, Δde=0.00001, no. de generaciones: 300, pc: 0.987, pm: 0.123, tipo de línea de transmisión: *larga,* no. de ciclos de duración de la falla: *15 ciclos,* θ = 15º, $v_T$ = 1 p.u. | *259* |
| 5.185 | Funciones de membresía resultantes después de aplicar AG por selección de rueda-ruleta con los siguientes datos: Δe = 0.0001, Δde=0.00001, no. de generaciones: 300, pc: 0.987, pm: 0.123, tipo de línea de transmisión: *larga,* no. de ciclos de duración de la falla: *7 ciclos,* θ = 47.9942º, $v_T$ = 1 p.u. | *259* |
| 5.186 | Funciones de membresía resultantes después de aplicar AG por selección de rueda-ruleta con los siguientes datos: Δe = 0.0001, Δde=0.00001, no. de generaciones: 300, pc: 0.987, pm: 0.123, tipo de línea de transmisión: *larga,* no. de ciclos de duración de la falla: *5 ciclos,* θ = 52.3999º, $v_T$ = 1 p.u. | *260* |
| 5.187 | Funciones de membresía resultantes después de aplicar AG por selección de rueda-ruleta con los siguientes datos: Δe = 0.0001, Δde=0.00001, no. de generaciones: 300, pc: 0.987, pm: 0.123, tipo de línea de transmisión: *larga,* no. de ciclos de duración de la falla: *4 ciclos,* θ = 57.19º, $v_T$ = 1 p.u. | *260* |

| *Figura* | *Descripción* | *Página* |
|---|---|---|
| 5.188 | Comparación del comportamiento del voltaje terminal cuando se aplica una optimización sobre las funciones de membresía y una optimización sobre la tabla de reglas. | *262* |
| 5.189 | Comportamiento del generador síncrono aplicando AG y TS | *267* |
| 5.190 | Comportamiento del generador síncrono empleando AG/TS con 5 y 7 funciones de membresía | *269* |
| 5.191 | Funciones de membresía iniciales para el controlador difuso con 49 reglas correspondientes a la prueba de la figura 5.190 | *270* |
| 5.192 | Resultados obtenidos después de aplicar TS y AG desde un punto de vacío hasta un valor de la potencia activa de 0.788 p.u. en menos de 100 segundos de simulación para 5 y 7 funciones de membresía | *271* |
| 5.193 | Resultados comparativos entre un controlador difuso de 7 funciones de membresía sintonizado por AG/TS y un controlador difuso de 81 reglas lingüísticas sintonizado por TS por entorno con las siguientes características: tipo de línea de transmisión: larga, criterio de aspiración: *Alta influencia*, no. De generaciones: 50000, tipo de selección: Rueda-ruleta, Pc=0.987, pm = 0.123, $\Delta$de = 0.0001, $\Delta$e = 0.0008 | *273* |
| 5.194 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con TS/AG, TS y AG, con los siguientes datos: tipo de línea de transmisión: larga, no. de ciclos de duración de la falla: *10 ciclos,* criterio de aspiración: *Alta influencia*, $\theta = 10^{o}$, $v_T = 1$ p.u., no. De generaciones: 500, tipo de selección: Rueda-ruleta, Pc = 0.987, pm = 0.123, $\Delta$de = 0.0001, $\Delta$e = 0.0008 | *274* |
| 5.195 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con TS/AG, TS y AG, con los siguientes datos: tipo de línea de transmisión: larga, no. de ciclos de duración de la falla: *30 ciclos,* criterio de aspiración: *Alta influencia*, $\theta = 0^{o}$, $v_T = 1$ p.u., no. De generaciones: 500, tipo de selección: Rueda-ruleta, Pc = 0.987, pm = 0.123, $\Delta$de = 0.0001, $\Delta$e = 0.0008 | *275* |
| 5.196 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con TS/AG, TS y AG, con los siguientes datos: tipo de línea de transmisión: larga, no. de ciclos de duración de la falla: *4 ciclos,* criterio de aspiración: *Alta influencia*, $\theta = 57.19^{o}$, $v_T = 1$ p.u., no. De generaciones: 500, tipo de selección: Rueda-ruleta, Pc = 0.987, pm = 0.123, $\Delta$de = 0.0001, $\Delta$e = 0.0008 | *276* |
| 5.197 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con TS/AG, TS y AG, con los siguientes datos: tipo de línea de transmisión: larga, no. de ciclos de duración de la falla: *2 ciclos,* criterio de aspiración: *Alta influencia*, $\theta = 57.19^{o}$, $v_T = 1$ p.u., no. De generaciones: 500, tipo de selección: Rueda-ruleta, Pc = 0.987, pm = 0.123, $\Delta$de = 0.0001, $\Delta$e = 0.0008 | *277* |

| *Figura* | *Descripción* | *Página* |
|---|---|---|
| 5.198 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con TS/AG, TS y AG, con los siguientes datos: tipo de línea de transmisión: larga, no. de ciclos de duración de la falla: *3 ciclos,* criterio de aspiración: *Alta influencia*, $\theta = 57.19^{o}$, $v_T = 1$ p.u., no. De generaciones: 500, tipo de selección: Rueda-ruleta, Pc = 0.987, pm = 0.123, $\Delta de = 0.0001$, $\Delta e = 0.0008$ | *278* |
| 5.199 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con TS/AG, TS y AG, con los siguientes datos: tipo de línea de transmisión: larga, no. de ciclos de duración de la falla: *25 ciclos,* criterio de aspiración: *Baja influencia*, $\theta = 0^{o}$, $v_T = 1$ p.u., no. De generaciones: 500, tipo de selección: Rueda-ruleta, Pc = 0.987, pm = 0.123, $\Delta de = 0.0001$, $\Delta e = 0.00001$ | *279* |
| 5.200 | Tabla de reglas lingüísticas y funciones de membresía resultantes correspondiente a la figura 5.218 después de aplicar AG/TS para un punto donde $\theta =$ **0º**, $v_T =$ **1 p.u.** y una simulación de falla de 25 ciclos de duración en t = 1 segundo por el criterio de baja influencia y con 500 generaciones | *280* |
| 5.201 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con TS/AG, TS y AG, con los siguientes datos: tipo de línea de transmisión: larga, no. de ciclos de duración de la falla: *3 ciclos,* criterio de aspiración: *Baja influencia*, $\theta = 57.19^{o}$, $v_T =$ 1 p.u., no. De generaciones: 500, tipo de selección: Rueda-ruleta, Pc = 0.987, pm = 0.123, $\Delta de = 0.0001$, $\Delta e = 0.00001$ | *281* |
| 5.202 | Tabla de reglas lingüísticas y funciones de membresía resultantes correspondiente a la figura 5.210 después de aplicar AG/TS para un punto donde $\theta =$ **57.19º**, $v_T =$ **1 p.u.** y una simulación de falla de 3 ciclos de duración en t = 1 segundo por el criterio de baja influencia y con 500 generaciones | *282* |
| 5.203 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con TS/AG, TS y AG, con los siguientes datos: tipo de línea de transmisión: larga, no. de ciclos de duración de la falla: *4 ciclos,* criterio de aspiración: *Baja influencia*, $\theta = 57.19^{o}$, $v_T =$ 1 p.u., no. De generaciones: 500, tipo de selección: Rueda-ruleta, Pc = 0.987, pm = 0.123, $\Delta de = 0.0001$, $\Delta e = 0.00001$ | *283* |
| 5.204 | Tabla de reglas lingüísticas y funciones de membresía resultantes correspondiente a la figura 5.212 después de aplicar AG/TS para un punto donde $\theta =$ **57.19º**, $v_T =$ **1 p.u.** y una simulación de falla de 4 ciclos de duración en t = 1 segundo por el criterio de baja influencia y con 500 generaciones | *284* |
| 5.205 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con TS/AG, TS y AG, con los siguientes datos: tipo de línea de transmisión: larga, no. de ciclos de duración de la falla: *3 ciclos,* criterio de aspiración: *Alta influencia*, $\theta = 57.19^{o}$, $v_T =$ 1 p.u., no. De generaciones: 500, tipo de selección: Rueda-ruleta, Pc = 0.987, pm = 0.123, $\Delta de = 0.0001$, $\Delta e = 0.00001$ | *285* |

| *Figura* | *Descripción* | *Página* |
|---|---|---|
| 5.206 | Tabla de reglas lingüísticas y funciones de membresía resultantes correspondiente a la figura 5.214 después de aplicar AG/TS para un punto donde $\theta = 57.19^{o}$, $v_T = 1$ p.u. y una simulación de falla de 3 ciclos de duración en t = 1 segundo por el criterio de alta influencia y con 500 generaciones | *286* |
| 5.207 | Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con TS/AG, TS y AG, con los siguientes datos: tipo de línea de transmisión: larga, no. de ciclos de duración de la falla: 25 *ciclos,* criterio de aspiración: *Alta influencia*, $\theta = 0^{o}$, $v_T = 1$ p.u., no. De generaciones: 500, tipo de selección: Rueda-ruleta, Pc = 0.987, pm = 0.123, $\Delta$de = 0.0001, $\Delta$e = 0.00001 | *287* |
| 5.208 | Tabla de reglas lingüísticas y funciones de membresía resultantes correspondiente a la figura 5.216 después de aplicar AG/TS para un punto donde $\theta = 0^{o}$, $v_T = 1$ p.u. y una simulación de falla de 25 ciclos de duración en t = 1 segundo por el criterio de alta influencia y con 500 generaciones | *288* |
| 5.209 | Optimización por AG y TS | *289* |
| 5.210 | Oscilaciones producidas en el voltaje terminal por un ajuste agresivo de las acciones lingüísticas en la tabla de reglas por TS. | *290* |
| 5.211 | Universo de discusión para el error y para la derivada del error para 9 funciones de membresía | *292* |
| 5.212 | Comportamiento del voltaje terminal empleando AG y TS | *292* |
| 5.213 | Comportamiento del ángulo de carga, potencia activa, potencia reactiva y voltaje de campo durante la sintonización de las funciones de membresía y la tabla de reglas lingüísticas aplicando AG y TS | *293* |
| 5.214 | Índice de funcionamiento y diagrama de fase tiempo durante la aplicación de los AG y TS | *294* |
| 5.215 | Funciones de membresía sintonizadas, después de aplicar AG y TS | *294* |
| 5.216 | Tabla de reglas lingüísticas resultantes después de aplicar los algoritmos genéticos y la búsqueda por tabú | *295* |
| 5.217 | Comportamiento del voltaje en terminales empleando el controlador difuso optimizado. | *296* |
| 5.218 | Comportamiento del voltaje de campo | *295* |
| A.1 | Funciones de membresía para una base de 81 reglas lingüísticas. | *307* |
| A.2 | Funciones de membresía para una base de 49 reglas lingüísticas. | *308* |
| A.3 | Funciones de membresía para una base de 25 reglas lingüísticas. | *308* |
| C.1 | Representación de sistema maquina bus-infinito | *311* |
| C.2 | Representación del diagrama de bloques de la ecuación de oscilación. | *312* |
| C.3 | Servomotor hidráulico | *313* |
| C.4 | Diagrama a bloques del regulador ST1 | *314* |
| C.5 | Diagrama fasorial caso subtransitorio de la máquina-bus- infinito | *315* |
| D.1 | Ejemplo de una función unimodal | *315* |
| D.2 | Funciones de membresía para el error y la derivada del error para una base de 25 reglas lingüísticas. | *316* |
| D.1 | Ejemplo de una función unimodal | *317* |

| *figura* | *Descripción* | *página* |
|---|---|---|
| D.1 | Ejemplo de una función unimodal | *317* |
| D.2 | Funciones de membresía para el error y la derivada del error para una base de 25 reglas lingüísticas. | *318* |


## Índice de tablas.


| **Tabla** | **Descripción** | *Página* |
|---|---|---|
| 4.4.1 | *Población inicial* | *56* |
| 4.4.2 | *Selección* | *57* |
| 4.4.3 | *Selección.* | *58* |
| 4.4.4 | *Selección.* | *58* |
| 4.4.5 | *Cruzamiento* | *59* |
| A.1 | *Base de 25 reglas lingüísticas para un controlador difuso estático.* | *305* |
| A.2 | *Base de 25 reglas lingüísticas para un controlador difuso estático.* | *305* |
| A.3 | *Base de 25 reglas lingüísticas para un controlador difuso estático.* | *306* |
| C.1 | *Parámetros del modelo de la máquina bus-infinito* | *314* |
| D.1 | *Base de 49 reglas lingüísticas para un controlador difuso estático* | *318* |

# GLOSARIO DE TÉRMINOS.

| *Símbolo* | *Descripción* |
|---|---|
| $\alpha$ | Constante de proporcionalidad sobre el error. |
| $a(x_{nm}, x_{nc})$ | Elementos de la memoria atributiva. |
| *AG* | Algoritmos genéticos. |
| *AG* | Acción aumento grande. |
| *AM* | Acción aumento mediana. |
| *BG* | Acción bajo grande. |
| $\beta$ | Constante de proporcionalidad sobre la derivada del error. |
| *BM* | Acción bajo mediano. |
| *CE* | Acción aumento cero. |
| $\Delta e$ | Derivada del error. |
| *e''d* | Voltaje subtransitorio en el eje directo. |
| *e'q* | Voltaje transitorio en el eje de cuadratura. |
| *e''q* | Voltaje subtransitorio en el eje de cuadratura. |
| *Error* | Error producido entre la señal de referencia y el voltaje terminal. |
| $F_{HP}$ | Fracción de la potencia total generada de la turbina para la sección de alta presión. |
| *f(x' )* | Función objetivo de la solución de prueba x'. |
| *f(x)* | Función objetivo construida por el control difuso (función aptitud, AG). |
| *g* | Generación aleatoria inicial |
| $g_{max}$ | Generación máxima. |
| *h* | Paso de búsqueda |
| *id* | Corriente en el eje directo. |
| *iq* | Corriente en el eje de cuadratura. |
| *iteración* | Tiempo de muestreo |
| *Ka* | Ganancia del regulador. |
| *Kd* | Constante de amortiguamiento en el eje d (factor de amortiguamiento de torsión). |
| *Kf* | Ganancia del circuito estabilizador del regulador. |
| *M* | Constante de inercia. |
| *N(x)* | Vecindario del punto x. |
| *N*(x)* | Vecindario reducido del punto x. |
| *pc* | Probabilidad de cruzamiento |
| $P_{GV}$ | Potencia en compuerta o a la salida de la válvula del gobernador. |
| $P_{HP}$ | Potencia de alta presión |
| *pm* | Probabilidad de mutación. |
| *ra* | Resistencia de armadura. |
| *re* | Resistencia externa (línea de transmisión). |
| *s* | Deslizamiento del rotor. |
| *T* | Lista Tabú. |
| $T_A$ | Constante de tiempo del amplificador del regulador. |
| $T_{CH}$ | Constante de tiempo de volúmenes de la entrada principal y y vasija de vapor. |
| *T'd0* | Constante de tiempo transitorio a circuito abierto en el eje d. |
| *T''d0* | Constante de tiempo subtransitorio a circuito abierto en el eje d. |
| *T''q0* | Constante de tiempo subtransitorio a circuito abierto en el eje q. |
| *Te* | Par eléctrico. |

| *Símbolo* | *Descripción* |
|---|---|
| $T_f$ | Constante de tiempo del circuito estabilizador del regulador. |
| $T_m$ | Par mecánico. |
| $T_{RH}$ | Constante de tiempo de recalentamiento. |
| $TS$ | Búsqueda tabú. |
| $T_{SM}$ | Constante de tiempo del servomotor de posición de la válvula |
| $Tx$ | Constante de tiempo de la excitatriz. |
| $u$ | Entrada del control de la excitatriz. |
| $Ug$ | Entrada al gobernador del gobernador |
| $Vd$ | Voltaje en el eje d. |
| $V_{Eexc}$ | Voltaje del circuito estabilizador del regulador. |
| $V_f$ | Voltaje de campo. |
| $Vq$ | Voltraje en el eje q. |
| $V_{ref}$ | Voltaje de referencia. |
| $V_t$ | Voltaje terminal. |
| $x'$ | Solución de prueba. |
| $x$ | Solución actual. |
| $X$ | Espacio de búsqueda. |
| $X'd$ | Reactancia síncrona en el eje d. |
| $X''d$ | Reactancia subtransitoria en el eje d. |
| $Xq$ | Reactancia síncrona en el eje q. |
| $\delta_r$ | Ángulo de carga |
| $\omega_o$ | Velocidad síncrona. |

# Agradecimientos.

En primer lugar quiero agradecer al *Dr. David Romero* quien con su apoyo y consejos valiosos se pudo finalizar este trabajo. Quiero agradecer también su apoyo a los Profesores *Daniel Olguín, Raúl Cortes* y al maestro *Arturo Galán* quienes formaron parte importante de mi formación y siento profundo respeto. Antes que todo quiero agradecer a quienes han estado conmigo en todo momento mi familia *Alonzo, Teresa, Joel, Antonio, Guadalupe, Zyanya* y principalmente a mis abuelas *Juana* e *Ines* quienes han sido un pilar de ejemplo durante mi niñez.

Este trabajo fue realizado con la ayuda económica del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y al Instituto Politécnico Nacional (IPN).

Atte.

Adrián Rubio Solís.

# CAPÍTULO I

# INTRODUCCIÓN

## *1.1 OBJETIVO DE LA TESIS.*

El objetivo de la tesis es implementar un control difuso autosintonizable sobre la regulación de voltaje en terminales en un generador síncrono utilizando las técnicas de optimización de búsqueda por tabú y algoritmos genéticos de manera individual y combinada analizando su respuesta obtenida y realizando una comparación entre los resultados obtenidos por ambas técnicas y los resultados obtenidos por un regulador convencional.

Se pretende encontrar la solución óptima que permita la mejor regulación de voltaje sintonizando las funciones de membresía y la tabla de reglas lingüísticas por medio del análisis de la función objetivo aplicando tales técnicas en diferentes puntos de operación del generador síncrono.

## *1.2 JUSTIFICACIÓN*

La gran utilidad del generador síncrono como fuente de energía demanda reguladores de voltaje eficientes y la lógica difusa forma una opción viable para la regulación de voltaje en terminales basada en los excelentes resultados sobre su implementación en diversas áreas [1] [7], el implementar el control difuso con una tabla de reglas lingüísticas estática proporciona resultados eficientes en base al comportamiento del generador en diversos puntos de operación, el implementar la búsqueda por tabú optimiza dichos resultados. La tabla de reglas lingüísticas y los intervalos de las funciones de membresía sobre el universo del discurso son dos de los elementos disponibles de la lógica difusa para ser optimizados.

La tabla de reglas lingüísticas es un elemento del control difuso que puede ser altamente optimizado por la búsqueda por tabú pero demasiado pequeño como espacio de búsqueda para los algoritmos genéticos, por tal razón serán aplicados sobre las funciones de membresía al igual que la búsqueda por tabú. Ambas técnicas permiten analizar los problemas y optimizarlos mucho más rápido que cualquier ser humano, ahorran tiempo, son confiables y accesibles de programar sobre diversos lenguajes de programación, no requieren procedimientos matemáticos difíciles y resultan más eficientes que métodos de optimización convencionales [1] [8].

## *1.3 ESTADO DEL ARTE.*

Desde 1965 cuando se publicó el primer articulo acerca de la lógica difusa por L. A. Zadeh y en 1970 cuando Ebrahim Mamdani [2][4] uso la lógica difusa para controlar una máquina de vapor por primera vez; el control difuso ha comenzado a tener una gran variedad de aplicaciones desde la robótica hasta la aviación espacial, los japoneses han destacado la lógica difusa principalmente en el área de la robótica, eléctrica y electrónica.

El control difuso es una alternativa para una gran variedad de retos en la aplicación de control ya que provee un método para construir controladores no lineales utilizando información heurística la cuál es provista por un operador de procesos que establece condiciones de control expertas y es escrita como información que puede interpretar la lógica difusa[7], tal información heurística también puede ser provista por un ingeniero de control que tiene basta experiencia en el modelado de un proceso en particular y que conoce las características de desempeño de tal proceso. Existen tres tipos de fuentes las cuales proveen información relevante acerca de cualquier sistema: a) un modelo matemático b) datos de entrada/salida sensados y c) conocimiento experto humano [7][1], la última fuente es la más comúnmente usada por control difuso y traducida en una tabla de reglas conocida como del experto, el establecer las reglas adecuadas dentro de dicha tabla y establecer los intervalos adecuados de trabajo sobre el universo del discurso nos permiten aplicar un controlador en optimas condiciones. Existen técnicas que permiten optimizar los parámetros establecidos por un experto sobre la tabla de reglas y las funciones de membresía, tales técnicas son tratadas como el desarrollo de operadores de búsqueda [17] que permiten guiar la solución por senderos óptimos. Los algoritmos genéticos fueron desarrollados por Holland, sus colegas y estudiantes en el año de 1962 sobre sistemas adaptables[7], explícitamente Holland fue el primero en proponer los operadores de cruzamiento y otros operadores de recombinación tratando de imitar el principio de evolución natural, los algoritmos genéticos plantean una estructura similar utilizada por cientos de años por los seres vivos, los primeros estudios acerca de algoritmos genéticos aparecieron a finales de los años 50 y principios de los 60 programados por biólogos evolutivos que buscaban explícitamente realizar modelos de aspectos de la evolución natural. Los algoritmos genéticos son una técnica de optimización fácil de programar pero con gran potencia en resolución de problemas de optimización complicados.

El control difuso es susceptible para los algoritmos genéticos en la optimización de las funciones de membresía sobre el universo del discurso el cuál es un conjunto de elementos que toman un valor de membresía según su posición, estos valores pueden ser alterados por medio de la modificación de los intervalos en el dominio de la variable de entrada (error, derivada del error, derivada del cambio del error, etc); los algoritmos han sido planteados de tal manera que pueden conservar las características de elementos que reflejan un buen comportamiento [17][8] y que mantienen una condición de sobre vivencia utilizando solo tres operadores básicos (reproducción y selección, cruzamiento y mutación) al igual que los seres vivos si los algoritmos genéticos no son planteados en un dominio justo puede sufrir alteraciones que perjudiquen a las poblaciones futuras, esto se refleja en las funciones de membresía en una forma semejante permitiendo sobrevivir a aquellas que mantienen un comportamiento resaltable sobre las demás (individuos). Por otro lado la búsqueda por tabú fue desarrollada por Fred Glover [3] como resultado del constante estudio de heurísticas [14] y operadores de búsqueda de una serie de investigadores a finales de los 80 y que forman parte de técnicas de solución de

problemas de optimización, la búsqueda por tabú permite ser implementada tanto en economía como en química como en electricidad.

La búsqueda por tabú es basada sobre la unión de los campos de la inteligencia artificial y optimización y es definida como una meta-heurística cuyo concepto aparece con la incorporación de esta técnica.

La búsqueda por tabú empleada sobre control difuso ha permitido la selección adecuada sobre la tabla de reglas y las funciones de membresía rompiendo el esquema estático de tales factores, TS [27][3][13] recuerda que elemento proporcionó resultados favorables durante la búsqueda y prohíbe a aquellos elementos que no lo hicieron ser visitados, TS es joven y tiene una enorme aplicación sobre diversos campos de la ciencia principalmente porque no restringe como los métodos convencionales [7] el dominio de trabajo utilizando una memoria adaptable y exploración sensible. El control difuso con ayuda de técnicas de optimización proporcionará en años venideros resultados increíbles sobre todo por tratarse de un control multivariable.

## *1.4 CONTENIDO DE LA TESIS.*

La tesis consta de 6 capítulos y un apéndice

El capítulo uno "*Introducción*" muestra una visión general de la tesis y la razón por la cuál es posible utilizar técnicas inteligentes en la regulación de voltaje.

El capitulo dos "*Búsqueda por tabú*" menciona la teoría correspondiente a la búsqueda por tabú (TS), su alcance sus elementos constitutivos, los diagramas de flujo seguidos durante una búsqueda normal tabú y la terminología expresada durante el termino a corto plazo y a largo plazo y la relación con la función objetivo.

El capitulo tres "*Algoritmos genéticos*" se describe un algoritmo genético simple dentro del dominio de sus tres clásicos operadores sin considerar el espacio de esquemas, sus ventajas y desventajas como una técnica evolutiva y considera los conceptos comúnmente utilizados durante una optimización por algoritmos genéticos (AG).

El capitulo cuatro muestra la metodología planteada en base a la búsqueda por tabú y algoritmos genéticos para la optimización de la tabla de reglas y funciones de membresía en forma conjunta e individual describiendo las estructuras de búsqueda, los términos de tiempo utilizados para las estructuras de corto y largo plazo, la implementación de AG sobre el dominio del error y la derivada del error y la interpretación de sus elementos constitutivos considerada en cada caso.

El capitulo 5 "*Resultados*" se muestran los resultados obtenidos después de la implementación de ambas técnicas realizando diversas comparaciones tomando en cuenta los criterios de influencia utilizados y comparando en forma conjunta e individual la aplicación de TS y AG contra la aplicación de un regulador convencional tipo ST1.

Capitulo 6 "*Conclusiones*" se realiza un análisis comparativo entre los resultados obtenidos por cada una de las técnicas de optimización así como sus ventajas y desventajas.

"Apéndices" esta parte contiene temas referentes a la función objetivo, teoría de conjuntos difusos, los modelos pertenecientes al control difuso y la maquina síncrona , los programas digitales construidos y los índices de funcionamiento.

### *1.5 APORTACIONES.*

Se proporciona:

El resultado del comportamiento del voltaje en terminales al aplicar dos técnicas diferentes y la metodología construida para la implementación de AG y de TS sobre el control difuso.

Las limitaciones de AG con respecto a TS en la implementación del dominio de búsqueda.

El tipo de búsqueda que puede ser implementada sobre dos elementos importantes del control difuso como son la tabla de reglas lingüísticas y las funciones de membresía y se presenta un análisis utilizando funciones de membresía (en el caso de 7 y 9 funciones) compactando las funciones centrales de membresía para ofrecer una mayor sensibilidad mayor alrededor del cero.

# CAPÍTULO II

# BÚSQUEDA POR TABÚ

## *2.1 INTRODUCCIÓN.*

La búsqueda por tabú es una meta-heurística [3] que guía procedimientos de búsqueda heurísticos locales a explorar espacios de solución más allá del óptimo local, la búsqueda por tabú es una técnica de optimización que emplea una memoria adaptable y combinada, esto es la búsqueda por tabú utiliza una estructura de memoria basada en cuatro elementos, que son operadores relevantes en su funcionamiento:

1. ***Reciente(Corto plazo)***
2. ***Calidad***
3. ***Influencia***
4. ***Frecuencia***

Estos operadores traducidos en estructuras de memoria son:

La ***memoria basada en lo reciente y la memoria basada en la frecuencia*** [2] [3] son memorias que se complementan una a la otra. La memoria basada en la frecuencia complementa la información provista por la memoria basada en lo reciente (memoria a corto plazo) ampliando el funcionamiento para seleccionar los movimientos elegidos o preferidos. Con respecto a la ***calidad*** se refiere a la habilidad de diferenciar el merito de soluciones visitadas durante la búsqueda.

La memoria en este trabajo es usada para elementos que son considerados buenas soluciones o rutas que guían a tales soluciones. La calidad de la solución llegará a ser un fundamento para incentivar o multar acciones que nos lleven a soluciones pobres o buenas. El cuarto elemento ***Influencia*** considera el impacto de las elecciones hechas durante la búsqueda. Como habíamos mencionado la búsqueda por tabú emplea una memoria adaptable que nos permite encontrar soluciones consideradas buenas o rutas que nos permitan encontrarlas, esta segunda mención es importante en el desarrollo de este reporte debido a la relevancia que impone sobre la función aptitud u objetivo. Esta memoria esta compuesta de:

1. Memoria a corto plazo.
2. Memoria a largo plazo.

TS como técnica es empleada en el análisis de la función objetivo[6] [8] [16] descrita en un intervalo cerrado X = [a, b] y f(x) (función objetivo, puede ser lineal o no lineal),

donde N(x) es la vecindad alrededor de x Є X (llamado espacio de búsqueda) y donde cualquier elemento dentro de X es una posible solución que será analizada por T. S. , resulta en un análisis combinatorio (f(x),X), la búsqueda por tabú irá de una vecindad a otra utilizando los elementos descritos como operadores de TS hasta satisfacer un criterio. En este trabajo se utiliza la función objetivo basada en el error y la derivada del error de la forma siguiente:

$$Fobjetivo = \alpha \bullet error + \beta \bullet derivada\ error$$

La búsqueda por tabú comienza de la misma forma que una búsqueda local ordinaria o búsqueda de vecindario, procediendo iterativamente de un punto (solución dada) a otro hasta que un criterio de terminación fue satisfecho [3] [13] [27]. Cada $x \in X$ tiene un vecindario asociado $N(x) \subset X$ y cada solución $x' \in N(x)$ es alcanzado desde x por una operación llamada movimiento.

Como punto inicial de partida podemos comparar TS con un método descendente simple donde la meta es minimizar f(x), tal método solo permite movimientos a soluciones vecinas que mejoran la solución objetivo actual y finalizan cuando no mejoran las soluciones.

Un seudo código de un método descendente [3] es presentado en la figura 2.1. La x final obtenida es llamada óptimo local y en la mayoría de los casos este punto encontrado no resulta ser el óptimo global que usualmente no minimizara f(x) sobre toda $x \in X$.

Método descendente.

1) Elegir $x \in X$ para comenzar el proceso.
2) Encontrar $x' \in N(x)$ tal que $f(x') < f(x)$
3) Si no es tal que x' puede ser encontrada, x es el óptimo local y el método para.
4) De otra forma, x' es la nueva x y el método salta al paso2.

**Figura 2.1** Método Descendente.

La relevancia de elegir buenas soluciones desde los vecindarios actuales es amplificado cuando los mecanismos de guía de TS son introducidos de tal forma que vayan más allá de de un óptimo local como punto de terminación de un método descendente. Un método descendente es visto generalmente como aplicables en la transición de un vecindario a otro, opuesto a la construcción de vecindarios.

Cada tipo de memoria es acompañada de su propia estrategia, sin embargo, el efecto de ambas memorias pueden ser vistas como la modificación del vecindario N(x) de la solución actual x. El vecindario modificado N*(x) es el resultado de mantener una historia selectiva de los estados encontrados durante la búsqueda (memoria explicita).

En las estrategias TS basadas en las consideraciones de corto plazo, N*(x) característicamente es un subconjunto de N(x) [27] y la clasificación tabú sirve para identificar elementos de N(x) excluidos de N*(x). En las estrategias TS que incluyen consideraciones de largo plazo, N*(x) puede también ser expandida para incluir soluciones encontradas no ordinariamente en N(x) [27][13]. TS puede ser visto como un método de vecindario dinámico, esto significa que el vecindario de x es un conjunto no estático, pero es un conjunto que puede cambiar de acuerdo a la historia de la búsqueda. Un proceso TS basado estrictamente en estrategias de corto plazo puede permitir una solución x ser visitada mas de una vez, esto permitirá que el vecindario modificado y reducido N*(x) será diferente en cada iteración.

## *2.2 MEMORIA A CORTO PLAZO.*

Esta memoria desempeña un rol importante en TS y su función es homóloga a la memoria a corto plazo de un ser humano; esta memoria registra los eventos recientes y sus principales características principalmente con la calidad de esos recuerdos. Una importante distinción en TS surge por la diferenciación entre memoria a corto plazo y largo plazo.

Los plazos utilizados tanto para la memoria a corto plazo y para largo plazo son interpretados con intervalos conocidos sobre un ser humano típico, donde memoria a corto plazo es todos aquellos eventos que pueden recordarse los últimos seis días y la memoria a largo plazo son aquellos eventos más importantes que se pueden recordar partir de los últimos 6 días hasta 6 meses.

Los elementos que componen la estructura de ambas memorias son los mencionados en la lista 2.1.1:

Lista 2.1.1:

- Memoria explícita.
- Memoria atributiva.
- Criterio de aspiración.
- Solución élite.
- Lista de candidatos.
- Criterio de aspiración.

### *2.2.1 MEMORIA EXPLÍCITA.*

Como un punto de partida para examinar los términos de la memoria a corto plazo considerar una forma de memoria que envuelve una lista tabú T que explícitamente contiene t diferentes soluciones, que es, $T = \{x_1, x_2, \ldots, x_t\}$, donde $N^*(x) = N(x) \backslash T$, i.e. N*(x) considera las soluciones de N(x) no incluidas en la lista tabú T. Esta lista tabú denominada memoria explícita desempeña el papel de la historia de la memoria a corto plazo, permite evitar ciclos y visitar soluciones recientes apoyando la estrategia de diversificación que será ampliada más adelante.

Para entender un poco más de esta lista T se supone un pequeño árbol que contiene 7 orillas las cuales proporcionan una secuencia de trabajo de una maquina de manufactura las cuales fueron visitadas durante la búsqueda por tabú, si la solución actual x = {1, 2, 3, 4} y la lista tabú consiste de (ver figura 2.2)

$$T = \{(1, 2, 3, 4), (3, 1, 2, 4), (3, 2, 1, 4)\},$$

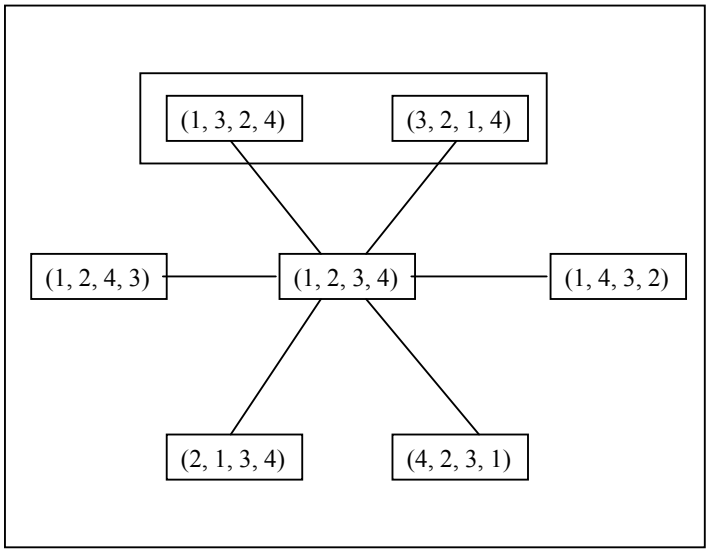



**Figura 2.2.** Vecindario reducido N*(x).

La lista T (memoria explícita nos permite visitar solo aquellos elementos que no han sido visitados recientemente convirtiéndose en la historia de la memoria a corto plazo.

### *2.2.2 MEMORIA ATRIBUTIVA.*

La memoria atributiva es un elemento perteneciente a la estructura de corto plazo y esta compuesta por todos aquellos atributos pertenecientes a las soluciones visitadas por TS [3], dicho atributo puede modificarse debido al cambio realizado sobre la base tabú T en base a las multas e incentivos trabajados por la estructura de largo plazo y los atributos se refieren a penalizaciones impuestas por TS en corto plazo reforzando la calidad de elección de un elemento de la lista de candidatos, la memoria atributiva Y = $\{a(x_{1o},x_{1f}), a(x_{2o},x_{2f}), a(x_{3o},x_{3f}) , . . . a(x_{no},x_{nf})\}$esta asociada principalmente con la memoria el vecindario reducido N*(x), la estructura de la memoria atributiva depende en gran medida del planteamiento del problema y de la lista de candidatos un movimiento puede generar simplemente varios atributos sobre el elemento x y x' que permite identificar el trabajo realizado por TS en una región de un subconjuto de soluciones.

### *2.2.3 CRITERIO DE ASPIRACIÓN.*

Todos aquellos elementos de prueba que sean elegidos para pertenecer a la siguiente lista de candidatos deberán atravesar un umbral o dicho en otras palabras cumplir con las características requeridas establecidas por un criterio de calificación o de influencia.

Existen diversos criterios de aspiración elegidos bajo la consideración del diseñador. Comenzando por el bloque examinar la lista de candidatos, en esta operación TS realiza los suficientes movimientos de acuerdo a la lista de candidatos establecida (no espacio de búsqueda). En este bloque partimos de x como la solución actual para generar soluciones de prueba x' resultado de probar elementos pertenecientes al vecindario N(x), un movimiento es la acción de sustituir un elemento perteneciente a la solución actual por un elemento de la lista de candidatos que proporciona mejores o peores características que el elemento eliminado.

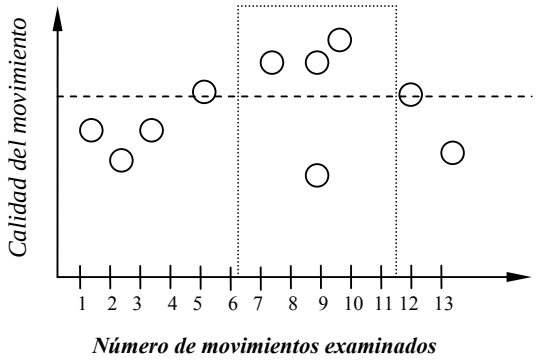



**Figura 2.3**. Número de movimientos examinados durante una búsqueda tabú clásica.

### *2.2.4 SOLUCIÓN ÉLITE.*

El método de la solución élite es primero construir una lista maestra examinando todos los movimientos posibles [3] [13], seleccionando los mejores k movimientos encontrados, donde k es un parámetro del proceso. Entonces en cada iteración subsiguiente, el mejor movimiento de la lista maestra es elegido para ser ejecutado hasta que dicho elemento cae por debajo del umbral de calidad o hasta que un dado número de de iteraciones es alcanzado y entonces una nueva lista maestra es construida y el proceso se repite. Esta técnica es motivada por la suposición que un buen movimiento, no ejecutado en la presente iteración, llegara a ser un buen movimiento para un cierto número de iteraciones. En la figura 2.4 se presenta la estrategia de la lista de candidatos elite:

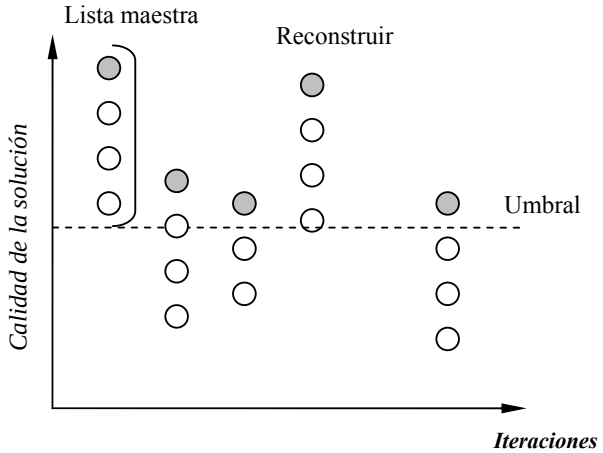



**Figura 2.4**. Construcción de la solución élite.

### *2.2.5 LISTA DE CANDIDATOS.*

Son todos aquellos elementos que conforman una lista disponible para TS y que no se encuentran en T, son generadas como análisis por x dentro del vecindario reducido N*(x) [27] dicha lista puede o no ser estática. Los elementos tomados aquí sirven para construir la lista maestra en cada iteración que permite tomar los elementos que formarán parte de la solución elite.

### *2.2.6 CRITERIO DE ASPIRACIÓN.*

Es el umbral de calidad que debe cruzar un elemento a través de la acción de movimiento si quiere formar parte de la solución elite en base a estrategias descritas por TS [3] [27]. Los criterios registrados en este trabajo son los criterios de alta y baja influencia, los criterios de aspiración son diversos. El criterio de aspiración es establecido como una línea de aspiración que puede ser ajustado dinámicamente durante la búsqueda.

El criterio de aspiración puede considerarse como una estrategia por parte de TS que es establecido como un umbral de calidad para los movimientos, basados sobre la historia del patrón de búsqueda. Esta estrategia consiste en revisar todos aquellos movimientos contenidos en la lista maestra que pueden ser capaces de atravesar el umbral [3].

Este umbral no mantiene una posición permanente y general para todos los elementos de prueba [3] [10], la memoria a largo plazo es el elemento principal que determina la posición individual del umbral de calidad para cada elemento.

El umbral denominado meta de calidad es atravesado más pronto por un elemento x' que haya sido considerado más adecuado en base a su residencia en la solución elite.

El umbral si no es aplicado adecuadamente puede producir trayectorias totalmente diferentes de búsqueda limitando por completo a TS [3] [28], a continuación se muestra en la figura 2.5 la calidad que puede seguir cada solución:

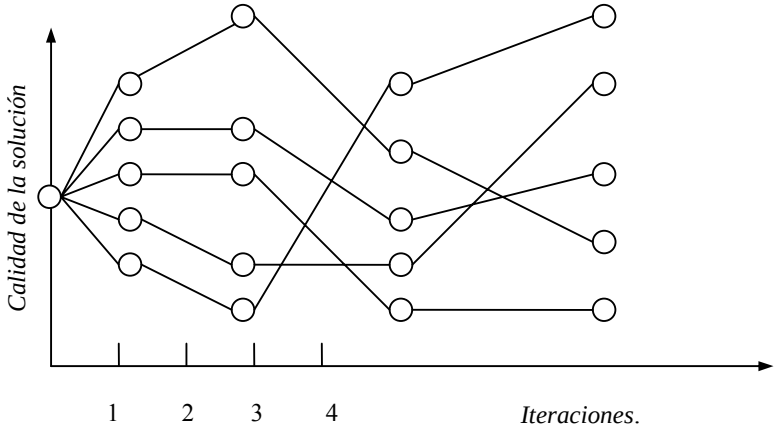



**Figura 2.5.** Secuencia de la lista de candidatos.

Los elementos que constituyen la memoria a corto plazo interactúan de una forma predefinida como se muestra en la figura 2.6.

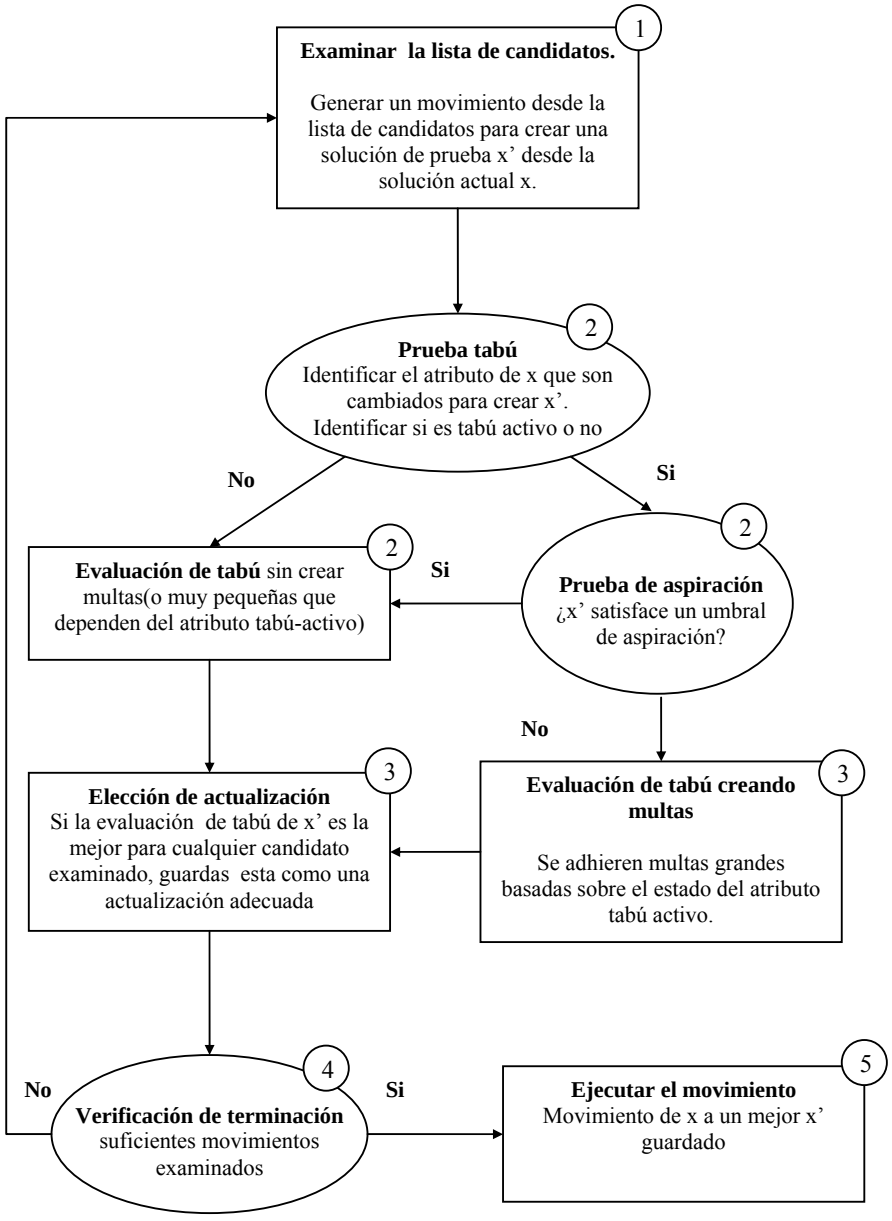



**Figura 2.6** Estructura lógica de las operaciones de la memoria a corto plazo

Las operaciones descritas en la figura 2.6 van estrechamente relacionadas con los elementos constitutivos de la memoria a corto plazo, comenzaremos por describir paso a paso los elementos de la lista 2.1.1.

## *2.3 MEMORIA A LARGO PLAZO.*

En algunas aplicaciones, la memoria a corto plazo es suficiente para producir soluciones de alta calidad. Sin embargo, en general TS llega a ser significativamente más fuerte por la inclusión de la memoria a largo plazo y sus estrategias asociadas. En las estrategias de largo plazo el vecindario modificado producido por TS puede contener soluciones diferentes a la original i.e. a la selección de soluciones elite (óptimos local de alta calidad [3] [8] [6]) encontradas en varios puntos en el proceso de solución. Tales soluciones elite típicamente son identificadas como elementos de un grupo regional dentro de las estrategias de intensificación y como elementos de diferentes grupos en estrategias de diversificación. La memoria a largo plazo se compone de los siguientes elementos:

1. Estrategias de diversificación
2. Estrategias de intensificación
3. Memoria basada en la frecuencia, Multas e incentivos.

### *2.3.1 INTENSIFICACIÓN Y DIVERSIFICACIÓN.*

Dos componentes altamente importantes de la búsqueda por tabú son las estrategias de intensificación y diversificación. Las ***estrategias de intensificación*** son basadas en la modificación de las reglas de elección (ver multas e incentivos) para fortalecer la combinación de movimientos y las características de las soluciones encontradas históricamente como buenas [3] [27] [7] [8]. Las estrategias de intensificación permiten iniciar un retorno a regiones de búsqueda no visitadas que permiten realizar una búsqueda más profunda [3] [7] [8]. Entonces las soluciones elite deben ser registradas en orden para examinar sus vecindarios inmediatos, la memoria explicita esta estrictamente relacionada en la implementación de las estrategias de intensificación, la diferencia principal entre la intensificación y la diversificación es que durante un escenario de intensificación la búsqueda se enfoca sobre el análisis de vecinos de soluciones elite.

Las ***estrategias de intensificación*** requieren de un medio para identificar un conjunto de soluciones elite como las bases para la incorporación de buenos atributos dentro de las recién creadas soluciones. El número de miembros en un conjunto elite es generalmente determinado por el marco de umbral (criterio de aspiración) que esta conectado al valor de la función objetivo de la mejor solución encontrada durante la búsqueda.

Este tipo de estrategia de intensificación es relacionada con un tipo de estrategia que resume la búsqueda desde soluciones no visitadas de soluciones previamente visitadas y mantener una pista de la calidad de esas soluciones vecinas para seleccionar un conjunto elite por lo tanto restringe la búsqueda a tipos específicos de soluciones, tales como vecinos del óptimo local o vecinos de soluciones visitadas en pasos anteriores antes de alcanzar el óptimo local [3] [19] [14] [10]. Otro tipo de estrategia de intensificación es la ***intensificación por descomposición*** que permite establecer ciertas restricciones sobre partes del problema o estructura de la solución en cierto orden para generar una descomposición que permite enfocar la búsqueda de una manera más concentrada sobre otras partes de la estructura o del problema.

Los métodos de búsqueda basados en la optimización local generalmente dependen de las ***estrategias de diversificación*** para incrementar su efectividad en la exploración del espacio de solución definido por un problema de optimización combinatoria. Algunas de esas estrategias son diseñadas con el propósito principal de prevenir procesos de búsqueda cíclicos estos ejecuciones de búsqueda interminables sobre ciertas zonas del espacio de búsqueda ejecutando siempre los mismos movimientos (i.e. revisar siempre el mismo conjunto de soluciones), en el caso empleado en esta tesis es revisar siempre las mismas zonas en la tabla de reglas ó para el caso de las funciones de membresía revisar siempre intervalos cerrados como posible ejemplo, en el caso de GA la diversificación esta presente gracias al proceso de mutación empleado por tal técnica.

Otra forma de representar la diversificación en los algoritmos genéticos (GA) es el uso de la aleatorización por medio de un random [7] [8] en los elementos procesados o individuos durante el cruzamiento estas descripciones proveen un efecto adecuado de diversificación. En TS la diversificación es creada para algunas funciones de la memoria a corto plazo, pero es particularmente reforzada por ciertas formas de la memoria basada en el largo plazo. Las estrategias de diversificación, como su nombre lo indica, son diseñadas para conducir la búsqueda dentro de nuevas regiones.

Generalmente dicha estrategias de diversificación son basadas en la modificación de las reglas de elección para traer atributos dentro de la solución que son frecuentemente usadas [8]. Alternativamente las estrategias de diversificación pueden introducir tales atributos por la aplicación de métodos periódicos que enlazan subconjuntos de esos atributos dentro de las soluciones candidatas durante la búsqueda.

El término ***vecino*** [3] tiene un significado más amplio en TS que en un contexto usual de alguna búsqueda por vecindarios, considerando que las soluciones pueden ser adyacentes o cercanas a las soluciones elite por el significado estándar de mecanismos.

El escenario de diversificación [3] [7] por otro lado fortalece el proceso de búsqueda para examinar regiones no visitadas y generar soluciones que difieren en varias formas del significado de aquellas visitadas antes. Un método que puede ser usado en la generación de subconjuntos de componentes de la solución son entonces desarrollados para producir soluciones completas o depender de evaluaciones modificadas.

La diversificación y la intensificación son dos estrategias de gran importancia en cualquier método de búsqueda, permiten evaluar zonas y trayectorias de soluciones jamás alcanzadas por las soluciones actuales, TS y GA cuentan con ambas estrategias aunque sean llamada de diferente forma para cada técnica un escenario de diversificación para GA es la mutación y el cruzamiento.

En la figura 2.7 se muestra un el diagrama a bloques de un método simple de intensificación utilizado por TS:

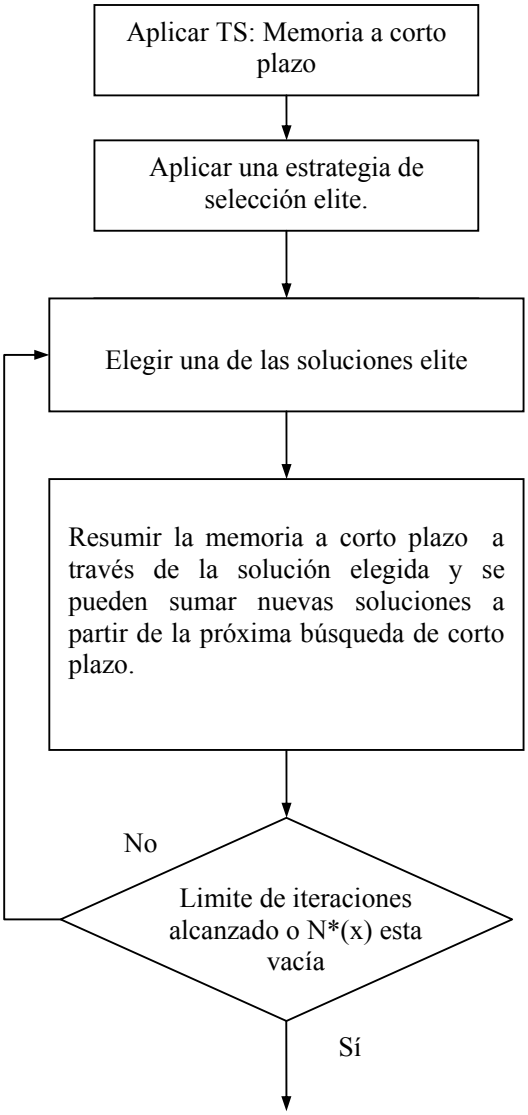



**Figura 2.7.** Diagrama de flujo de la estrategia de intensificación

### *2.3.2 MEMORIA BASADA EN LA FRECUENCIA, MULTAS E INCENTIVOS.*

La memoria basada en la frecuencia provee un tipo de información que complementa la información provista por la memoria basada en lo reciente (memoria a corto plazo) ampliando el criterio para seleccionar los movimientos elegidos o preferidos [3] [28] [8]. La frecuencia generalmente es pesada o descompuesta en subclases por la toma de información de las dimensiones de la calidad de la solución y el movimiento de influencia. También la frecuencia puede ser integrada con la memoria basada en lo reciente para construir una estructura compuesta para la creación de multas e incentivos que modifican la evaluación del movimiento.

Basado en lo reciente es generalmente usada en el contexto de memoria de término a corto plazo, eso también puede ser un criterio para formar la memoria a largo plazo.

Para nuestros propósitos concebimos frecuencias que consisten de relaciones o divisiones, cuyos numeradores representan conteos expresados en dos medidas diferentes:

1. Una medición de transición. Número de iteraciones donde un atributo cambia (entra o sale) sobre las soluciones visitadas sobre una trayectoria en particular.
2. Medida de residencia. Número de iteraciones donde un atributo pertenece a soluciones visitadas o a una trayectoria en particular.
3. El número de instancias donde un atributo pertenece a las soluciones de un subconjunto en particular.

El denominador representa una de tres cantidades:

1. El número total de ocurrencias de todos los eventos representados por los numeradores.
2. La suma (o promedio) de los numeradores.
3. El valor del máximo numerador.

En casos donde los numeradores representan conteos pesados, algunos de los cuales pueden ser negativos, denominador (3) es expresado como un valor absoluto y el denominador (2) es expresado como una suma de valores absolutos.

# CAPÍTULO III

# ALGORITMOS GENÉTICOS

## *3.1 INTRODUCCIÓN.*

En este capítulo se describe en una forma general los elementos requeridos para la aplicación de un algoritmo genético simple comenzando por los fundamentos clásicos de la teoría de la evolución de los seres vivos. La teoría de la evolución atribuye el proceso de la evolución natural de las poblaciones al principio de Darwin de la selección natural [7] "Sobre vivencia del más apto" y las leyes de la Genética de Mendel acerca de la transferencia de los factores hereditarios de los padres hacia los hijos (Michalewics 1996). Los algoritmos genéticos (AG) fueron desarrollados por Holland (1975) [7] [8] y son basados en los principios de la selección natural y modificación genética. GA son métodos de optimización, los cuales operan sobre una población de puntos diseñados como individuos.

Cada individuo representa una posible solución de la optimización del problema. Los individuos son evaluados dependiendo de su comportamiento (función objetivo, fitness o función aptitud) [10][17][28] que indica que tan bueno es determinado individuo de una población soluciona el problema de optimización. AG comienza con una inicialización de aleatoria de la población, seleccionando individuos al azar. La transición de una generación a otra toma lugar vía la aplicación de los operadores genéticos: ***selección, cruzamiento y mutación*** [7] [8].

A través del proceso de selección los individuos más aptos serán elegidos para formar parte de la siguiente generación. El cruzamiento intercambia el material genético de dos individuos creando dos nuevos individuos. La mutación cambia arbitrariamente el material genético de un individuo. La aplicación de los operadores genéticos sobre los individuos de una población continúa hasta que una solución suficientemente es encontrada para resolver el problema de optimización [17] [7] [8]. La solución es usualmente lograda cuando una condición de paro predefinido i.e. un cierto número de generaciones es alcanzado. AG tiene las siguientes características:

- AG opera con una población de posibles soluciones (individuos) en vez de un solo individuo. Así que la búsqueda es llevada o realizada en una forma paralela.

- AG son hábiles para encontrar soluciones óptimas o subóptimas en espacios de búsqueda grandes y complejos. Por otra parte AG son aplicables a problemas de optimización no lineales con restricciones que pueden ser definidas en espacios de búsqueda continua o discretos.

- Los AG examinan muchas posibles soluciones al mismo tiempo, así que existe una alta probabilidad de que la búsqueda converga en una solución óptima.

En el AG clásico Desarrollado por Holland (1975) [8] los individuos son representados en numeración binaria i.e. en cadenas de bits. Mientras tanto nuevas representaciones para los individuos y operadores genéticos han estado desarrollándose para problemas de optimización con variables dentro del dominio continúo.
La representación real ha mostrado ser la mas apta, con este tipo de representación los individuos son representados directamente como números reales.

## *3.2 ALGORITMO GENÉTICO SIMPLE.*

Los mecanismos de un algoritmo genético simple son sorpresivamente simples, envuelve nada más complejo que copia de cadenas e intercambio parcial de cadenas. Un algoritmo genético simple que produce buenos resultados en muchos problemas prácticos esta compuesto de 3 operadores:

I. Reproducción (selección).
II. Cruzamiento.
III. Mutación.

En la figura 3.1 la ejecución de los operadores durante una generación son representados esquemáticamente. La evolución de la población continúa a través de muchas generaciones, hasta que el problema es resuelto, el cuál en la mayoría de los casos finaliza en un número máximo de generaciones $g_{max}$.

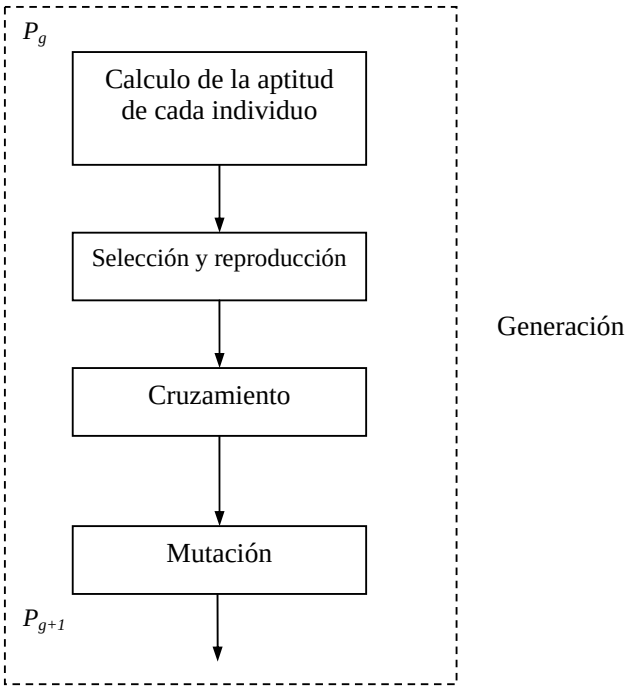



**Figura 3.1** Operadores genéticos ejecutados durante una generación para AG

Los operadores genéticos de acuerdo a la figura 3.1 son:

### *3.2.1 SELECCIÓN.*

El proceso de selección elige a los individuos más aptos de una población para continuar dentro de la siguiente generación. Algoritmos genéticos (AG) usa el principio de selección natural, "Sobre vivencia del mas apto" parea seleccionar individuos. Selección compara el comportamiento de un individuo en relación a otros individuos y decide cual individuo ira en la próxima población. A través de la selección "buenos individuos" son favorecidos para avanzar con alta probabilidad, mientras que malos individuos avanzan con baja probabilidad hacia la siguiente generación. Un algoritmo genético puede utilizar muchas técnicas diferentes para seleccionar a los individuos que deben copiarse hacia la siguiente generación, a continuación se muestran algunos métodos simples para la selección:

- ***Selección elitista:*** se garantiza la selección de los miembros más capaces de cada generación. (la mayoría de los AG no utilizan elitismo puro, sino que usan una forma modificada en la cual los mejores individuos son copiados si resultan la mejor alternativa).

- ***Selección proporcional a la aptitud:*** Los individuos más aptos tienen más probabilidad de ser copiados, pero no la certeza.

- ***Selección por rueda de ruleta:*** Una forma de selección proporcional a la aptitud en que la probabilidad de que un individuo sea seleccionado es proporcional a la diferencia entre su aptitud y el resto de los individuos (conceptualmente este método puede representarse como un juego de ruleta la cuál es partida en secciones proporcionales a las características de cada acción, en nuestro caso cada individuo, la ejecución de la ruleta es hacerla girar y una vez que se detenga las secciones mayores se verán beneficiadas).

- ***Selección escalada:*** Al incrementarse la aptitud media de la población, la fuerza de presión selectiva también aumenta y la función aptitud se hace más discriminadora. Este método puede ser utilizado para selección cuando todos los individuos tienen aptitudes semejantes y que sus diferencias de aptitud son muy pequeñas.

- ***Selección por torneo:*** Se eligen subgrupos de individuos de una población y los miembros de cada subgrupo compiten entre ellos. Solo se elige el individuo más apto de cada subgrupo para cruzarse con los más aptos de los subgrupos restantes.

- ***Selección por rango:*** a cada individuo de la población se le asigna un rango numérico basado en su aptitud y la selección se basa en este ranking en lugar de las diferencias absolutas en aptitud. La ventaja de este método es que puede evitar que los individuos muy aptos tengan mayor dominio a expensas de los más débiles en un comienzo, lo que reduce la diversidad genética de la población podría obstaculizar la búsqueda de una solución aceptable.

- ***Selección generacional:*** la descendencia de los individuos seleccionados en cada generación se convierte en toda la siguiente generación y no se conservan individuos entre las generaciones.

- ***Selección por estado estacionario:*** la descendencia de los individuos seleccionados en cada generación retornan al acervo genético preexistente reemplazando algunos de los miembros menos aptos de la siguiente generación. Se conservan algunos individuos entre las generaciones.

- ***Selección jerárquica:*** Los individuos atraviesan múltiples rondas de selección en cada generación. Las evaluaciones de los primeros niveles son más rápidas y menos discriminatorias, mientras los que sobreviven hasta niveles más altos son evaluados más rigurosamente.

### *3.2.2 REPRODUCCIÓN.*

Es un proceso en el cual cadenas individuales son copiadas de acuerdo a sus valores de la función objetivo (Biología llama a esta función la función aptitud o estado físico).

Se puede pensar de esta función como una medida de beneficio o utilidad que queremos maximizar copiando cadenas de acuerdo a su adaptabilidad o aptitud, lo cuál significa que las cadenas con un alto valor tienen una alta probabilidad de contribuir con una o más descendencia o progenie en la siguiente generación. Normalmente, AG comienza el proceso de optimización con una selección de individuos de una población aleatoria mente, entonces la capacidad de cada individuo es calculado.

El siguiente paso es la aplicación de los operadores genéticos: reproducción, cruzamiento y mutación [7] [8]. Así, nuevos individuos son producidos de este proceso, el cual entonces forma la próxima población. La transición de una población $P_g$ a la siguiente población es llamada generación, donde g designa el número de generación.

### *3.2.3 CRUZAMIENTO.*

El operador de cruzamiento tiene el objetivo de generar nuevo material genético por el intercambio de material genético entre individuos de una población [1][8][16].

Dos individuos son elegidos y cruzados, el resultado es reemplazar los padres en la próxima generación. Una vez que los individuos son seleccionados y reproducidos son colocados en una zona de apareamiento (mating pool) [8] [1], la operación del operador cruzamiento toma lugar como se muestra en la figura 3.2, se elige un número aleatorio entre 0 y 1; si el número es más pequeño que la probabilidad de cruzamiento entonces dos individuos son elegidos aleatoriamente (por un random) y sus pares de cromosomas son cortados en un punto de cruzamiento. El punto de cruzamiento determina como el material genético será compuesto en la próxima generación.

*A continuación se describen los tipos de cruzamientos más comunes en los algoritmos genéticos los cuáles son:*

***Cruzamiento por representación binaria***

Para cada pareja de individuos el punto de cruzamiento es determinado por una selección aleatoria generada. A continuación se representa en la figura 3.2 el cruzamiento sobre un punto en dos cromosomas de individuos:

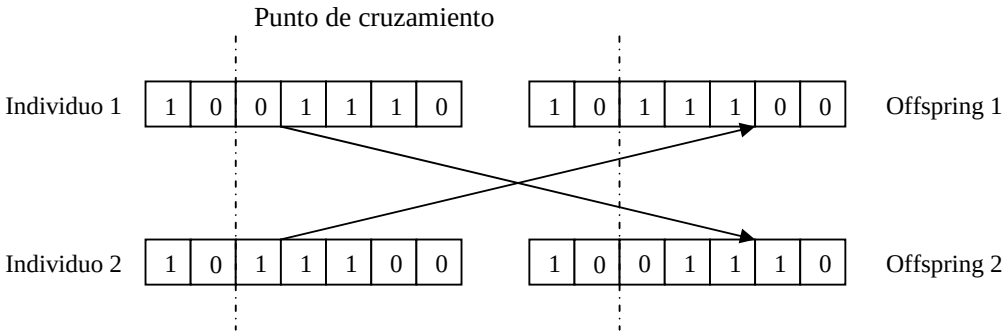



**Figura 3.2**. Representación binaria para el cruzamiento.

De la siguiente expresión se establecen los individuos padres:

$$C_1 = [C_{1,1}, C_{1,2},. . . C_{1,i}, C_{1,i+1}, . . ., C_{1,n}]$$

$$C_1 = [C_{2,1}, C_{2,2},. . . C_{2,i}, C_{2,i+1}, . . ., C_{2,n}]$$

Después de la operación de cruzamiento dos nuevos individuos (offsprings) resultan:

$$C_1^{nuevo} = [C_{1,1}, C_{1,2},. . . C_{2,i}, C_{2,i+1}, . . ., C_{2,n}]$$

$$C_2^{nuevo} = [C_{2,1}, C_{2,2},. . . C_{1,i}, C_{1,i+1}, . . ., C_{1,n}]$$

El nuevo individuo $C_1^{nuevo}$ consiste de la primera parte del individuo padre $C_1$ y de la segunda parte del individuo padre $C_2$, de forma similar el nuevo individuo $C_2^{nuevo}$ se forma a partir de la unión de las partes de los individuos padre.

***Cruzamiento por representación real.***

La representación es en base a los números reales, esta representación ha producido resultados buenos en la solución de la optimización de problemas no lineales (Michalewics, 1996) [10] [14] [20]. Denotaremos $C_1$ y $C_2$ ser dos individuos, los cuales son reproducidos, los dos elementos resultantes después de la operación de cruzamiento y son producidos a partir de una combinación lineal de sus padres $C_1^{nuevo}$ y $C_2^{nuevo}$.

$$C_1^{nuevo} = \lambda C_1 + (1 - \lambda) C_2$$

$$C_1^{nuevo} = \lambda C_2 + (1 - \lambda) C_1$$

Donde $\lambda \in [0,1]$ es un parámetro de cruzamiento.

Hasta el momento se ha mencionado el tipo de representación y el tipo de cruzamiento elegido como ejemplo para mostrar el trabajo realizado por la operación de cruzamiento, a continuación se enlista los tipos de cruzamiento empleados por los algoritmos genéticos:

a. Cruzamiento de un punto. Se elige un punto de corte y se intercambian los segmentos análogos de las dos cadenas.
b. Cruzamiento de dos puntos. Se eligen dos puntos de corte y se intercambian lo0s segmentos medios de ambas cadenas, se considera a los extremos de las cadenas como sitios contiguos.
c. Cruzamiento uniforme. Para cada posición de BIT de una cadena a generar a generar se elige aleatoriamente el BIT de la misma posición de algunas de las cadenas generadoras.

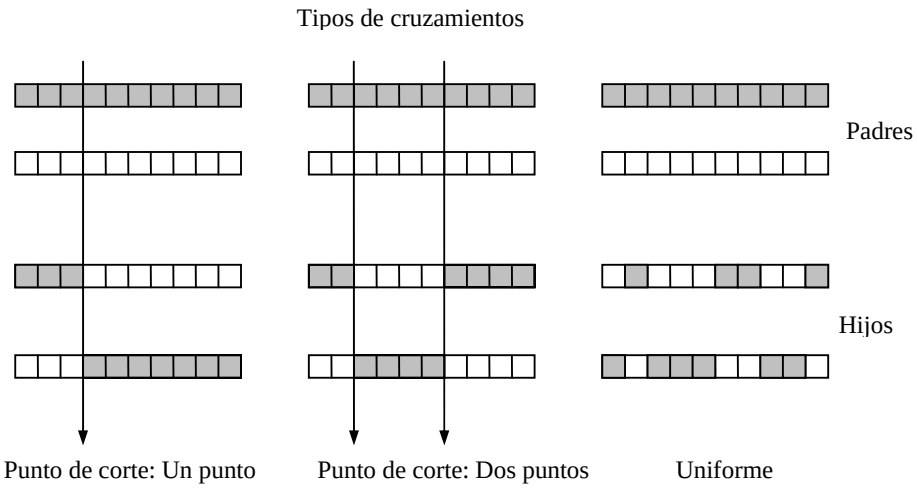



**Figura 3.3** Tipos de cruzamiento.

### *3.2.4 MUTACIÓN.*

El proceso de mutación efectúa una variación aleatoria (random) sobre el gene de un individuo, una mutación es ejecutada con la probabilidad $p_m$, la probabilidad de mutación la cual es establecida antes de la optimización. Para cada individuo un número aleatorio es calculado el cuál es comparado con la probabilidad de mutación establecida, si el número aleatorio generado para el individuo es menor que la probabilidad de mutación $p_m$ el individuo es mutado [7] [8].

***Mutación por representación binaria.*** En la representación binaria un BIT es seleccionado aleatoriamente tomando el complemento del mismo, esto es el valor de un BIT representado por 1 es tomado con el valor 0 y viceversa [7].

***Mutación por representación real.*** El operador mutación fue desarrollado originalmente en forma binaria desde entonces se han desarrollado algunos métodos que permiten la representación real, dichos métodos aplican una probabilidad de distribución el cual es definido sobre el dominio de los posibles valores de cada gene. Un nuevo gene es

calculado después de la probabilidad de distribución. El operador mutación altera aleatoriamente uno o mas genes de un individuo. Por ejemplo si tenemos el individuo $C_i = [C_{i1}, C_{i2}, \ldots C_{i,i}, \ldots, C_{i\ n}]$ y $C_{i,i}$ ser el gene seleccionado para la mutación. El dominio de la variable $C_{i,i}$ esta dado $C_{ij} = [C_{ij,min}, C_{ijmaxn}]$ por, donde $C_{ijmin}$ y $C_{ijmax}$ denotan las fronteras mínimas y máximas de la variable . La mutación de números reales es de dos tipos: mutación uniforme y no uniforme [7].

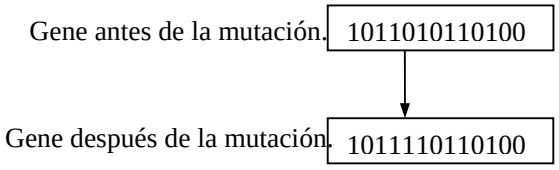



**Figura 3.4.** Mutación por representación binaria.

***Mutación uniforme.*** La aplicación de este operador resulta en un individuo $C_1^{nuevo} = [C_{i1}, C_{i2}, \ldots C_{i,i}, \ldots, C_{i\ n}]$, donde $\tilde{C}_{i,i}$ es un valor aleatorio (probabilidad de distribución uniforme) dentro del dominio de $C_{i,i}$ la mutación es aplicada con una mutación $p_m$.

***Mutación no uniforme.*** La aplicación de este operador resulta en un individuo $C_1^{nuevo} = [C_{i1}, C_{i2}, \ldots C_{i,i}, \ldots, C_{i\ n}]$, donde $\tilde{C}_{i,i}$ es un valor calculado por:

$$\therefore \qquad \tilde{C}_{i,j} = \begin{cases} C_{i,i} + Ä(g, C_{i,i\,max} - C_{i,i}) & \text{Si } h = 0 \\ C_{i,i} + Ä(g, C_{i,i} - C_{i,i\,min}) & \text{Si } h = 1 \end{cases}$$

Donde h es un digito binario elegido aleatoriamente (0 o 1). La función $\Delta(g, y)$ inicia en cero y es incrementado de acuerdo con el número de generación g tal que:

$$\Delta(g, y) = y*ra*[1 - (g/g_{max})]^b$$

Siendo ra un número generado aleatoriamente en el intervalo cerrado [0, 1], b es un parámetro elegido por el diseñador de control, el cuál determina el grado de dependencia sobre el número de generación. La búsqueda al inicio es efectuada con una mutación uniforme donde g es más pequeño [16].

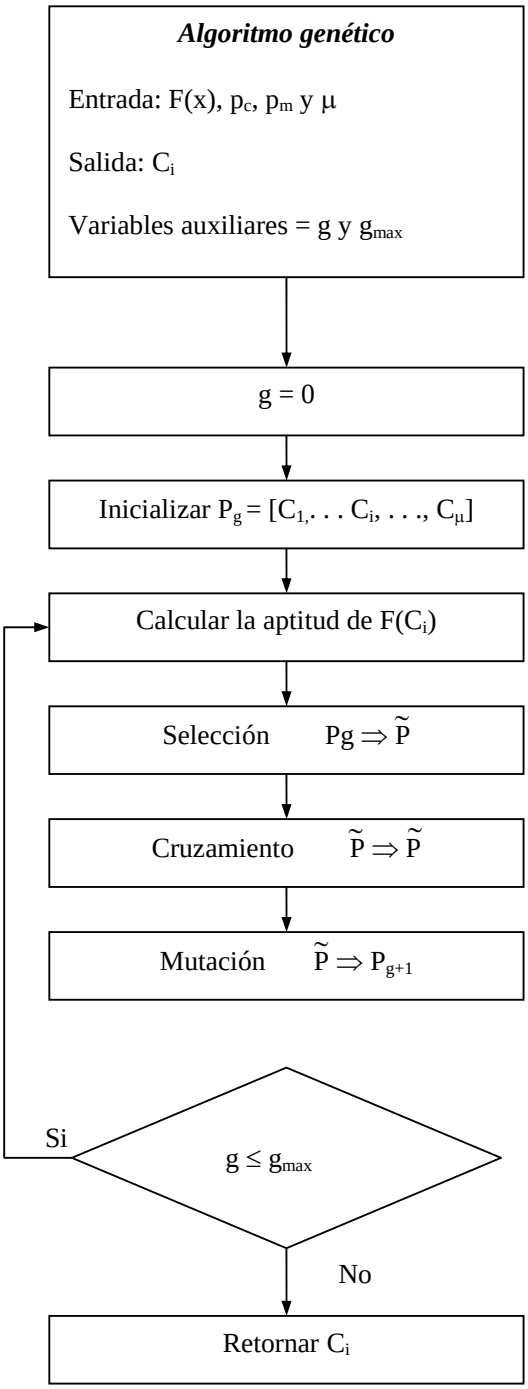



**Figura 3.5** Optimización por algoritmos genéticos.

En la figura 3.5 se presenta un esquema típico de al aplicación general de un algoritmo genético simple sobre un problema de optimización cualquiera.

## *3.3 FUNCIÓN APTITUD.*

En AG, cada individuo representa un punto en el espacio de búsqueda. En cada generación relativamente se reproducen buenos individuos mientras malos individuos no sobreviven ambos bajo un proceso simulado de evolución [7] [8] [28]. La aptitud de un individuo para sobrevivir sirve para diferenciar entre un individuo malo o bueno. La capacidad de un individuo para sobrevivir es calculada por la función aptitud F(x) [7] [8] [10] [16]. La función aptitud depende de la función objetivo en el problema de optimización. La función aptitud de cada individuo en una población indica el grado de adaptación de ese individuo a su medio ambiente.

## *3.4 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS ALGORITMOS GENÉTICOS.*

Algunas de las ventajas destacables de los algoritmos genéticos es el procesamiento paralelo de las soluciones contrario a algoritmos convencionales que trabajan en serie y solo pueden explorar soluciones en una dirección al mismo tiempo, la fácil programación (con respecto a un AG simple) y la potencialidad de los algoritmos genéticos. Los algoritmos genéticos simples (AG) descritos en este trabajo abarcan solo dos representaciones de búsqueda y quedan limitados a lo establecido por un algoritmo genético simple, la potencialidad depende en gran medida a la complejidad empleada en la utilización de los AG, este trabajo reporta un AG visualizado en la figura 3.5 donde la ventaja del trabajo paralelo es la exploración y explotación del espacio de soluciones en múltiples direcciones, si un camino resulta ser un callejón sin salida puede eliminarlo y continuar el trabajo en caminos más prometedores, proporcionándoles una mayor probabilidad en cada ejecución de encontrar una mejor solución. Como se menciono en el enunciado anterior una de las principales ventajas es permitir factores que proporcionan la mayoría de las metas heurísticas [3] el permitir la explotación y exploración de diferentes zonas (diversificación e intensificación como en TS) del espacio de búsqueda permitiendo salir de un óptimo local a los AG, no siempre se encuentra el óptimo local por lo general es un punto cercano al óptimo global o en demasiadas ocasiones se trata de un óptimo local muy alto concluyendo que no siempre podemos asegurar que se ha encontrado el óptimo global a través del recurso proporcionado por una meta heurística, por ejemplo pensemos en un paisaje (como ejemplo ventajoso de los algoritmos genéticos)[14] contamos con un avión militar que transporta un escuadrón de paracaidistas que serán desembarcados sobre un paisaje con las ordenes de buscar el pico más alto, el operador mutación y cruzamiento realizarán trabajos individuales con asociación de información la mutación sobre un individuo permitirá que este explora colinas más altas cercanas a sus proximidades donde la selección enfoca el progreso, guiando a la descendencia del algoritmo cuesta arriba hacia zonas más prometedoras del espacio de soluciones mientras que el operador de cruzamiento que desempeña quizás el papel más importante durante la búsqueda evitar que los paracaidistas consideren solo una dirección en las rutas intercambiando información con los demás miembros del escuadrón .

Las desventajas principales de los AG no están relacionados con su funcionamiento básico sino con el entorno del dominio demostrando como los individuos Suelen desenvolverse en la naturaleza, un humano no podría ser capaz de cargar un camión para desplazarlo de un lugar a otro pero si es lo suficientemente inteligente para tener la destreza de ocupar herramientas al alcance, las desventajas suelen ser consideradas con la

robustez del problema porque al crear un algoritmo genético la principal desventaja es la representación del propio problema. El lenguaje utilizado para especificar las soluciones candidatas debe ser robusto; es decir ser capaz de tolerar cambios aleatorios que no produzcan constantemente errores fatales o resultados sin sentido. Otro problema es como escribir la función aptitud (función objetivo de cada individuo) debe considerarse cuidadosamente porque los AG pueden trabajar con funciones aptitud engañosas y la calidad de la solución sea equivocada. La convergencia prematura y el utilizar el tamaño de poblaciones muy pequeñas podría incluso extinguir a dichas poblaciones o mermar la diversidad de la población demasiado pronto, traducido en la aparición de un individuo demasiado apto a sobrevivir comparado con el resto de los individuos, lo que provocaría dirigir la búsqueda hacia el óptimo local de tal individuo, evitando zonas que pudieran ser más prosperas. Como se ha mencionado los AG son técnicas de optimización evolutivas que nos permiten imitar la evolución viviente y transmitirla a problemas reales, otra desventaja que se puede presentar al igual que la naturaleza es la caracterización molecular existen individuos que no están listos para resistir estructuras biológicas que otros individuos podrían resistir, si la caracterización del dominio es equivoca para un problema en particular los algoritmos realizarán lo que uno indique pero la búsqueda arrojará resultados indeseables.
La última desventaja mencionada en este trabajo y recomendada bajo la literatura existente acerca del funcionar de los algoritmos genéticos tiene que ver con no utilizar los AG en problemas resolubles de manera analítica. No es que los algoritmos genéticos no puedan encontrar soluciones buenas para estos problemas; simplemente los métodos analíticos tradicionales consumen mucho menos tiempo y potencia computacional que los AG, esta demostrado matemáticamente que ofrecen una solución única exacta, por supuesto como no existe una solución matemática perfecta para ningún problema de adaptación biológica, este problema no aparece en la naturaleza.

### *3.5 ESQUEMAS.*

Existe una notación que representa los individuos en una forma diferente hasta el momento descrita, llamados esquemas son utilizados para representar conjuntos de cadenas binarias [7] [16], recordando que las cadenas binarias están compuestas de 1 y 0 pueden existir conjuntos con similitudes en ciertas posiciones como A{1000101110} y B{1010100111} las posiciones con diferentes valores pueden representarse por el símbolo * ∴puede representar 10*010111* representa los conjuntos A y B. Como cualquier descripción matemática tiene sus variables representativas de algunas medidas como o(H) se denomina orden del esquema, donde H es el esquema, la distancia entre la primera y la última posición explícita se denomina longitud de definición y se simboliza por δ(H), a continuación se describen estos conceptos:

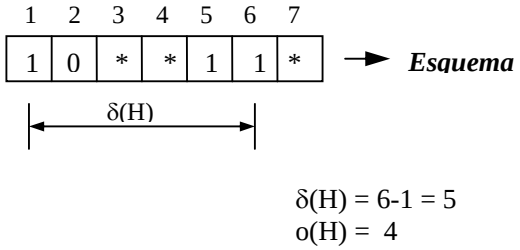



**Figura 3.6.** Conceptos generales utilizados en un esquema.

# CAPÍTULO IV

# BÚSQUEDA POR TABÚ Y ALGORTMOS GENÉTICOS CON LÓGICA DIFUSA.

## *4.1 INTRODUCCIÓN.*

Las aplicaciones de la lógica difusa ha incrementado en los últimos años debido a su potencialidad y resultados exitosos en diversas áreas convirtiéndose en una de las mas populares nuevas tecnologías de "control inteligente" el cual es definido como una combinación de teoría del control, métodos de búsqueda e inteligencia artificial [2, 7]. El control difuso es una herramienta capaz de imitar los conocimientos expertos de un humano y enfocarlos [1, 15] gracias a la teoría de conjuntos difusos (Tabla de reglas lingüísticas). Un sistema difuso en el cual ambos antecedente y consecuencia son expresadas a través de predicciones difusas son conocidas como sistema difuso Mamdani. Cuando los sistemas difusos incorporan descripciones de variables de interés difusos y no difusos, dichos sistemas son referidos como sistema difuso Takagi-Sugeno Kang (TSK) [7].

El tipo de control difuso empleado en este trabajo es el de tipo Mamdani compuesto por tres importantes elementos:

1. ***Difusificación.*** Es una interfase de entrada, la cual realiza la conversión de entradas reales en valores difusos debido al significado de los conjuntos difusos.
2. ***Mecanismo de inferencia***. Es una colección de reglas difusas de la forma si <Antecedente> Entonces <conclusión> donde conocimientos acerca del problema es obtenido. Un mecanismo de inferencia entonces produce con las reglas difusas en orden, conclusiones difusas (consecuencias) de las premisas difusas (antecedentes).
3. ***Dedifusificación***. Es la interfase de salida, la cual transforma las salidas difusas en salidas reales.

Para lograr que la difusificación y dedifusificación operen adecuadamente se requiere de dos elementos importantes:

1. Tabla de reglas lingüísticas
2. Funciones de membresía(de tipo triangulares utilizadas en este trabajo)

Estos dos componentes son establecidos de una forma permanente (estática) durante toda la aplicación del control difuso, la calidad del control difuso depende en gran medida de los valores e intervalos seleccionados para la tabla de reglas lingüísticas y las funciones de membresía consecutivamente [1, 2, 7]. La técnica de TS como técnica de optimización es empleada para alterar dichos componentes de una manera benéfica para el desempeño de la dinámica del control.

En un sistema difuso las principales variables a sintonizar son:

- *Los factores de escalamiento (si son usados)*-similar a la ganancia de sintonización en los controladores PID.
- *La posición de las funciones de membresía*- son pocas las opciones disponibles aquí, uno o más parámetros pueden ser sintonizados para cada función. Para todos los tipos de funciones de membresía, el único parámetro a sintonizar es el punto de cruzamiento (puntos de intersección entre las funciones de membresía adyacente). Para las funciones trapezoidales o triangulares, solo para la instancia en que es usado el centro de gravedad puede ser usado en el proceso de optimización. Para estos casos los tres vértices (cuatro) pueden ser decodificados.
- *Base de reglas*- En esta parte el número de variables a sintonizar es determinado por el diseñador de acuerdo con los conocimientos del problema y el rigor con el cuál la búsqueda debería ser conducida (i.e. una sintonización fina o burda).

En este capítulo se describe el empleo de TS (búsqueda por tabú) y AG (algoritmos genéticos) para la optimización de la tabla de reglas lingüísticas y las funciones de membresía. En la figura 4.1 se presenta la arquitectura básica de un controlador difuso tipo Mamdani.

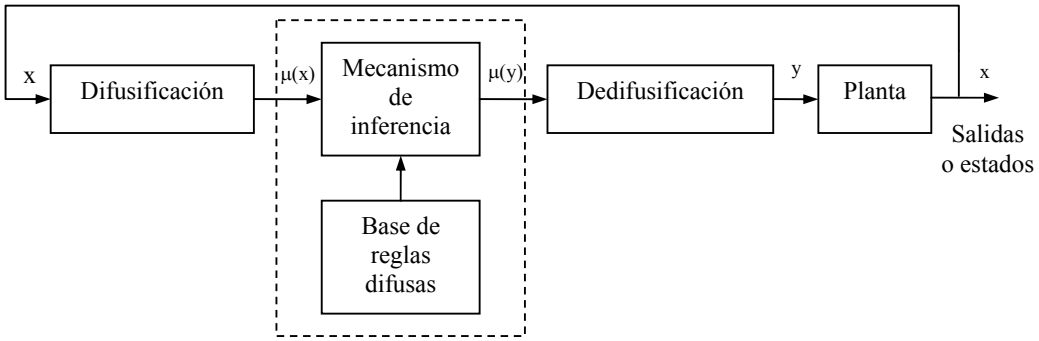



**Figura 4.1** Arquitectura básica del controlador lógico difuso sintonizado manualmente.

## *4.2 AUTOSINTONIZACIÓN DE LA TABLA DE REGLAS LINGÜÍSTICAS EMPLEANDO LA BÚSQUEDA POR TABÚ.*

En esta sección se presenta la manera de aplicar TS sobre la tabla de reglas lingüísticas, el diagrama de flujo es presentado en la figura 4.2. El primer paso para establecer TS es definir el espacio de búsqueda (tabla de reglas lingüísticas), una vez establecido el espacio de búsqueda es necesario conocer como TS define los vecindarios N(x) en las diversas zonas de la tabla de reglas lingüísticas. No existe un limite en la construcción del vecindario N(x) sobre la tabla de reglas lingüísticas esto dependerá de la imaginación del propio diseñador; donde los vecindarios pueden formar diferentes entornos que permitan experimentar soluciones x' adecuadas en un problema en particular. Una de las ventajas de TS es la exploración y explotación de zonas que permitan dirigir la búsqueda a zonas jamás visitadas; esta característica permite que TS pueda trabajar con espacios de búsqueda pequeños y grandes. La estructura de la figura 2.6 (*ver capítulo II*) es el procedimiento a seguir en este capitulo sobre la aplicación de TS para la optimización de la tabla de reglas y las funciones de membresía con respecto al término de corto plazo.

En la figura 4.2 se presenta el diagrama de flujo de la búsqueda por tabú durante una iteración del controlador difuso.

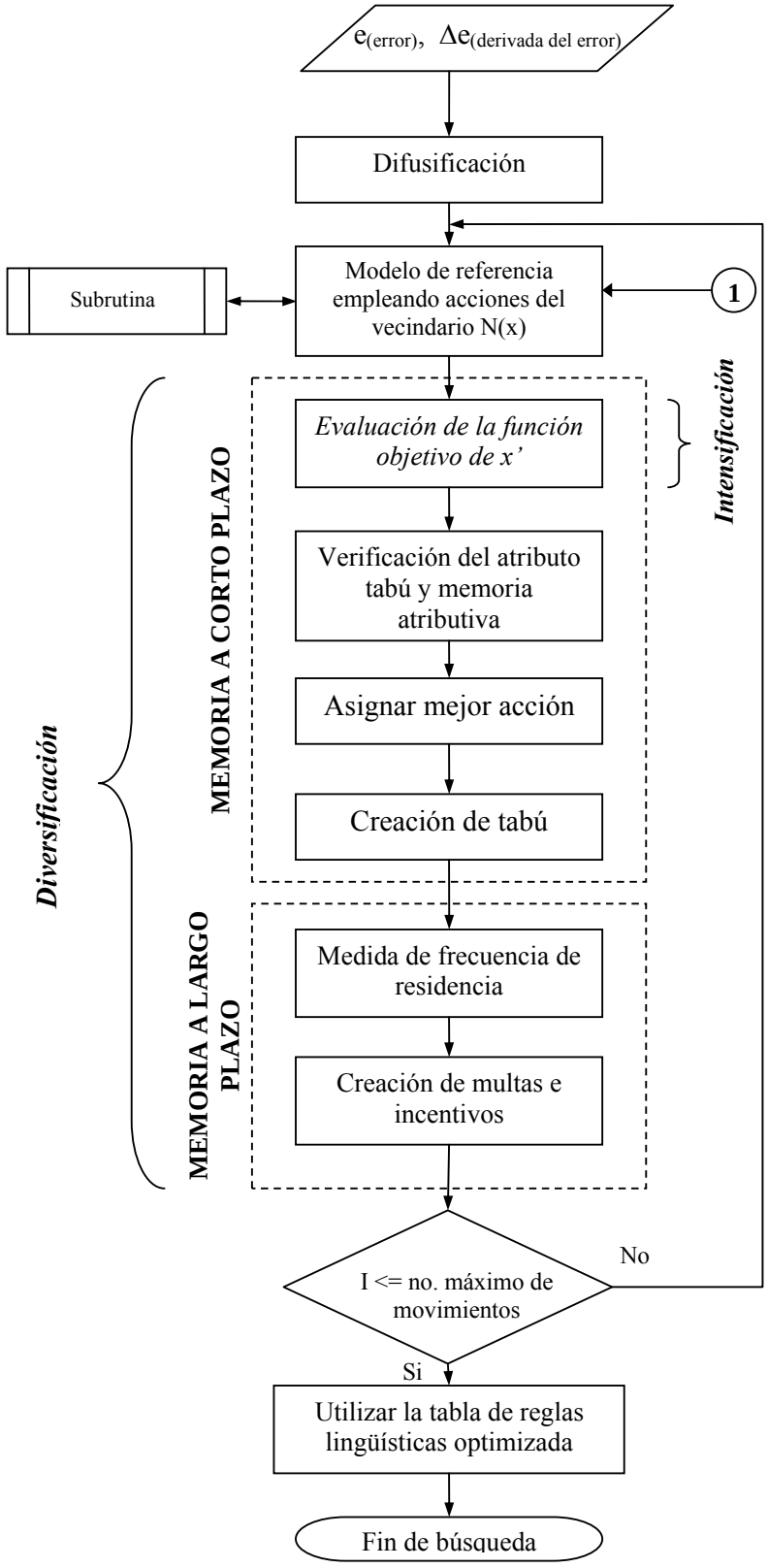



**Figura 4.2** Diagrama de flujo para TS durante una iteración del método de integración.

El diseño del controlador difuso aplicando TS sobre la optimización de la tabla de reglas lingüísticas es tal como se muestra en la figura 4.3.

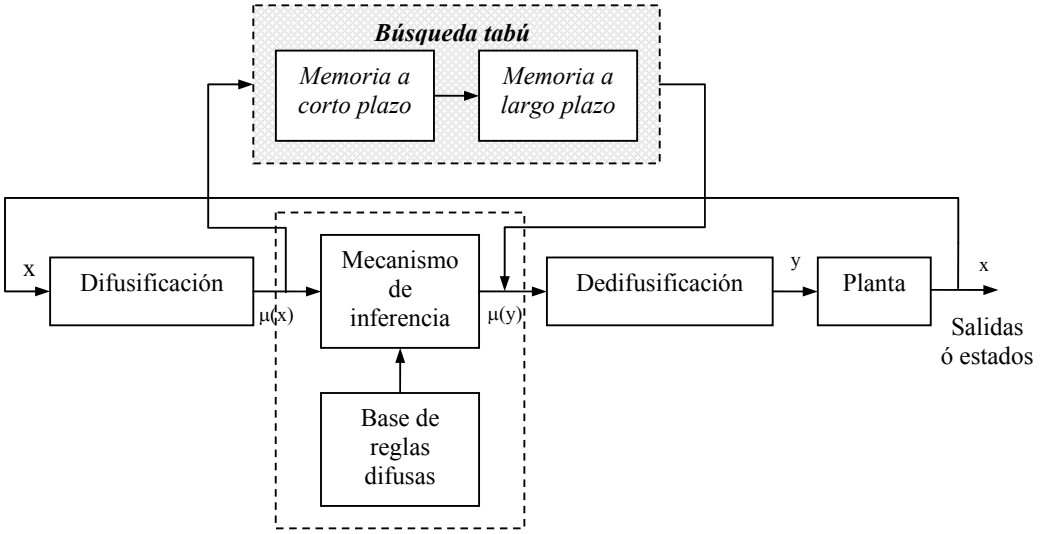



**Figura 4.3** Arquitectura del controlador lógico difuso utilizando TS en la optimización de la tabla de reglas lingüísticas.

El control difuso es un control multivariable y en este trabajo las entradas del controlador son el error y la derivada del error; sin embargo es posible manejar estructuras más complejas que dependerán de la necesidad del problema y de la experiencia del diseñador. Se plantean dos tipos de vecindades que se puede establecer con TS sobre la tabla de reglas lingüísticas (espacio de búsqueda), tal como se muestra en la tabla de la figura 4.4.

Los tipos de entornos N(x) manejados sobre la tabla de reglas lingüísticas son:

I. Vecindades laterales.

| $\Delta e$ \| $e$ | **NGR** | **NME** | **NPE** | **ZE** | **PPE** | **PME** | **PGR** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | *BG* | *BG* | *BG* | *BM* | *BP* | *BP* | ***CE*** |
| **NME** | *BG* | *BG* | *BM* | *BM* | *BP* | ***CE*** | *AP* |
| **NPE** | *BG* | *BM* | ***BM*** | ***BP*** | ***CE*** | *AP* | *AP* |
| **ZE** | *BM* | *BM* | *BP* | ***CE*** | *AP* | *AM* | *AM* |
| **PPE** | *BP* | *BP* | ***CE*** | *AP* | *AM* | *AM* | *AG* |
| **PME** | *BP* | ***CE*** | *AP* | *AP* | *AM* | *AG* | *AG* |
| **PGR** | ***CE*** | *AP* | *AP* | *AM* | *AG* | *AG* | ***AG*** |

**Figura 4.4.** Tabla de 49 reglas lingüísticas formando vecindarios extremos en diferentes posiciones de la tabla.

Los elementos manejados por TS enfocados a la tabla de reglas lingüísticas de la figura 4.4 es definido como:

$x$ = BP, siendo x la solución actual.

$N(x)$ = BM, CE.

X = Espacio de búsqueda de tamaño nxn, donde n = 7

$x'$ = Solución debida al movimiento de BM o CE.

Donde $f(x_1)$ = función objetivo debida al elemento $x_1$ (BM ó CE) de N(x).

II. Vecindario por entorno.

| $\Delta e$ \| $e$ | **NGR** | **NME** | **NPE** | **ZE** | **PPE** | **PME** | **PGR** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | *BG* | *BG* | *BG* | *BM* | *BP* | *BP* | ***CE*** |
| **NME** | *BG* | *BG* | *BM* | *BM* | *BP* | ***CE*** | *AP* |
| **NPE** | *BG* | ***BM*** | *BM* | *BP* | ***CE*** | *AP* | *AP* |
| **ZE** | *BM* | *BM* | *BP* | ***CE*** | *AP* | *AM* | *AM* |
| **PPE** | *BP* | *BP* | ***CE*** | *AP* | *AM* | *AM* | *AG* |
| **PME** | *BP* | ***CE*** | *AP* | *AP* | *AM* | *AG* | *AG* |
| **PGR** | ***CE*** | *AP* | ***AP*** | *AM* | *AG* | *AG* | ***AG*** |

**Figura 4.5.** Tabla de 49 reglas lingüísticas, formando vecindarios de entorno.

La figura 4.5 muestra los diferentes vecindarios que se forman en diferentes posiciones de la tabla de reglas lingüísticas cuando el espacio de búsqueda es por vecindario de entorno.

Donde:

x = **BM**

$N(x)$ = BM, BG, BP.

En la figura 4.5 el vecindario puede reducirse a tres elementos cuando x esta cercana a algún vértice de la tabla o cuando las acciones x' propuestas por TS (soluciones de prueba) son repetidas.

$x'$ = Solución debida al movimiento de BM ó BG ó BP.

Una vez establecidos los vecindarios N(x) y el espacio de búsqueda de trabajo de TS, tal como se muestra en la figura 4.2 el modelo de referencia empleará cada una de las acciones establecidas en el vecindario y serán evaluadas por TS en base a su función objetivo; sin embargo no es suficiente para tomar una decisión por parte de la búsqueda para establecer una solución final (tabla de reglas optimizada) se necesita analizar las diferentes soluciones x' utilizadas a lo largo de la aplicación de TS en dos periodos que permiten reforzar el criterio de TS para formar una solución final, tales periodos son:

1. Periodo a corto Plazo.
2. Periodo a largo plazo.

### *4.2.1 MEMORIA DE CORTO PLAZO.*

La memoria a corto plazo es la memoria encargada de registrar los movimientos llevados a cabo sobre la tabla de reglas lingüísticas [3], en este trabajo el registro de los eventos anteriores a corto plazo son 32 (0.124s) iteraciones anteriores, la memoria a corto plazo evalúa la solución elite actual. En el periodo de 32 iteraciones la memoria a corto plazo elige un determinado número de elementos vecinos N(x) como futuros candidatos para formar parte de la próxima solución élite, esta elección dependerá de factores tales como el tipo de influencia y atributo tabú [3][6][8]. En este trabajo los plazos para la memoria a corto plazo y largo plazo serán estáticos, modificando únicamente los tiempos establecidos para la base tabú.

La búsqueda por tabú comenzará con una simple búsqueda de vecindario como parte de la memoria a corto plazo donde son registrados los eventos más importantes realizados por TS.

Los elementos que constituyen la memoria a corto plazo son:

- Base tabú
- Lista de candidatos
- Memoria explicita
- Criterio de aspiración
- Memoria atributiva (Tabú activo, multas e incentivos)
- Solución elite (construcción de lista maestra)

La memoria a corto plazo es un elemento que recuerda un número n de iteraciones anteriores donde han sido realizado un número limitado de movimientos x' y principalmente recuerda sus características más importantes, tales como calidad del movimiento y el estado tabú de x' durante la búsqueda.

A continuación se presentan los conceptos que emplea TS durante una búsqueda relacionados a la lógica difusa:

***Espacio de búsqueda.*** Es definido como todos aquellos elementos (acciones) pertenecientes a la tabla de reglas lingüísticas, incluyendo el centro de nuestro universo de discusión (el cuál jamás abandonara la solución elite de prueba), donde n = No. de funciones de membresía/2 para el error y para la derivada del error.

***Solución élite.*** Es la lista final de candidatos resultada de la construcción de una lista maestra debida a examinar todos los movimientos realizados durante la memoria a corto plazo, seleccionando los k mejores movimientos encontrados. Este movimiento es realizado analizando cada una de las vecindades de la solución actual [3] [13].

***Lista de candidatos.*** Es una lista que contiene todos aquellos elementos disponibles para formar parte de la siguiente solución elite que será analizada por TS, en el caso de TS enfocada a la optimización de la tabla de reglas lingüísticas son todas aquellas acciones lingüísticas pertenecientes a N*(x), donde aquellas acciones pertenecientes a la memoria explícita (T) son las acciones excluidas de N*(x) pero pertenecientes a N(x). En la optimización enfocada a las funciones de membresía son todas aquellas combinaciones de los intervalos posibles contenidos en el espacio de búsqueda X [3] [27] [28].

Para comenzar la descripción de la memoria a corto plazo se recomienda seguir el diagrama de flujo de la figura 2.6 del capitulo 2 y la figura 4.2.

La búsqueda comenzara por evaluar los resultados obtenidos después de realizar los suficientes movimientos (*ver figura 4.6a*) simulando un modelo de referencia que incluye la máquina síncrona y el controlador difuso estático se emplean todos los elementos de N(x) que serán analizados por TS en base a su función objetivo fo($x_n$), esto es, en la iteración k la solución actual x Є X (donde X espacio de búsqueda) será comparada con el comportamiento de la función objetivo de cada una de las posibles soluciones resultantes de intercambiar temporalmente x por N(x), donde x' es la solución obtenida del elemento probado $x_n$, por ejemplo se tiene la tabla de reglas de 5x5 de la figura 4.6b, el elemento NP es la solución(x) actual de la iteración k, los movimientos posibles sobre el vecindario N(x) son para los elementos sombreados NM y CE (*para vecindario lateral*) donde TS analiza cual de los movimientos propuestos resulta mejor solución que la actual en base al valor de la función objetivo, así el valor para la función-objetivo(NP)= 0.0456, para la función-objetivo(NM)= 0.0560 y para la función-objetivo(CE)= 0.07890, por lo tanto ninguno de los movimientos resulta mejor solución que NP ya que se trata de un problema de minimización [7] [3] [8]; entonces la solución x no es sustituida y prosigue en la lista maestra para formar la solución elite que será analizada en la próxima búsqueda [3] [13].

| ***Δe*** \ ***e*** | **NGR** | **NME** | **ZE** | **PME** | **PGR** |
|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | *NG* | *NG* | *NG* | | |
| **NME** | *NG* | *NM* | ***NP*** | | |
| **ZE** | *NG* | *NM* | ***CE*** | | |
| **PME** | *NM* | ***CE*** | *PM* | *PM* | *PG* |
| **PGR** | ***CE*** | *PM* | *PG* | *PG* | *PG* |

NP sustituido por NM solo en el modelo de referencia, esta acción es llamada movimiento

4.6 (a). Movimiento.

| ***Δe*** \ ***e*** | **NGR** | **NME** | **ZE** | **PME** | **PGR** |
|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | *NG* | *NG* | *NG* | *NM* | ***CE*** |
| **NME** | *NG* | *NM* | ***NP*** | *CE* | *PM* |
| **ZE** | *NG* | *NM* | ***CE*** | *PM* | *PG* |
| **PME** | *NM* | ***CE*** | *PM* | *PM* | *PG* |
| **PGR** | ***CE*** | *PM* | *PG* | *PG* | *PG* |

4.6 (b). Vecindad N(x)

**Figura 4.6.** Movimiento y vecindad N(x) generador por TS en corto plazo.

Tal como se ha explicado la búsqueda consiste de probar elementos alternos (guía heurística) [3], saber cuales elementos son los indicados y poder clasificar un vecindario reducido N*(x) el cual es reforzado por los elementos contenidos en el periodo de corto plazo. En las secciones posteriores se indican los elementos que constituyen a la memoria a corto plazo (búsqueda exhaustiva).

### *4.2.1.1 EXAMINAR LISTA DE CANDIDATOS.*

La lista de candidatos esta compuesta por todos aquellos elementos contenidos en la tabla de reglas, el diagrama de flujo de la figura 4.2 muestra que TS examina los candidatos de la lista en cada iteración del mismo diagrama hasta cumplir con los suficientes movimientos en base al vecindario N(x).

En este paso TS examina cada uno de los elementos candidatos pertenecientes al vecindario asociado N(x) en la iteración correspondiente k y como resultado al análisis de la aplicación de control difuso con tal elemento, se puede establecer que mientras el error y la derivada del error sean completamente cero TS no realiza ningún análisis debido a que cada una de las soluciones x' no arrojan un resultado mejor que el presente. Retomando de nuevo la tabla de reglas lingüísticas con un X(espacio de búsqueda) de 7x7, el elemento propuesto por el control difuso es **AM** y por lo tanto N(x) esta compuesto de los elementos laterales que forman tal vecindario asociado mostrado en la figura 4.7, TS realizara una exploración con cada uno de los elementos analizando su comportamiento en base a su función objetivo, donde el valor la función objetivo de AM es 0.0123, para los elementos vecinos su valor es $AM_{(elemento\ izquierdo)}$= 0.0123 y $AG_{(elemento\ derecho)}$ = 0.011, por lo tanto TS selecciona AG como elemento característico para forma parte de la solución maestra, en este paso TS únicamente realiza el análisis ya descrito con cada una de las soluciones x' resultado de intercambiar el elemento vecino por el actual llamado movimiento y que es una simulación para que TS en base a sus elementos constituyentes tome una decisión para determinar cual es la mejor tabla de reglas.

| $\Delta e$ \| $e$ | **NGR** | **NME** | **NPE** | **ZE** | **PPE** | **PME** | **PGR** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | *BG* | *BG* | *BG* | *BM* | *BP* | *BP* | ***CE*** |
| **NME** | *BG* | *BG* | *BM* | *BM* | *BP* | ***CE*** | *AP* |
| **NPE** | *BG* | *BM* | *BM* | *BP* | ***CE*** | *AP* | *AP* |
| **ZE** | *BM* | *BM* | *BP* | ***CE*** | *AP* | *AM* | *AM* |
| **PPE** | *BP* | *BP* | ***CE*** | *AP* | ***AM*** | ***AM*** | ***AG*** |
| **PME** | *BP* | ***CE*** | *AP* | *AP* | *AM* | *AG* | *AG* |
| **PGR** | ***CE*** | *AP* | *AP* | *AM* | *AG* | *AG* | *AG* |

**Figura 4.7** Vecindario N(x), por búsqueda de vecindario lateral.

Con respecto a la búsqueda por entorno el tamaño del vecindario aumenta, tal como se muestra en la figura 4.8, analizando el mismo elemento AM con un valor de $fo_{(función\ objetivo)}$ = 0.0123, evitando analizar el elemento quedaría el mismo resultado, TS solo explora aquellos con nomenclatura diferente, quedando solo los elementos con función objetivo $fo_{(AP)}$ = 0.01256 y $fo_{(AG)}$ = 0.011, se observa que TS indica que AG tanto para una búsqueda sobre vecindario lateral como de entorno es la solución deseable, es importante recordar que el evitar movimientos con elementos iguales quitaría tiempo de ejecución de programa por tal razón es recomendable realizar los movimientos sobre aquellos elementos diferentes.

| $\Delta e$ \| $e$ | **NGR** | **NME** | **NPE** | **ZE** | **PPE** | **PME** | **PGR** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | *BG* | *BG* | *BG* | *BM* | *BP* | *BP* | ***CE*** |
| **NME** | *BG* | *BG* | *BM* | *BM* | *BP* | ***CE*** | *AP* |
| **NPE** | *BG* | *BM* | *BM* | *BP* | ***CE*** | *AP* | *AP* |
| **ZE** | *BM* | *BM* | *BP* | ***CE*** | ***AP*** | ***AM*** | ***AM*** |
| **PPE** | *BP* | *BP* | ***CE*** | *AP* | ***AM*** | ***AM*** | ***AG*** |
| **PME** | *BP* | ***CE*** | *AP* | *AP* | ***AM*** | ***AG*** | ***AG*** |
| **PGR** | ***CE*** | *AP* | *AP* | *AM* | *AG* | *AG* | *AG* |

**Figura 4.8** Vecindario N(x), por búsqueda de vecindario de entorno

No existe un número limitado para los tipos de vecindarios cuando TS es enfocada a la tabla de reglas lingüísticas y para las funciones de membresía esto depende del diseñador y de los resultados encontrados.

### *4.2.1.2 MEMORIA EXPLÍCITA.*

Una característica importante de TS es poder recordar cuales fueron las soluciones examinadas y evitar ciclos sobre zonas visitadas recientemente, TS necesita tener un recuento histórico de dicho análisis principalmente en la memoria a corto plazo, la memoria explicita desempeña dicha función. La memoria explicita se encarga de registrar los últimos movimiento realizados, la memoria explícita cumple dos objetivos evitar ciclos y evitar búsquedas no necesarias. En la figura 4.7 la acción AM fue la solución en la iteración k y los movimientos fueron realizados con los elementos AM y AG, en la iteración k + 5 nuevamente AM es la solución actual, por lo tanto AG ya había sido propuesta como una solución que puede formar parte de la lista maestra, la memoria explícita indica a TS que ya se había realizado dicho movimiento y evita analizarla principalmente porque tal solución ya pertenece a la solución elite, en esta parte TS evita análisis innecesario, en la figura 4.9 se muestra una tabla donde TS con ayuda de la memoria explícita conoce cual acción ha sido visitada recientemente.

| $\Delta e$ \| $e$ | **NGR** | **NME** | **NPE** | **ZE** | **PPE** | **PME** | **PGR** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | BG | BG | BG | BM | BP | BP | CE |
| **NME** | BG | BG | **BM** | BM | BP | CE | AP |
| **NPE** | BG | BM | ***BP*** | **BP** | CE | AP | AP |
| **ZE** | BM | BM | BP | **CE** | AP | AM | AM |
| **PPE** | BP | BP | CE | ***AP*** | **AM** | AM | AG |
| **PME** | BP | CE | **AP** | AP | AM | AG | AG |
| **PGR** | CE | AP | AP | AM | AG | AG | AG |

**Figura 4.9** Movimientos realizados y registrados sobre la tabla de reglas lingüísticas.

Los movimiento realizados por TS para las soluciones actuales (letras en cursiva) habían sido aquellas acciones sombreadas, la memoria explicita recuerda que dichos elementos ya han sido analizados por lo tanto no pueden formar parte de la solución elite actual, pero aquellas acciones no sombreadas si pueden ser candidatos por lo tanto la memoria explícita no las registra, en este trabajo la memoria explicita se lleva de tal forma que cuando la búsqueda empieza se forma una tabla de ceros, cuando un elemento es analizado tanto x como x' son registrados con un 1.

Tal como se muestra en la figura 4.9 las acciones sombreadas son posibles candidatos, la memoria explícita identifica en base a un mapa binario con las mismas dimensiones a la tabla de reglas lingüísticas cuales elementos han sido visitados recientemente. El control difuso establece diferentes zonas de trabajo sobre la tabla de reglas lingüísticas durante la simulación, si permanece en una misma zona debido a un mal planteamiento de la memoria explícita, la solución elite converge demasiado rápido y no es la óptima. Cada cierto periodo de iteraciones la memoria explícita es puesta en cero y cuando una solución debida a un movimiento es realizada se coloca un uno que indica la huella de la ruta de búsqueda hecha por TS durante un número definido de iteraciones evitando rutas o patrones de búsqueda cíclicos (ver figura 4.10).

| $\Delta e$ \| $e$ | NGR | NME | NPE | ZE | PPE | PME | PGR |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **NME** | 0 | 0 | **1** | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **NPE** | 0 | 0 | **1** | **1** | 0 | 0 | 0 |
| **ZE** | 0 | 0 | 0 | **1** | 0 | 0 | 0 |
| **PPE** | 0 | 0 | 0 | **1** | **1** | 0 | 0 |
| **PME** | 0 | 0 | **1** | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **PGR** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

**Figura 4.10** Movimientos realizados y registrados sobre la memoria explicita que mantiene las mismas dimensiones que la tabla de reglas lingüísticas

### *4.2.1.3 VERIFICACIÓN TABÚ.*

En este paso TS identifica cuales elementos examinados durante la búsqueda son tabú activo o no. Existen tres estructuras sobre las cuales TS conoce y establece el estado tabú de determinada acción, una de las estructuras tiene las mismas dimensiones que la tabla de reglas lingüísticas (*ver figura 4.12 b, memoria atributiva*), su propósito es reconocer cual elemento puede ser candidato completamente para ingresar a la solución elite en base a las características cualitativas de la función objetivo de tal acción y las dos estructuras restantes (*ver figura 4.11*) son la base de tiempo para multar a un elemento que entra en la lista maestra no permitirle salir de ella durante un intervalo de tiempo ($t_k$, $t_{k+tsumado}$) y para multar a un elemento con cierto intervalo de tiempo no permitirle entrar a la solución maestra debido a su mala historia.

Las bases de tiempo son tal como se muestra en la figura 4.11.

| Acción | BG | BM | BP | CE | AP | AM | AG |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Tiempo (segundos) | 0.125 | 0.125 | 0.125 | 0.125 | 0.125 | 0.125 | 0.125 |

4.11 (a) Base tabú: elemento sumado

| Acción | BG | BM | BP | CE | AP | AM | AG |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Tiempo (segundos) | 0.24 | 0.24 | 0.24 | 0.24 | 0.24 | 0.24 | 0.24 |

4.11 (b) Base tabú: elemento eliminado

**Figura 4.11** Base Tabú para elementos eliminados y sumados.

Para mostrar el funcionamiento de la memoria atributiva, se establece la tabla de reglas lingüísticas de 7x7 mostrada en la figura 4.12, la solución actual k x es AP (NPE, PME) ∈ X(e, Δe), el vecindario reducido N*(x) es BP, CE, AM y AG.

| Δ*e* \ *e* | **NGR** | **NME** | **NPE** | **ZE** | **PPE** | **PME** | **PGR** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | *BG* | *BG* | *BG* | *BM* | *BP* | *BP* | *CE* |
| **NME** | *BG* | *BG* | *BM* | *BM* | ***BP*** | ***CE*** | ***AG*** |
| **NPE** | *BG* | *BM* | *BP* | *BP* | ***CE*** | AP | ***AP*** |
| **ZE** | *BM* | *BM* | *BM* | *CE* | ***AP*** | ***AM*** | ***AM*** |
| **PPE** | *BP* | *BP* | *CE* | *AP* | *AM* | *AM* | *AG* |
| **PME** | *BP* | *CE* | *AP* | *AP* | *AM* | *AG* | *AG* |
| **PGR** | *CE* | *AP* | *AP* | *AM* | *AG* | *AG* | *AG* |

**Figura 4.12** Elementos analizados por TS.

Considerando t = 1.004 segundos, tomando en cuenta que se simulo la falla cuando t = 1 s y la variable I = 1, la memoria atributiva en este instante es como se muestra en la figura 4.13.

| Δ*e* \ *e* | **NGR** | **NME** | **NPE** | **ZE** | **PPE** | **PME** | **PGR** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **NME** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **NPE** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **ZE** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **PPE** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **PME** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **PGR** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

4.13 Memoria atributiva cuando I = 1 para elemento sumado y elemento eliminado.

Si $fo_{(AP)} = 0.01445$, $fo_{(BP)} = 0.01222$, $fo_{(CE)} = 0.0344$, $fo_{(AM)} = 0.0010$ y $fo_{(AG)} = 0.00988$, la mejor x' es AG, donde la memoria explicita hasta el momento es tal como se muestra en la figura 4.14.

Cuando se ha realizado la sustitución de AP por AG el nuevo valor es **1**

| Δ*e* \ *e* | **NGR** | **NME** | **NPE** | **ZE** | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | 0 | 0 | 0 | 0 | | | |
| **NME** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **NPE** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **ZE** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **PPE** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **PME** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **PGR** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

4.14 Memoria explícita cuando I = 1.

TS ahora sustituye AP por AG y la casilla correspondiente a (NME, PGR) es enmascarada con un uno para indicar en la memoria explícita que este elemento ha sido visitado, con respecto la memoria atributiva las estructuras quedan como se muestran en la figura 4.15a y 4.15b.

| $\Delta e$ \| $e$ | NGR | NME | NPE | ZE | PPE | PME | PGR |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **NME** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1.124 |
| **NPE** | 0 | 0 | *0* | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **ZE** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **PPE** | 0 | 0 | 0 | *0* | 0 | 0 | 0 |
| **PME** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **PGR** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

4.15 (a). Memoria atributiva para el elemento sumado

| $\Delta e$ \| $e$ | NGR | NME | NPE | ZE | PPE | PME | PGR |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **NME** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1.24 |
| **NPE** | 0 | 0 | *0* | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **ZE** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **PPE** | 0 | 0 | 0 | *0* | 0 | 0 | 0 |
| **PME** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **PGR** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

4.15 (b). Memoria atributiva para el elemento eliminado

**Figura 4.15** Memoria explicita y atributiva.

Las estructuras mostradas en la figura 4.15 indican que AP no podrá ser incorporada a la solución elite por un periodo de 0.24 segundos y la acción AG no podrá ser eliminada de la solución elite por un periodo de 0.124 segundos. Si se supone t = 4 segundos las diversas estructuras mostradas en las figuras 4.14 y 4.15 tendrán valores distintos a cero ya que se habrá realizado un estudio de la calidad de cada solución y la base tabú será distinta, la cual es analizada por la memoria a largo plazo. En t = 4 segundos la tabla de reglas puede resultar como la estructura mostrada en la figura 4.16a.

| $\Delta e$ \| $e$ | NGR | NME | NPE | ZE | PPE | PME | PGR |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | *BG* | *BG* | *BG* | *BM* | *BP* | *BP* | *CE* |
| **NME** | *BG* | *BM* | *BP* | *BM* | *CE* | *AP* | *AM* |
| **NPE** | *BM* | *BM* | *BM* | *BP* | *BP* | AP | *AP* |
| **ZE** | *BM* | ***BM*** | ***BM*** | ***CE*** | *AP* | *AG* | *AM* |
| **PPE** | *BP* | ***BP*** | *CE* | ***AP*** | *AP* | *AM* | *AM* |
| **PME** | *BP* | ***AP*** | ***AP*** | ***AM*** | *AM* | *AG* | *AG* |
| **PGR** | *CE* | *AP* | *AP* | *AM* | *AG* | *AP* | *AG* |

4.16 (a). Lista maestra cuando t = 4segundos.

| $\Delta e$ \| $e$ | NGR | NME | NPE | ZE | PPE | PME | PGR |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **NME** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| **NPE** | 1 | 1 | *1* | 1 | 0 | 0 | 1 |
| **ZE** | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| **PPE** | 0 | 1 | 0 | *1* | 1 | 1 | 1 |
| **PME** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **PGR** | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |

4.16 (b) Memoria explícita cuando t = 4 segundos.

| $\Delta e$ \| $e$ | NGR | NME | NPE | ZE | PPE | PME | PGR |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **NME** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1.124 |
| **NPE** | 0 | 0 | *0* | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **ZE** | 0 | 3.678 | 0 | **0** | 0 | 0 | 0 |
| **PPE** | 0 | 0 | 1.245 | *0* | 3.211 | 0 | 4.122 |
| **PME** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **PGR** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

4.16 (c). Memoria atributiva para el elemento sumado cuando t = 4 segundos

| $\Delta e$ \| $e$ | NGR | NME | NPE | ZE | PPE | PME | PGR |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **NME** | 0 | 0 | 0 | 0 | 2.256 | 0 | 3.256 |
| **NPE** | 0 | 2.1236 | *0* | 1.256 | 0 | 0 | 0 |
| **ZE** | 0 | 4.015 | 0 | **0** | 0 | 0 | 0 |
| **PPE** | 0 | 0 | 0 | *4.001* | 0 | 0 | 0 |
| **PME** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **PGR** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

4.16 (d). Memoria atributiva para el elemento eliminado cuando t = 4 segundos

| **Acción** | **BG** | **BM** | **BP** | **CE** | **AP** | **AM** | **AG** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Tiempo (segundos) | 0.127 | 0.125 | 0.115 | 0.125 | 0.175 | 0.125 | 0.125 |

4.16 (e) Base tabú: elemento sumado

| **Acción** | **BG** | **BM** | **BP** | **CE** | **AP** | **AM** | **AG** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Tiempo (segundos) | 0.235 | 0.214 | 0.24 | 0.24 | 0.245 | 0.24 | 0.24 |

4.16 (e) Base tabú: elemento eliminado

**Figura 4.16** Listas maestras cuando t = 4 segundos.

Tal como se muestra en las estructuras cuando t = 4 segundos, la solución actual x propuesta por el controlador difuso es CE con un vecindario reducido N*(x) AP, AM, BP y BM, donde $fo_{(CE)} = 0.01225$, $fo_{(AP)} = 0.0112$, $fo_{(AM)} = 0.01225$, $fo_{(BP)} = 0.00988$ y $fo_{(BM)} = 0.0015$ , la mejor opción es la acción BM.

Una vez que TS ha reconocido cual acción puede ser elemento de la siguiente lista maestra se debe considerar dentro del periodo de corto plazo sus cualidades basadas en su historia. TS revisa si BM no contiene una multa de tiempo en la lista atributiva para elemento eliminado o revisa si para CE no contiene una multa para elemento sumado y además revisa si en la memoria explícita la acción ha sido visitada recientemente en varias ocasiones. En la solución elite (ver figura 4.16a) la tabla de reglas indica que BM esta en dos casillas dentro de N(x), por lo tanto si en una posición no atraviesa el umbral de calidad (*criterio de aspiración*) podrá hacerlo en la otra posición. TS revisa la acción ubicada en (ZE, NME) y la estructura para elemento eliminado indica que no puede ser sumado a la solución maestra, pero la memoria atributiva elemento sumado indica que CE si puede ser sustituido por algún candidato de la lista, la memoria explícita indica que BM fue visitado recientemente, la acción BM ubicada en (ZE, NPE) indica que no existe multa en esa posición para la memoria atributiva elemento eliminado y tampoco para la memoria explícita, por lo tanto puede ser incorporado. Si la búsqueda hubiera sido por vecindades laterales el resultado no habría sido el mismo. Las estructuras resultan como se muestra en la figura 4.17a, b, c.

| $\Delta e$ \| $e$ | **NGR** | **NME** | **NPE** | **ZE** | **PPE** | **PME** | **PGR** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | *BG* | *BG* | *BG* | *BM* | *BP* | *BP* | *CE* |
| **NME** | *BG* | *BM* | *BP* | *BM* | *CE* | *AP* | *AM* |
| **NPE** | *BM* | *BM* | *BM* | *BP* | *BP* | AP | *AP* |
| **ZE** | *BM* | ***BM*** | ***BM*** | ***CE*** | *AP* | *AG* | *AM* |
| **PPE** | *BP* | ***BP*** | *BM* | ***AP*** | *AP* | *AM* | *AM* |
| **PME** | *BP* | ***AP*** | ***AP*** | ***AM*** | *AM* | *AG* | *AG* |
| **PGR** | *CE* | *AP* | *AP* | *AM* | *AG* | *AP* | *AG* |

4.17 (a). Lista maestra cuando t = 4segundos.

| $\Delta e$ \| $e$ | **NGR** | **NME** | **NPE** | **ZE** | **PPE** | **PME** | **PGR** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **NME** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| **NPE** | 1 | 1 | *1* | 1 | 0 | 0 | 1 |
| **ZE** | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| **PPE** | 0 | 1 | 0 | *1* | 1 | 1 | 1 |
| **PME** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **PGR** | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |

4.17 (b) Memoria explícita cuando t = 4 segundos.

| $\Delta e$ \| $e$ | **NGR** | **NME** | **NPE** | **ZE** | **PPE** | **PME** | **PGR** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **NME** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1.124 |
| **NPE** | 0 | 0 | *0* | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **ZE** | 0 | 3.678 | 0 | **0** | 0 | 0 | 0 |
| **PPE** | 0 | 0 | 4.125 | *0* | 3.211 | 0 | 4.122 |
| **PME** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **PGR** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

4.17 (c). Memoria atributiva para el elemento sumado cuando t = 4 segundos

| $\Delta e$ \| $e$ | NGR | NME | NPE | ZE | PPE | PME | PGR |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **NME** | 0 | 0 | 0 | 0 | 2.256 | 0 | 3.256 |
| **NPE** | 0 | 2.1236 | *0* | 1.256 | 0 | 0 | 0 |
| **ZE** | 0 | 4.015 | 4.214 | **0** | 0 | 0 | 0 |
| **PPE** | 0 | 0 | 0 | *4.001* | 0 | 0 | 0 |
| **PME** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **PGR** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

4.17 (d). Memoria atributiva para el elemento eliminado cuando t = 4 segundos
**Figura 4.17** Estructuras resultantes cuando t = 4 segundos.

Como se muestra en la figura 4.17 b, c y d la multa no fue como se estableció en la base de tiempo original, esto se debe al estudio que realiza la memoria de frecuencia con la ayuda de la memoria a largo plazo.

#### *4.2.1.4 SELECCIÓN DE LA ACTUALIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE TABÚ CREANDO MULTAS.*

En este paso una vez analizados todos las acciones TS tiene los elementos necesarios para tomar una decisión de cual acción es la más apropiada para formar parte de la siguiente solución de prueba. Una vez elegido la acción correspondiente TS multará al elemento sustituido de la tabla por el elemento perteneciente a la lista de candidatos, el elemento eliminado tendrá un estado tabú activo por 0.24 segundos esto dependerá de la base tabú correspondiente y el elemento sumado a la tabla que no podrá ser eliminado de dicha tabla por un periodo de 0.125 segundos también dependiendo de la base tabú al elemento correspondiente.

#### *4.2.1.5 VERIFICACIÓN DE TERMINACIÓN.*

En este paso si se han realizado los suficientes movimientos sobre N*(x) la búsqueda finaliza si no continua con la valoración de cada uno de los elementos de la lista de candidatos [3]. En la figura 4.18 se muestra una tabla de reglas lingüísticas después del intervalo de la memoria a corto plazo. Si no se ha logrado los suficientes movimientos TS irá al paso 1 hasta cumplir con los movimientos deseados.

| $\Delta e$ \| $e$ | NGR | NME | NPE | ZE | PPE | PME | PGR |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | BG | BG | BG | BM | BP | BP | CE |
| **NME** | BG | BG | BP | BM | BP | AP | AP |
| **NPE** | BG | BM | *BP* | BP | CE | AP | AP |
| **ZE** | BM | BM | BP | CE | AP | AM | AM |
| **PPE** | BP | BP | BP | *AP* | AM | AM | AM |
| **PME** | BP | CE | AP | AP | AM | AG | AG |
| **PGR** | CE | AG | AP | AM | AG | AG | AG |

**Figura 4.18.** Solución elite de prueba que será analizada por TS para el próximo intervalo de la memoria a corto plazo.

### *4.2.1.6 EJECUTAR EL MOVIMIENTO.*

En este paso se ejecutará un movimiento si se cumplen las condiciones establecidas por TS para la acción correspondiente, dependerá principalmente del criterio de aspiración, de las diferentes memorias utilizadas y de la calidad del movimiento.

## *4.2.2 AUTOSINTONIZACIÓN DE LAS FUNCIONES DE MEMBRESÍA EMPLEANDO LA BÚSQUEDA POR TABÚ.*

El otro elemento a sintonizar tal como se menciono en 4.1 son las funciones de membresía a través de cualquier técnica heurística o algún método descendente. La búsqueda por tabú se empleada para sintonizar los intervalos sobre el universo de discusión para el error y la derivada del error. El espacio de búsqueda esta formado por las n pariciones posibles sobre el universo de discusión tal espacio de búsqueda X es descrito por una estructura combinada de los vectores $xe_1$ y $x\Delta e_1^T$ que indican el número de particiones hechas en el universo de discusión para cada función de membresía y donde xe y xΔe son las variables que indican que tan lejos se encuentra x de la primer x'(movimiento de prueba) como elemento de N(x). En la figura 4.19 se muestra el espacio de búsqueda establecido en este trabajo.

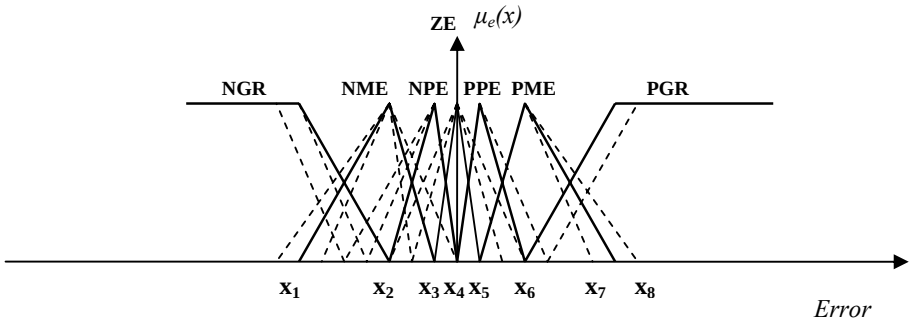



Figura 4.19 (a) Espacio de búsqueda X.

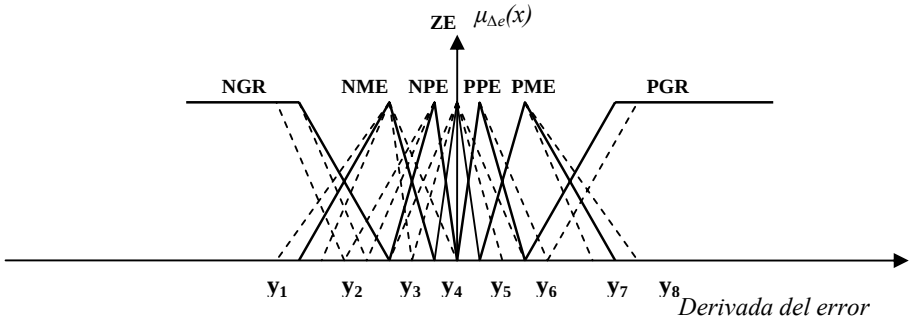



Figura 4.19 (b) Espacio de búsqueda X para la derivada del error.

El espacio de búsqueda es entonces definido como X con dimensiones de 8x8 en cada instante de búsqueda. Donde $X = x\Delta e_1^T * xe_1$, donde $xe = [x_1, x_2, \ldots x_8]$ $x\Delta e_1 = [y_1, y_2, \ldots y_8]^T$. Tomando como referencia la figura 2.6 acerca de la memoria a corto plazo en el capitulo 2.

En la *figura 4.20* se muestra el diagrama de flujo sobre aplicación de la búsqueda por tabú enfocada a las funciones de membresía.

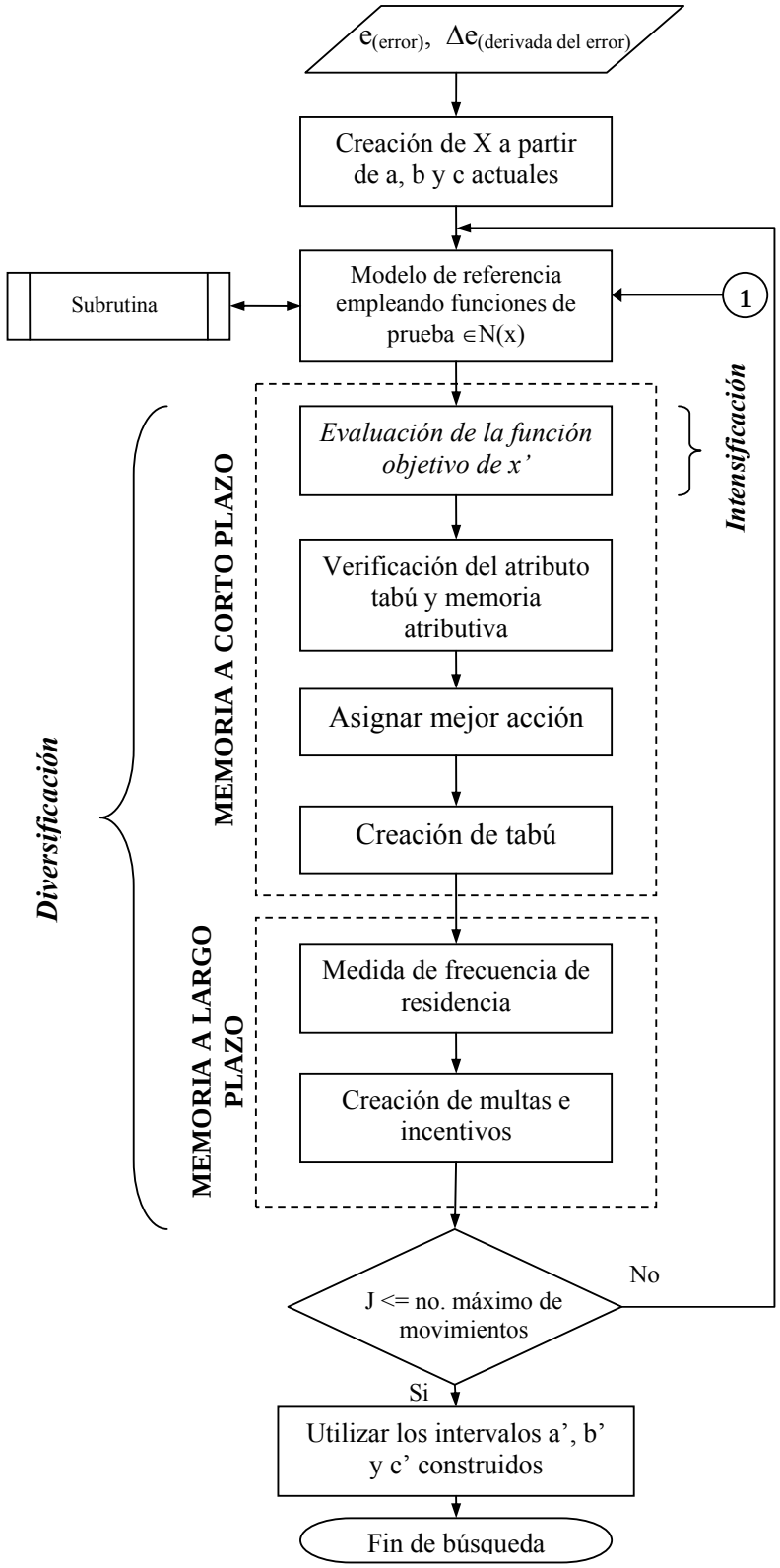



**Figura 4.20.** Diagrama de flujo empleando la búsqueda por tabú sobre la sintonización de las funciones de membresía.

El diagrama de bloques del control utilizando la búsqueda por tabú para la sintonización automática de las funciones de membresía queda como se muestra en la figura 4.21.

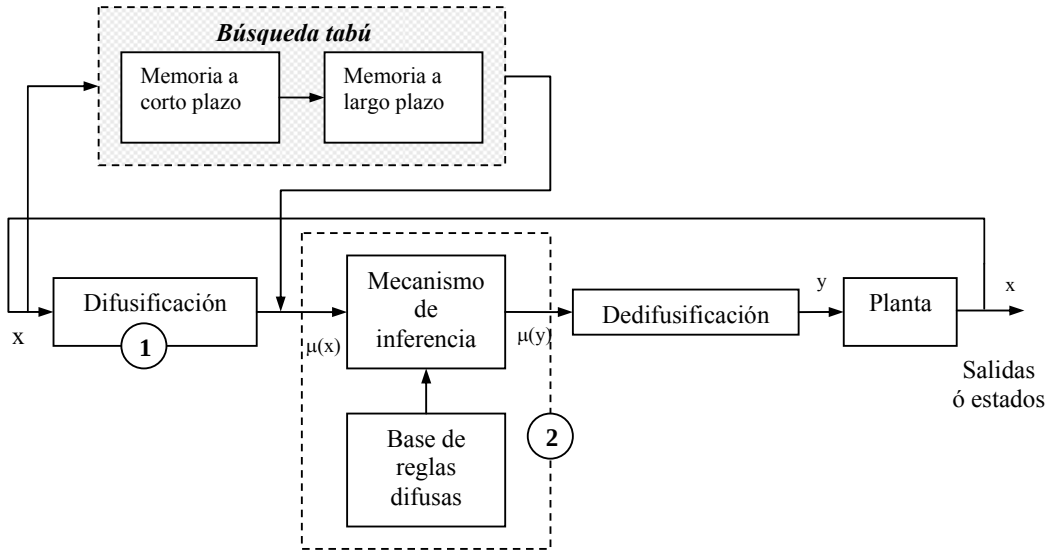



**Figura 4.21.** Arquitectura del controlador lógico difuso utilizando TS en la optimización de las funciones de membresía.

### *4.2.3 MEMORIA A CORTO PLAZO PARA LA SINTONIZACIÓN DE LAS FUNCIONES DE MEMBRESÍA.*

El método a corto plazo empleado por TS para la sintonización de la tabla de reglas se mantienen igual para la sintonización de funciones tal como se indica en el capitulo 2 en la figura 2.6.

El primer paso es:

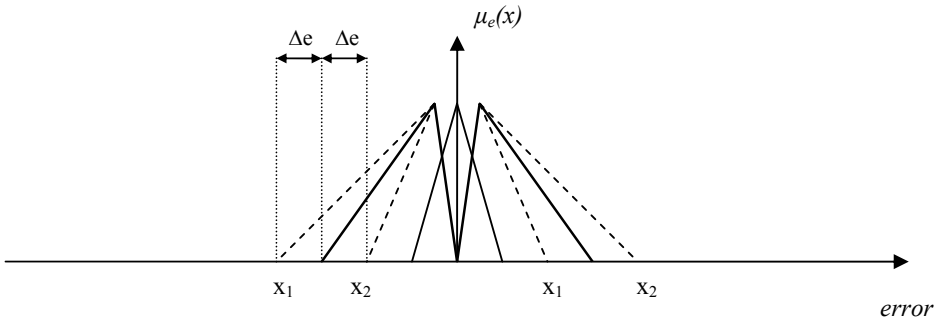
#### *4.2.3.1 EXAMINAR LISTA DE CANDIDATOS.*

| $x\Delta e_1$ \| $xe_1$ | $x_1$ | $x_2$ | $x_3$ | $x_4$ | $x_5$ | $x_6$ | $x_7$ | $x_8$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $y_1$ | *1* | *9* | *17* | *25* | *33* | *41* | *49* | *57* |
| $y_2$ | *2* | *10* | *18* | *26* | *34* | *42* | *50* | *58* |
| $y_3$ | *3* | *11* | *19* | *27* | *35* | *43* | *51* | *59* |
| $y_4$ | *4* | *12* | *20* | *28* | *36* | *44* | *52* | *60* |
| $y_5$ | *5* | *13* | *21* | *29* | ***37*** | *45* | *53* | *61* |
| $y_6$ | *6* | *14* | *22* | *30* | *38* | *46* | *54* | *62* |
| $y_7$ | *7* | *15* | *23* | *31* | *39* | *47* | *55* | *63* |
| $y_8$ | *8* | *16* | *24* | *32* | *40* | *48* | *56* | *64* |

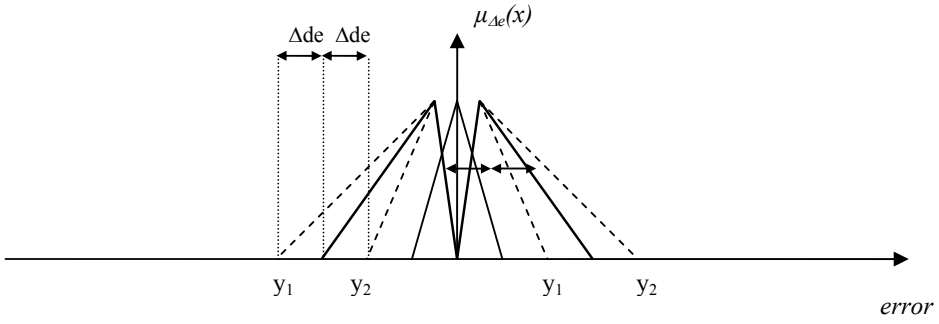
**Figura 4.22** Vecindario asociado N(x) compuesto por X∈ error y X ∈ derivada del error. Espacio de búsqueda X

Cada posición de la estructura X ya descrita es la posición que mantienen las funciones de membresía con respecto a la base de las funciones triangulares, por ejemplo el elemento 9 de la estructura X de la figura 4.22 representa las funciones de membresía para el error más acortadas en la base y para las funciones relacionadas a la derivada del

error representa las funciones triangulares más abiertas sobre la base; en la figura 4.23 se muestra como se mueve la medida de la base para las funciones de membresía.




4.23 (a) Modificación para la derivada del error.




4.23 (b). Modificación para la derivada del error.

**Figura 4.23.** Composición para el elemento $x_1$ y $x_2$ de las funciones de membresía.

Se muestra en la figura 4.23 (a) la línea continua es la solución x y la línea punteada es un elemento $x_n$' perteneciente a la vecindad modificada N(x) dentro de X, por lo tanto en la figura 4.20 en el bloque 1 antes de que el controlador difuso realice el bloque 2 se han realizado 8x8 simulaciones de la planta y el control difuso que corresponden a la iteración k retomando el ejemplo para la sintonización de la tabla de reglas, la solución actual en este caso se puede considerar como x propuesta en un valor intermedio en la tabla perteneciente a los valores propuestos en la estructura mencionada en la figura 4.22. La lista de candidatos es todo elemento descrito en la figura 4.22, en la iteración actual k en t = 3.5 segundos, donde x = elemento 37 y los elementos pertenecientes a N(x) son todos aquellos pertenecientes a la tabla de la figura 4.22 siendo los valores correspondientes a la función objetivo tal como se muestra en la figura 4.24.

| $x\Delta e_1$ \| $xe_1$ | fo($x_1$) | fo($x_2$) | fo($x_3$) | fo($x_4$) | fo($x_5$) | fo($x_6$) | fo($x_7$) | fo($x_8$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| fo($y_1$) | *0.0125* | *0.044* | *0.225* | *0.147* | *0.122* | *0.125* | *0.200* | *0.200* |
| fo($y_2$) | *0.0126* | *0.0011* | *0.125* | *0.122* | *0.147* | *0.125* | *0.14* | *0.2000* |
| fo($y_3$) | *0.126* | *0.2569* | *0.126* | *0.0122* | *0.126* | *0.144* | *0.14* | *0.200* |
| fo($y_4$) | *0.0132* | *0.369* | *0.124* | *0.369* | *0.176* | *0.144* | *0.1325* | *0.200* |
| fo($y_5$) | *0.1444* | *0.333* | *0.111* | *0.332* | ***0.144*** | *0.136* | *0.45* | *0.200* |
| fo($y_6$) | *0.1458* | *0.333* | *0.004* | *0.112* | *0.136* | *0.136* | *0.200* | *0.135* |
| Fo($y_7$) | *0.1586* | *0.478* | *0.336* | *0.112* | *0.136* | *0.144* | *0.200* | *0.135* |
| Fo($y_8$) | *0.2158* | *0.112* | *0.266* | *0.112* | *0.125* | *0.200* | *0.202* | *0.135* |

**Figura 4.24** Lista de candidatos.

Se observa que varios elementos pertenecientes a la lista de candidatos son posibles soluciones, en este caso el objetivo de TS es encontrar el número $x_{n,}$ de la lista de candidatos óptimo perteneciente a la combinación entre el error y la derivada del error que proporcione la sintonización adecuada para el control difuso sin alterar la tabla de reglas pero si los intervalos de la base de las funciones de membresía, recordando que cada número indica una combinación diferente de todos los intervalos de las funciones de membresía.

En el programa digital *(ver apéndice F)* se realiza un filtro que proporciona a TS un vector de nxn (donde n = 8) de tal forma que el número 1 indica el elemento que contiene el valor de la función objetivo más cercano a cero y el 64 el número más alejado a cero. La estructura que indica los valores de menor a mayor quedaría posiblemente en un tiempo t dado como se muestra en la figura 4.25.

| $x\Delta e_1$ \| $xe_1$ | $X_1$ | $x_2$ | $x_3$ | $x_4$ | $x_5$ | $x_6$ | $x_7$ | $x_8$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $y_1$ | *25* | *48* | *30* | *13* | *18* | *56* | *45* | *28* |
| $y_2$ | *36* | *49* | *24* | *12* | *17* | *29* | *44* | *42* |
| $y_3$ | *31* | *51* | *21* | *11* | *33* | *32* | *39* | *35* |
| $y_4$ | *3* | *50* | *20* | *8* | *53* | *34* | *57* | *38* |
| $y_5$ | *6* | *64* | *22* | *55* | *52* | *54* | *37* | ***37*** |
| $y_6$ | *10* | *44* | *19* | *2* | *61* | *24* | *43* | *26* |
| $y_7$ | *9* | *21* | *1* | *4* | *62* | *23* | *41* | *46* |
| $y_8$ | *14* | *15* | *7* | *5* | *63* | *16* | *40* | *27* |

**Figura 4.25.** Tabla resultante después de ordenar las funciones objetivo de mejor a peor.

Una vez enlistadas las funciones objetivo e identificadas con cual valor pertenecen, TS analiza si fueron visitadas dichas soluciones recientemente (*memoria explícita, figura 4.26*), por lo cual TS se auxiliará de la memoria explicita que contiene el mismo mapa descrito por 0 y 1 (descrito en 4.2.1) donde el 0 indica elemento no visitado y 1 elemento visitado, al igual que TS sobre la tabla de reglas evitamos realizar ciclos sobre elementos ya visitados, es importante mencionar que esta memoria retoma todas sus casillas a cero (0) después de finalizar un plazo corto o largo, la memoria explícita queda con valores de cero en todos sus elementos.

| $x\Delta e_1$ \| $xe_1$ | $x_1$ | $x_2$ | $x_3$ | $x_4$ | $x_5$ | $x_6$ | $x_7$ | $x_8$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $y_1$ | *0* | *0* | *0* | *0* | *0* | *1* | *0* | *0* |
| $y_2$ | *0* | *0* | *0* | *0* | *1* | *1* | *1* | *0* |
| $y_3$ | *0* | *1* | *0* | *0* | *0* | *0* | *0* | *0* |
| $y_4$ | *1* | *1* | *0* | *1* | *1* | *1* | *0* | *1* |
| $y_5$ | *1* | *1* | *1* | *1* | ***1*** | *1* | *0* | *0* |
| $y_6$ | *1* | *0* | *1* | *0* | *0* | *0* | *1* | *0* |
| $y_7$ | *0* | *0* | *1* | *0* | *0* | *1* | *0* | *0* |
| $y_8$ | *0* | *0* | *1* | *0* | *0* | *0* | *0* | *1* |

**Figura 4.26.** Memoria explícita.

### *4.2.3.2 VERIFICACIÓN DEL ESTADO DEL ATRIBUTO TABÚ, EVALUACIÓN DE TABÚ SIN CREAR MULTAS Y PRUEBA DE ASPIRACIÓN.*

La estructura de la memoria atributiva descrita en el capitulo 2 tiene las mismas dimensiones que la memoria explicita para este problema en particular, se considera el mismo intervalo de tiempo para un elemento eliminado y un elemento sumado establecido como teliminado = 0.24s y tsumado = 0.125s. La base tabú contiene también las mismas dimensiones debido a que cada elemento indica una dimensión diferente de los demás elementos, esta base se modificará debido a las características del problema en sí, denotando un mayor tiempo para un elemento ya sea para no ser visitado o ser eliminado como solución. Suponiendo un ejemplo para indicar el funcionamiento de la memoria explícita y atributiva e identificación del atributo tabú considerando una iteración k en un tiempo t = 3.5s, el elemento actual es el número 52 ($m(x_e, y_e)$), dicha solución esta denotada por $fo_{(52)} = 0.125$, a continuación se muestran las diferentes tablas utilizadas por TS para decidir cual elemento es la posible solución en la figura 4.27a.

| ***xΔe1*** / ***xe1*** | $fo(x_1)$ | $fo(x_2)$ | $fo(x_3)$ | $fo(x_4)$ | $fo(x_5)$ | $fo(x_6)$ | $fo(x_7)$ | $fo(x_8)$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $fo(y_1)$ | *0.01125* | *0.118* | *0.245* | *0.2667* | *0.278* | *0.310* | *0.3200* | *0.355* |
| $fo(y_2)$ | *0.01125* | *0.118* | *0.2456* | *0.2667* | *0.281* | *0.312* | *0.3200* | *0.355* |
| $fo(y_3)$ | *0.0113* | *0.148* | *0.2456* | *0.27* | *0.2820* | *0.312* | *0.3200* | *0.355* |
| $fo(y_4)$ | *0.0135* | *0.15* | *0.25* | *0.271* | *0.282* | *0.312* | *0.3200* | *0.355* |
| $fo(y_5)$ | *0.0135* | *0.15* | *0.255* | *0.271* | ***0.282*** | *0.312* | *0.3221* | *0.356* |
| $fo(y_6)$ | *0.116* | *0.15* | *0.255* | *0.272* | *0.282* | *0.312* | *0.3221* | *0.3567* |
| $fo(y_7)$ | *0.117* | *0.155* | *0.257* | *0.2722* | *0.2900* | *0.3145* | *0.3225* | *0.3800* |
| $fo(y_8)$ | *0.1175* | *0.244* | *0.266* | *0.278* | *0.2900* | *0.3145* | *0.34* | *0.3800* |

4.27 (a) Clasificación de las funciones objetivo

| ***de*** / ***e*** | $x_1$ | $x_2$ | $x_3$ | $x_4$ | $x_5$ | $x_6$ | $x_7$ | $x_8$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $y_1$ | *25* | *48* | *30* | *13* | *18* | *56* | *45* | *28* |
| $y_2$ | *36* | *49* | *24* | *12* | *17* | *29* | *44* | *42* |
| $y_3$ | *31* | *51* | *21* | *11* | *33* | *32* | *39* | *35* |
| $y_4$ | *3* | *50* | *20* | *8* | *53* | *34* | *57* | *38* |
| $y_5$ | *6* | *64* | *22* | *55* | ***52*** | *54* | *37* | *37* |
| $y_6$ | *10* | *44* | *19* | *2* | *61* | *24* | *43* | *26* |
| $y_7$ | *9* | *21* | *1* | *4* | *62* | *23* | *41* | *46* |
| $y_8$ | *14* | *15* | *7* | *5* | *63* | *16* | *40* | *27* |

4.27 (b) Posición de apuntadores del orden de la tabla de funciones

| ***de*** / ***e*** | $x_1$ | $x_2$ | $x_3$ | $x_4$ | $x_5$ | $x_6$ | $x_7$ | $x_8$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $y_1$ | *0* | *0* | *0* | *0* | *0* | *1* | *0* | *0* |
| $y_2$ | *0* | *0* | *0* | *0* | *1* | *1* | *1* | *0* |
| $y_3$ | *0* | *1* | *0* | *0* | *0* | *0* | *0* | *0* |
| $y_4$ | *1* | *1* | *0* | *1* | *1* | *1* | *0* | *1* |
| $y_5$ | *1* | *1* | *1* | *1* | ***1*** | *1* | *0* | *0* |
| $y_6$ | *1* | *0* | *1* | *0* | *0* | *0* | *1* | *0* |
| $y_7$ | *0* | *0* | *1* | *0* | *0* | *1* | *0* | *0* |
| $y_8$ | *0* | *0* | *1* | *0* | *0* | *0* | *0* | *1* |

4.27 (c) Memoria explícita.

| ***de*** \| ***e*** | $x_a$ | $x_b$ | $x_c$ | $x_d$ | $x_e$ | $x_f$ | $x_g$ | $x_h$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $y_a$ | *0* | *0* | *0* | *0* | *0* | *0* | *0* | *0* |
| $y_b$ | *0* | *0* | *0* | *0* | *3.100* | *0* | *0* | *0* |
| $y_c$ | *0* | *0* | *0* | *0* | *0* | *0* | *0* | *0* |
| $y_d$ | *1.254* | *1.800* | *0* | *2.58* | *3.00* | *0* | *0* | *0* |
| $y_e$ | *2.568* | *1.700* | *1.126* | *2.56* | ***3.400*** | *3.125* | *0* | *0* |
| $y_f$ | *3.566* | *0* | *1.400* | *0* | *0* | *0* | *0* | *0* |
| $y_g$ | *0* | *0* | *0* | *0* | *0* | *2.225* | *0* | *0* |
| $y_h$ | *0* | *0* | *0* | *0* | *0* | *0* | *0* | *0* |

4.27 (d) Memoria atributiva elemento sumado.

| ***de*** \| ***e*** | $x_a$ | $x_b$ | $x_c$ | $x_d$ | $x_e$ | $x_f$ | $x_g$ | $x_h$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $y_a$ | *3.8* | *0* | *0* | *0* | *0* | *0* | *0* | *0* |
| $y_b$ | *2.5* | *0* | *0* | *0* | *2.788* | *0* | *1.800* | *0* |
| $y_c$ | *2.21* | *0* | *0* | *0* | *0* | *0* | *0* | *0* |
| $y_d$ | *0* | *3.566* | *0* | *0* | *0* | *0* | *0* | *3.555* |
| $y_e$ | *2.220* | *4.566* | *5.255* | *1.24* | ***0*** | *3.444* | *0* | *0* |
| $y_f$ | *0* | *0* | *2.366* | *0* | *0* | *0* | *1* | *0* |
| $y_g$ | *0* | *0* | *3.2546* | *0* | *0* | *0* | *0* | *0* |
| $y_h$ | *0* | *0* | *2.44* | *0* | *0* | *0* | *0* | *2.745* |

4.27 (e) Memoria atributiva elemento Eliminado.

**Figura 4.27** Memorias y estructuras utilizadas por la memoria basada en lo reciente o de corto plazo.

Las estructuras mostradas en la figura 4.27 son el resultado debido a la búsqueda que TS realiza, estos elementos son: la historia de la búsqueda, la memoria atributiva y el orden de funciones; TS recomendaría por valor la función ubicada en la primer casilla de la tabla 4.27 (a), pero no es la única solución encontrada como buena existen varias más, pero si es la mejor solución candidata encontrada hasta el momento. Una vez que se ha identificado cuales soluciones son verdaderas candidatas TS verifica sus correspondientes atributos, en el ejemplo la solución actual tiene un tabú-sumado de 3.4 y t = 3.5 s, i. e. es posible incorporar cualquier solución como solución elite próxima a analizar por TS, la mejor solución fue la combinación número 25 pero no puede ser incorporada debido a que tiene un tabú-eliminado de 3.8 segundos, por lo tanto no puede ser la próxima solución, sin embargo TS reconoce que la combinación número 36 (ver figura 4.27 (b)) es entonces la siguiente combinación de intervalos para las funciones de membresía.

#### *4.2.3.3 SELECCIÓN DE LA ACTUALIZACIÓN Y EVALUACIÓN DE TABÚ CREANDO MULTAS.*

Ya que se han analizado las características de los elementos de la lista de candidatos (figura 4.24) y seleccionado el elemento que servirá para el siguiente análisis hecho por TS a través de la memoria a corto plazo, se etiqueta la posición de tal solución con un atributo tabú de la siguiente forma [3]: si la solución 25 tenia un valor en tabú sumado de 0s, y la solución sustituida número 52 de 3.4s, por lo tanto los nuevos valores serán para la solución 52 de 3.625s y para la no. 52 de 3.4s para los elementos correspondientes en la tabla de tabú-eliminado será para la solución no. 52 de 3.724s y para la número 36 de 2.5s, se han etiquetado ambas soluciones con una cierta cantidad de tiempo colocando un

tabú-activo a ambas, esto en base a la base tabú, la cual tiene en este problema la misma dimensión que la memoria explicita la cual es dinámica debido a los valores que proporcionen las multas e incentivos durante la memoria a largo plazo.

| ***de*** \| ***e*** | $x_a$ | $x_b$ | $x_c$ | $x_d$ | $x_e$ | $x_f$ | $x_g$ | $x_h$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $y_a$ | *0* | *0* | *0* | *0* | *0* | *0* | *0* | *0* |
| $y_b$ | *3.625* | *0* | *0* | *0* | *3.100* | *0* | *0* | *0* |
| $y_c$ | *0* | *0* | *0* | *0* | *0* | *0* | *0* | *0* |
| $y_d$ | *1.254* | *1.800* | *0* | *2.58* | *3.00* | *0* | *0* | *0* |
| $y_e$ | *2.568* | *1.700* | *1.126* | *2.56* | ***3.400*** | *3.125* | *0* | *0* |
| $y_f$ | *3.566* | *0* | *1.400* | *0* | *0* | *0* | *0* | *0* |
| $y_g$ | *0* | *0* | *0* | *0* | *0* | *2.225* | *0* | *0* |
| $y_h$ | *0* | *0* | *0* | *0* | *0* | *0* | *0* | *0* |

4.28 (a) Memoria atributiva elemento sumado.

| ***de*** \| ***e*** | $x_a$ | $x_b$ | $x_c$ | $x_d$ | $x_e$ | $x_f$ | $x_g$ | $x_h$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $y_a$ | *3.8* | *0* | *0* | *0* | *0* | *0* | *0* | *0* |
| $y_b$ | *2.5* | *0* | *0* | *0* | *2.788* | *0* | *1.800* | *0* |
| $y_c$ | *2.21* | *0* | *0* | *0* | *0* | *0* | *0* | *0* |
| $y_d$ | *0* | *3.566* | *0* | *0* | *0* | *0* | *0* | *3.555* |
| $y_e$ | *2.220* | *4.566* | *5.255* | *1.24* | ***3.724*** | *3.444* | *0* | *0* |
| $y_f$ | *0* | *0* | *2.366* | *0* | *0* | *0* | *1* | *0* |
| $y_g$ | *0* | *0* | *3.2546* | *0* | *0* | *0* | *0* | *0* |
| $y_h$ | *0* | *0* | *2.44* | *0* | *0* | *0* | *0* | *2.745* |

4.28 (b) Memoria atributiva elemento Eliminado.

**Figura 4.28.** Memorias resultantes después de una búsqueda donde iteración = k + 1.

### *4.2.3.4 VERIFICACIÓN DE TERMINACIÓN.*

En este punto TS sabe si se han hecho los suficientes movimientos, si es así TS se dirige al paso número 6, si no regresa al paso 1. El programa esta hecho de tal forma que la función simular() realiza los movimientos necesarios requeridos por TS, N*(x) es el vecindario resultante que nos permitirá evitar ciclos debido a que solo contienen aquellos elementos disponibles como candidatos a la iteración actual [3] [13] [27], tal como se muestra en la figura 4.29 (en base al ejemplo proporcionado):

| ***de*** \| ***e*** | $Fo(x_a)$ | $Fo(x_b)$ | $Fo(x_c)$ | $Fo(x_d)$ | $Fo(x_e)$ | $Fo(x_f)$ | $Fo(x_g)$ | $Fo(x_h)$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $Fo(y_a)$ | *0.01125* | *0.118* | *0.245* | *0.2667* | *0.278* | *0.310* | *0.3200* | *0.355* |
| $Fo(y_b)$ | *0.01125* | *0.118* | *0.2456* | *0.2667* | *0.281* | *0.312* | *0.3200* | *0.355* |
| $Fo(y_c)$ | *0.0113* | *0.148* | *0.2456* | *0.27* | *0.2820* | *0.312* | *0.3200* | *0.355* |
| $Fo(y_d)$ | *0.0135* | *0.15* | *0.25* | *0.271* | *0.282* | *0.312* | *0.3200* | *0.355* |
| $Fo(y_e)$ | *0.0135* | *0.15* | *0.255* | *0.271* | ***0.282*** | *0.312* | *0.3221* | *0.356* |
| $Fo(y_f)$ | *0.116* | *0.15* | *0.255* | *0.272* | *0.282* | *0.312* | *0.3221* | *0.3567* |
| $Fo(y_g)$ | *0.117* | *0.155* | *0.257* | *0.2722* | *0.2900* | *0.3145* | *0.3225* | *0.3800* |
| $Fo(y_h)$ | *0.1175* | *0.244* | *0.266* | *0.278* | *0.2900* | *0.3145* | *0.34* | *0.3800* |

4.29 (a) Vecindario N(x), donde cada valor es x' debida a un movimiento.

| ***de*** ***e*** | $Fo(x_a)$ | $Fo(x_b)$ | $Fo(x_c)$ | $Fo(x_d)$ | $Fo(x_e)$ | $Fo(x_f)$ | $Fo(x_g)$ | $Fo(x_h)$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $Fo(y_a)$ | ***0.01125*** | *0.118* | *0.245* | *0.2667* | *0.278* | *0.310* | *0.3200* | *0.355* |
| $Fo(y_b)$ | ***0.01125*** | *0.118* | *0.2456* | *0.2667* | *0.281* | *0.312* | *0.3200* | *0.355* |
| $Fo(y_c)$ | *0.0113* | *0.148* | *0.2456* | *0.27* | *0.2820* | *0.312* | *0.3200* | *0.355* |
| $Fo(y_d)$ | *0.0135* | *0.15* | ***0.25*** | *0.271* | *0.282* | *0.312* | *0.3200* | *0.355* |
| $Fo(y_e)$ | *0.0135* | ***0.15*** | *0.255* | *0.271* | ***0.282*** | *0.312* | *0.3221* | ***0.356*** |
| $Fo(y_f)$ | ***0.116*** | ***0.15*** | *0.255* | *0.272* | *0.282* | *0.312* | *0.3221* | *0.3567* |
| $Fo(y_g)$ | *0.117* | *0.155* | *0.257* | *0.2722* | *0.2900* | *0.3145* | *0.3225* | *0.3800* |
| $Fo(y_h)$ | *0.1175* | *0.244* | *0.266* | *0.278* | *0.2900* | *0.3145* | *0.34* | *0.3800* |

4.29 (b) Vecindario N*(x) = N(x)\T, construida por los elementos no sombreados.

**Figura 4.29** Vecindarios formados durante la búsqueda.

### *4.2.3.5 EJECUTAR EL MOVIMIENTO.*

Una vez seleccionado el tipo de criterio a utilizar TS respetará todos los elementos mencionados o no, el ejemplo proporcionado es en base al criterio de baja influencia, si es utilizado un criterio de alta influencia TS solo respetara la memoria explicita (historia de la búsqueda) y la calidad de la solución candidato.

## *4.3 MEMORIA A LARGO PLAZO.*

La memoria a largo plazo es utilizada en este trabajo para reforzar la historia de las soluciones propuestas por TS en ambos casos sobre las funciones de membresía y la tabla de reglas lingüísticas [3] [13]. De igual forma se comienza con la explicación de la función de la memoria a largo plazo enfocada a la optimización de la tabla de reglas lingüísticas.

Los elementos que forman a la memoria a largo plazo en este trabajo son:

- Memoria de frecuencia.
- Multas e incentivos.
- Diversificación.
- Intensificación.

### *4.3.1 MEMORIA BASADA EN LA FRECUENCIA.*

La memoria enfocada al control difuso tiene un intervalo de recuerdo de 60 iteraciones o 0.24 segundos, esta puede variar según el problema. La memoria de frecuencia es una memoria que va muy ligada al trabajo realizado por la memoria a corto plazo, principalmente cuando el criterio elegido es en base a la calidad de la trayectoria del movimiento; la memoria de frecuencia registra el número de veces que un elemento de la lista de candidatos forma parte de la solución elite; este concepto aplica de manera muy semejante tanto para la optimización de la tabla como de las funciones de membresía.

La estructura de la memoria de basada en la frecuencia es de la siguiente forma y con las dimensiones de 7x7 como se muestra en la figura 4.30 a y b.

| $\Delta e$ \ $e$ | NGR | NME | NPE | ZE | PPE | PME | PGR |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **NME** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **NPE** | 0 | 0 | *0* | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **ZE** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **PPE** | 0 | 0 | 0 | *0* | 0 | 0 | 0 |
| **PME** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **PGR** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

4.30 (a) Memoria de frecuencia cuando t = 1 segundo.

| $\Delta e$ \ $e$ | NGR | NME | NPE | ZE | PPE | PME | PGR |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | 0 | 4 | 0 | 1 | 1 | 7 | 0 |
| **NME** | 10 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 15 |
| **NPE** | 0 | 3 | *0* | 0 | 4 | 2 | 0 |
| **ZE** | 2 | 0 | 1 | 5 | 0 | 22 | 0 |
| **PPE** | 0 | 4 | 1 | *5* | 15 | 0 | 13 |
| **PME** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 |
| **PGR** | 1 | 1 | 1 | 11 | 0 | 0 | 10 |

4.30 (b) Memoria de frecuencia cuando t = 10 segundos, Ejemplos ilustrativos, los resultados indican el comportamiento real de la simulación, ver capitulo5.

**Figura 4.30** Memoria de frecuencia en t = 0 segundos y t = 10 segundos.

El tamaño de la memoria de frecuencia esta normalizado por la dimensión de la tabla de reglas elegida. En la figura se puede notar como los elementos de las orillas son aquellos que más participaciones tienen, evitando que el elemento del centro sea removido, la razón principal es porque forma el centro de nuestro universo, el origen de la trayectoria realizada por el control difuso.

En el caso de la memoria basada en la frecuencia enfocada a la optimización de funciones de membresía la estructura es similar, en cambio la dimensión es diferente pero esta toma solo una. A continuación se muestra en la figura 4.31 la forma característica de la memoria de frecuencia utilizada en la optimización de funciones de membresía.

| ***de*** \ ***e*** | $x_a$ | $x_b$ | $x_c$ | $x_d$ | $x_e$ | $x_f$ | $x_g$ | $x_h$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $y_a$ | *0* | *0* | *0* | *0* | *0* | *0* | *0* | *0* |
| $y_b$ | *0* | *0* | *0* | *0* | *0* | *0* | *0* | *0* |
| $y_c$ | *0* | *0* | *0* | *0* | *0* | *0* | *0* | *0* |
| $y_d$ | *0* | *0* | *0* | *0* | *0* | *0* | *0* | *0* |
| $y_e$ | *0* | *0* | *0* | *0* | 0 | 0 | *0* | *0* |
| $y_f$ | *0* | *0* | *0* | *0* | *0* | *0* | *0* | *0* |
| $y_g$ | *0* | *0* | *0* | *0* | *0* | *0* | *0* | *0* |
| $y_h$ | *0* | *0* | *0* | *0* | *0* | *0* | *0* | *0* |

Figura 4.31 (a) Memoria de frecuencia cuando t = 1 segundo

| ***de*** ***e*** | $x_a$ | $x_b$ | $x_c$ | $x_d$ | $x_e$ | $x_f$ | $x_g$ | $x_h$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $y_a$ | *22* | *9* | *1* | *10* | *10* | *0* | *1* | *0* |
| $y_b$ | *22* | *13* | *17* | *8* | *11* | *3* | *1* | *0* |
| $y_c$ | *26* | *15* | *17* | *5* | *18* | *5* | *3* | *0* |
| $y_d$ | *24* | *19* | *11* | *6* | *16* | *3* | *3* | *0* |
| $y_e$ | *20* | *19* | *14* | *3* | 15 | 3 | *0* | *4* |
| $y_f$ | *20* | *15* | *17* | *4* | *11* | *0* | *1* | *1* |
| $y_g$ | *20* | *11* | *18* | *8* | *3* | *1* | *0* | *0* |
| $y_h$ | *20* | *10* | *10* | *8* | *2* | *2* | *1* | *0* |

Figura 4.31 (b) Memoria de frecuencia cuando t = 10 segundos, Ejemplos ilustrativos, los resultados indican el comportamiento real de la simulación, ver capitulo5.

**Figura 4.31.** Estructura de la memoria de frecuencia.

### *4.3.2 INTENSIFICACIÓN.*

El proceso de intensificación se asocia con el registro de las diferentes soluciones élite analizadas en cada búsqueda, este método sugiere analizar cada una de las soluciones elite encontradas y permite fortalecer la decisión de cual es la mejor como el óptimo global o punto cercano al óptimo global [3] [7] [14] [16] [20], la forma de trabajar la intensificación depende en gran medida del espacio de búsqueda; en este problema en particular para ambos casos la intensificación se cumple al final de cada simulación porque la solución encontrada es la optimizada en base a las diferentes soluciones elite, el criterio de intensificación utilizado aquí es en base a la figura 2 mostrada en el capitulo 2, la intensificación permite visitar zonas que incluso no se han visitado y tratar principalmente de verificar el comportamiento de los candidatos en las diferentes zonas de la tabla de reglas lingüísticas [3], la intensificación se forma a partir de lograr visitar todas las vecindades posibles durante la construcción de la solución elite final a través de aquellas que fueron construidas durante cada búsqueda. En el caso de TS enfocada a la tabla de reglas lingüísticas en cada periodo de largo plazo se analiza el comportamiento de posibles soluciones elite en base a realizar movimientos sobre la tabla de reglas, la final es lograda en gran medida porque se pudo visitar a la mayor cantidad de elementos candidatos en cada construcción, el tamaño de N(x) es pequeño y ayuda a facilitar la aplicación de TS, la intensificación trabaja también en el intervalo de corto plazo debido a que mantiene su comportamiento durante la aplicación de ambas memorias: largo y corto plazo. Para el caso de TS enfocada a funciones de membresía el espacio de búsqueda es mas grande aquí la intensificación esta realizada en cada búsqueda debido a que todas las combinaciones de intervalos para las funciones son posibles soluciones elites futuras, la intensificación se cumple cuando se visitan a todas aquellas durante el ordenamiento del valor de la función objetivo.

### *4.3.3 DIVERSIFICACIÓN.*

La diferencia básica entre la intensificación y diversificación radica en los siguientes conceptos: exploración/explotación [3] [7] [14] [20], la intensificación trabaja principalmente con la explotación de la memoria a corto y largo plazo (solo en este trabajo) y la explotación de la búsqueda, la diversificación trabaja con la exploración de la mayor cantidad de zonas posibles a visitar logrando trabajar nuevas rutas de solución, el comportamiento de mejora en la construcción elite permite visitar todas aquellas zonas

ubicadas tanto en la estructura de N*(x) formada en ambas casos de optimización como los elementos que están disponibles a ocupar un lugar en la solución elite, la diversificación cumple en la optimización enfocada sobre la tabla de reglas lingüísticas debido a que las zonas visitadas fueron casi por toda la tabla de reglas evitando ciclos no necesarios de búsqueda, en el caso de las funciones de membresía la función filtro_funciones() organiza todas las combinaciones posibles contenidas en X y reconoce cual es la mejor y la peor opción como solución candidato.

### *4.3.4 MULTAS E INCENTIVOS.*

Las multas y los incentivos son medidas que fortalecen las reglas de elección de los candidatos para poder pertenecer a la solución elite estableciendo el criterio citado en el capitulo 2, las multas e incentivos se forman a partir de dos medidas:

1) Numeradores
2) Denominadores.

Los numeradores ocupados para TS enfocada a la tabla de reglas lingüísticas y enfocada a las funciones de membresía representa en ambas búsquedas el número de veces que una solución (acción lingüística o combinación de intervalos) ha pertenecido a la solución elite.

El concepto de denominador utilizado en TS enfocada a la tabla de reglas lingüísticas es el máximo de de los numeradores y para el caso de TS enfocada a las funciones de membresía se utiliza el promedio de los numeradores.

El significado de los numeradores y los denominadores se enfoca en los siguientes significados:

***Tabú-eleminado:*** Es el periodo de tiempo etiquetado a un elemento que abandona la solución de prueba debido a la incorporación de un candidato en la posición del elemento eliminado y es el periodo de tiempo que dicho elemento no podrá entrar a la solución elite, este concepto se aplica en ambas optimizaciones.

**Tabú-sumado:** Es el periodo de tiempo que un elemento no podrá dejar la solución de prueba.

Las multas y los incentivos modifican la base tabú en base a relaciones con el objetivo de fortalecer la construcción de una solución elite. Un elemento que nunca ha ingresado a la solución elite se le incentiva para poder ingresar, fortaleciendo procesos como la intensificación y la diversificación, o se puede multar a un elemento que ha ingresado muchas veces a la solución elite para no abandonarla. En cuestión de multas para elementos eliminados se multa a un elemento con una cantidad mas grande de tiempo en base a la modificación de la base tabú para no pertenecer a la solución elite debido a la mala calidad de esa solución que propone ese elemento, en el caso de la tabla de reglas se refiere a las acciones lingüísticas y en el caso de las funciones de membresía a las combinaciones pertenecientes al vecindario asociado.

La base tabú inicial establecida para TS enfocada sobre una tabla de reglas lingüísticas de 7x7 es como se muestra en la figura 4.32a y b:

| BG | BM | BP | CE | AP | AM | AG |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.125 | 0.125 | 0.125 | 0.125 | 0.125 | 0.125 | 0.125 |

4.32 (a) Base tabú: elemento sumado

| BG | BM | BP | CE | AP | AM | AG |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.24 | 0.24 | 0.24 | 0.24 | 0.24 | 0.24 | 0.24 |

4.32 (b) Base tabú: elemento eliminado

**Figura 4.32** Base Tabú para elementos eliminados y sumados.

Por lo tanto existe un numerador para cada acción:

Numerador-BG
Numerador-BM
Numerador-BP
Numerador-CE
Numerador-AP
Numerador-AM
Numerador-AG

- Denominador ocupado en TS enfocada a la tabla de reglas lingüísticas:

***Denominador = max[numAG,numAM,numAP,numCE,numBP,numBM,numBG]***

Si se considera de nuevo la siguiente tabla de la figura 4.33b:

| $\Delta e$ \| $e$ | NGR | NME | NPE | ZE | PPE | PME | PGR |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | 0 | 4 | 0 | 1 | 1 | 7 | 0 |
| **NME** | 10 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 15 |
| **NPE** | 0 | 3 | *0* | 0 | 4 | 2 | 0 |
| **ZE** | 2 | 0 | 1 | 5 | 0 | 22 | 0 |
| **PPE** | 0 | 4 | 1 | *5* | 15 | 0 | 13 |
| **PME** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 |
| **PGR** | 1 | 1 | 1 | 11 | 0 | 0 | 10 |

**Figura 4.33** Tabla de reglas lingüísticas.

TS percibe que para la acción AG, ha pertenecido a la solución elite en diferentes posiciones, por lo tanto el numerador para AG es la suma de todas las ocurrencias de residencia de AG en toda la tabla, esto pasará con el resto de los elementos contenidos en la base tabú, por lo tanto existe una estructura final posible con los siguientes valores supuestos en la figura 4.34 (a) y (b):

| BG | BM | BP | CE | AP | AM | AG |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 10 | 15 | 12 | 5 | 9 | 3 | 17 |

4.34 (a) Base de numeradores de los elementos sumados

| BG | BM | BP | CE | AP | AM | AG |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 10 | 12 | 5 | 7 | 15 | 21 | 3 |

4.34 (b). Base de los numeradores para los elementos eliminados

**Figura 4.34.** Base de los numeradores para los elementos eliminados-sumados

***Nota:*** *Los valores presentados son referidos a la posición actual, la memoria de frecuencia es borrada cada lapso de largo plazo y corto plazo juntos, sabiendo que la base de numeradores guarda los valores de interés.* Con respecto a los denominadores existirá solo un denominador por cada tabla, la relación que rige estos valores están definidos por las siguientes relaciones:

Multas para elementos sumados:

***Tabú-sumado = tabú-sumado + Numerador/denominador***

Para los incentivos tenemos que:

***Tabú-sumado = tabú-sumado - Numerador/denominador***

Para los elementos eliminados tenemos que las multas se obtienen a partir de:

***Tabú-eliminado = tabú-eliminado + Numerador/denominador***

Para los incentivos:

***Tabú-eliminado = tabú-eliminado + Numerador/denominador***

Estas relaciones se aplican en forma individual para cada elemento de la base tabú. Con respecto a la base tabú utilizada en TS enfocada a la optimización de las funciones de membresía la base tabú tiene la estructura de la figura 4.35 (b) y (c):

| ***de*** \| ***e*** | $x_a$ | $x_b$ | $x_c$ | $x_d$ | $x_e$ | $x_f$ | $x_g$ | $x_h$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $y_a$ | *0.125* | *0.125* | *0.125* | *0.125* | *0.125* | *0.125* | *0.125* | *0.125* |
| $y_b$ | *0.125* | *0.125* | *0.125* | *0.125* | *0.125* | *0.125* | *0.125* | *0.125* |
| $y_c$ | *0.125* | *0.125* | *0.125* | *0.125* | *0.125* | *0.125* | *0.125* | *0.125* |
| $y_d$ | *0.125* | *0.125* | *0.125* | *0.125* | *0.125* | *0.125* | *0.125* | *0.125* |
| $y_e$ | *0.125* | *0.125* | *0.125* | *0.125* | *0.125* | *0.125* | *0.125* | *0.125* |
| $y_f$ | *0.125* | *0.125* | *0.125* | *0.125* | *0.125* | *0.125* | *0.125* | *0.125* |
| $y_g$ | *0.125* | *0.125* | *0.1 25* | *0.125* | *0.125* | *0.125* | *0.125* | *0.125* |
| $y_h$ | *0.125* | *0.125* | *0.125* | *0.125* | *0.125* | *0.125* | *0.125* | *0.125* |

*4.35 (a) Base tabú elemento sumado.*

| ***de*** \| ***e*** | $x_a$ | $x_b$ | $x_c$ | $x_d$ | $x_e$ | $x_f$ | $x_g$ | $x_h$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $y_a$ | *1* | *1* | *1* | *1* | *1* | *1* | *1* | *1* |
| $y_b$ | *1* | *1* | *1* | *1* | *1* | *1* | *1* | *1* |
| $y_c$ | *1* | *1* | *1* | *1* | *1* | *1* | *1* | *1* |
| $y_d$ | *1* | *1* | *1* | *1* | *1* | *1* | *1* | *1* |
| $y_e$ | *1* | *1* | *1* | *1* | *1* | *1* | *1* | *1* |
| $y_f$ | *1* | *1* | *1* | *1* | *1* | *1* | *1* | *1* |
| $y_g$ | *1* | *1* | *1* | *1* | *1* | *1* | *1* | *1* |
| $y_h$ | *1* | *1* | *1* | *1* | *1* | *1* | *1* | *1* |

*4.35 (b) Base tabú elemento eliminado.*

**Figura 4.35.** Base tabú.

La base tabú compuesta por las tablas mostradas en la figura 4.34 son valores dinámicos que se rigen en base a los valores también proporcionados por las multas e incentivos que rigen las siguientes relaciones:

Multas para elementos sumados:

$$\textit{Tabú-sumado}(x_n, y_m) = \textit{tabú-sumado}(x_n, y_m) + \textit{Numerador}(x_n, y_m)/\textit{denominador}$$

Para los incentivos tenemos que:

$$\textit{Tabú-sumado}(x_n, y_m) = \textit{tabú-sumado}(x_n, y_m) - \textit{Numerado}(x_n, y_m)r/\textit{denominador}$$

Para los elementos eliminados tenemos que las multas se obtienen a partir de:

$$\textit{Tabú-eliminado}(x_n, y_m) = \textit{tabú-eliminado}(x_n, y_m) + \textit{Numerador}(x_n, y_m)/\textit{denominador}$$

Para los incentivos:

$$\textit{Tabú-eliminado}(x_n, y_m) = \textit{tabú-eliminado}(x_n, y_m) + \textit{Numerador}(x_n, y_m)/\textit{denominador}$$

Donde el denominador es

$$\textbf{Denominador}_{(sumado)} = [\ \textstyle\sum \textbf{numerador}(x_n, y_m)\ ]/64$$

$$\textbf{Denominador}_{(eliminado)} = [\ \textstyle\sum \textbf{numerador}(x_n, y_m)\ ]/64$$

## *4.4 ALGORITMOS GENÉTICOS CON LÓGICA DIFUSA.*

La aplicación de los algoritmos genéticos en este trabajo se extiende solo a la optimización de los intervalos de la base en las funciones de membresía, el tipo de algoritmo planteado en este trabajo es un algoritmo genético simple compuesto de sus operadores esenciales. Un AGS (algoritmo genético simple) puede ser empleado en los tres elementos susceptibles a sintonizar indicados al comienzo de este capitulo GA es una técnica de optimización simple de programar y con alta potencialidad en la solución de problemas de optimización. La representación utilizada en este trabajo es enfocada sobre una representación binaria (0 y 1). La diferencia entre AG y TS radica en que AG trabaja sobre la selección de subconjuntos (comúnmente parejas) de soluciones de una población llamada padres y los combina para producir nuevas soluciones llamadas hijos que están basadas sobre la noción genética de cruzamiento, la cual en la forma clásica consiste de intercambio de valores de soluciones de variables particulares (material genético).

Las soluciones producidas (hijos) pueden sufrir mutaciones, AG resalta aquellas soluciones con mejores características y que pasan una prueba de sobre vivencia. La sintonización de las funciones de membresía para el controlador difuso a través de los algoritmos genéticos se plantea en este trabajo sobre las variables a, b y c, tal como se muestra en la figura 4.36 (a).

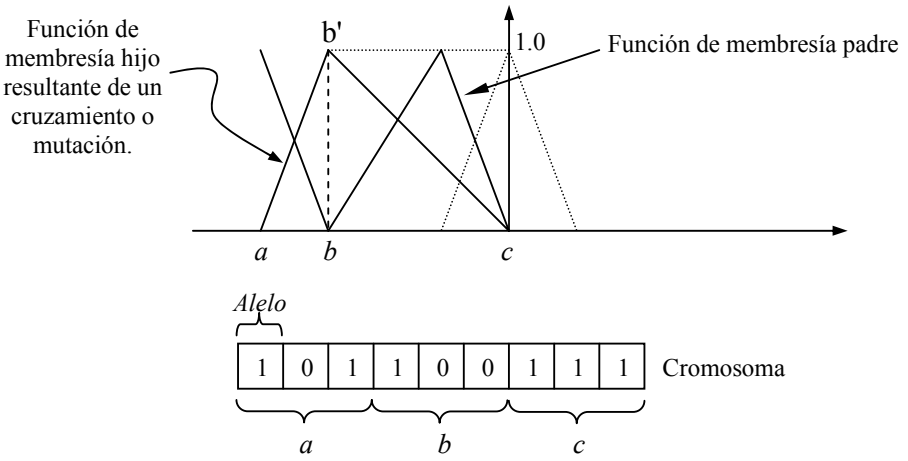



Figura 4.36 (a) Cromosoma del individuo $C_i$

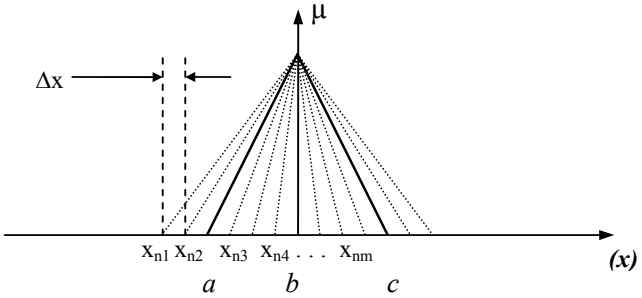


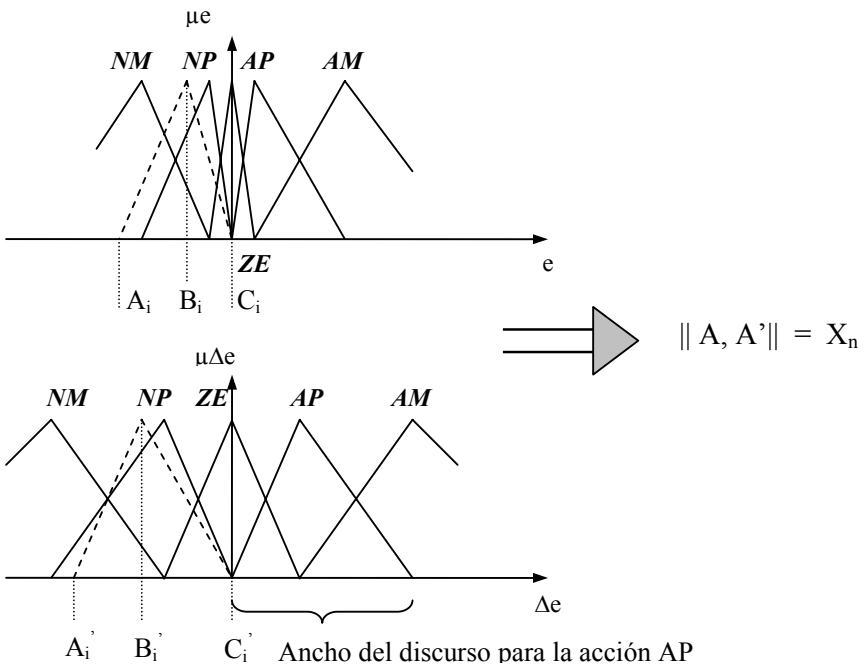

Figura 4.36 (b) Espacio de búsqueda

***Figura 4.36*** Genotipo.

Como se muestra en la figura 4.36 (a) las variables susceptibles a sintonizar pero no las únicas son las variables a, b y c donde concatenadas forman el individuo Ci y se utiliza un espacio de búsqueda para AG de 8 intervalos en cada búsqueda de AG; entonces la distancia que existe entre $x_{n1}$ y $x_{n2}$ es $\Delta x$, siendo entonces $\Delta x$ el incremento sobre cada región del discurso o espacio de búsqueda.

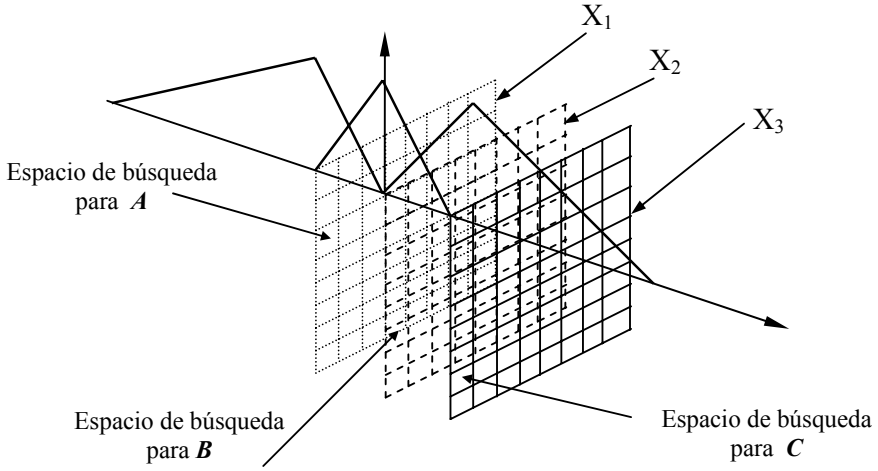
Normalizando el espacio de búsqueda para el universo de discusión del error y de la derivada del error se puede formar un espacio de 64 elementos donde $x_{n1}$ propuesto por AG en el espacio de búsqueda para e(k) relaciona una $x_{n1}$' para el discurso de la derivada del error *de(k)*.

La notación empleada aquí es de tipo binaria; entonces cada número binario representa una posición en el discurso para el error y para la derivada del error. Normalizado el espacio de búsqueda queda como se muestra en la figura 4.37 (a) y (b).




4.37 (a). Escalamiento del universo de discusión para el error y para la derivada del error.

Por lo tanto el espacio $X_n$ queda definido como se presenta en la figura 4.30 (b).




4.37 (b). Base del espacio de búsqueda Y.

**Figura 4.37** Campo de búsqueda para los algoritmos genéticos.

La función Y queda definida $\forall\ x_i \in X_i$ donde xi y xi' $\subseteq$ A, B, C y A', B' y C' consecutivamente. Entonces el número de particiones del universo de discusión quedan definidas por Y para la derivada del error y el error permitiendo ajustar las funciones de membresía en una sola iteración de muestreo de los AG (ver apéndice F).

$$\text{Sí Y es } Y = \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \\ X_3 \\ . \\ . \\ X_n \end{pmatrix} \qquad \therefore X_1 = \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_5 \ldots & x_n \\ x_2 & . & & & & \\ x_3 & . & x_{33} & & & \\ . & & & . & & \\ . & & & & . & \\ . & . & & & x_{n-1m-1} & \\ x_{1m} & x_{2m} & x_{3m} & . \ . \ . \ . & & x_{nm} \end{pmatrix}$$

$$\text{Donde } A = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ . \\ . \\ . \\ x_m \end{pmatrix} \qquad \text{y} \quad A'^{T} = \begin{pmatrix} x_1' \\ x_2' \\ . \\ . \\ . \\ x_m' \end{pmatrix}$$

Por lo tanto A y $A'^{T}$ forman la base del espacio $X_i$ de búsqueda para los algoritmos genéticos cumpliendo con la característica de que los elementos para $A'^{T}$ sean linealmente independientes.

$$\sum_{i=0}^{n} \alpha_i x_i' \quad \text{ó cualquier } x_i \in X \text{ y } x_i \neq 0$$

Por lo tanto los algoritmos genéticos tienen un espacio de búsqueda considerable y se puede trabajar con las soluciones $x_i$ y $x_i$' como un solo conjunto de funciones a partir de las soluciones actuales correspondientes a las variables a, b y c $\in$ e(k) y de(k). Un cromosoma para este trabajo queda definido por la unión de $x_{1i}$, $x_{2i}$ y $x_{3i}$ como se muestra en la figura 4.38

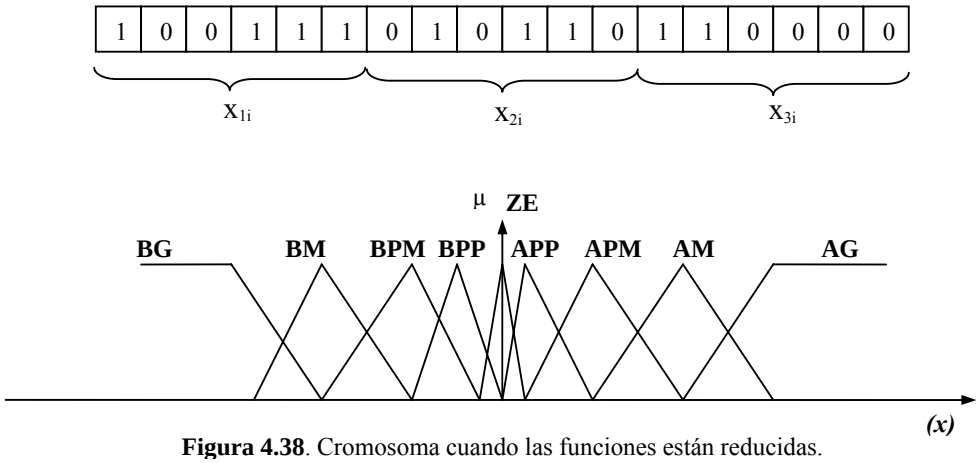



**Figura 4.38**. Cromosoma cuando las funciones están reducidas.

Por lo tanto para cada variable a sintonizar (a, b y c) se tienen 64 elementos y la concatenación de las variables $x_{1i}$, $x_{2i}$ y $x_{3i}$ producen un espacio de 64 x 3 quedando n soluciones producidas por AG en cada muestreo. En la figura 4.34 se presenta las distintas

medidas de las funciones de membresía correspondientes a diferentes elementos sobre el campo Y.

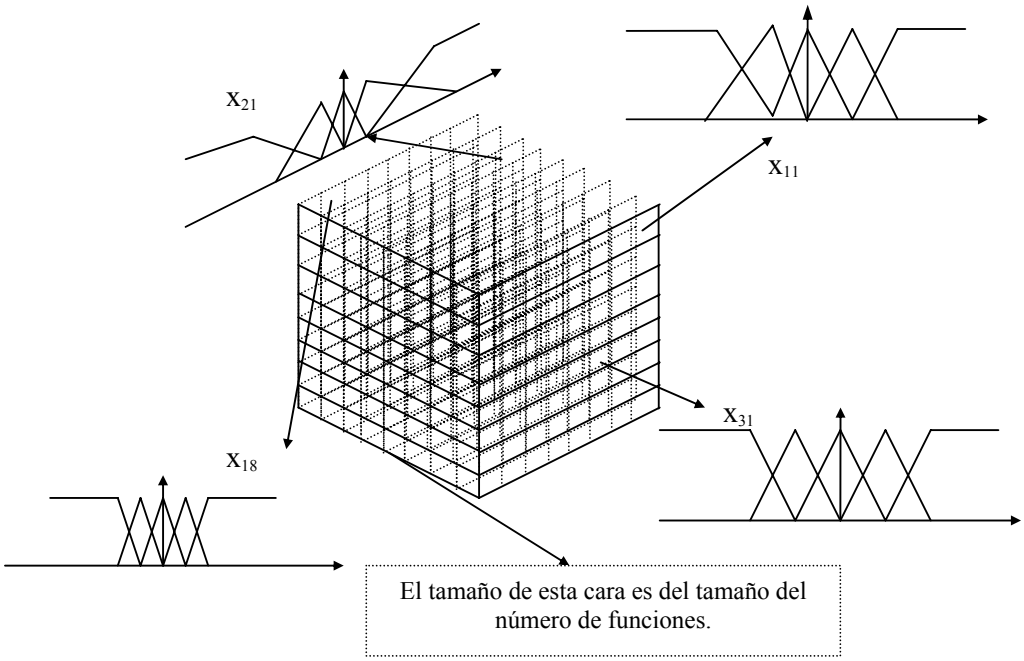



**Figura 4.39**. Espacio de búsqueda Y.

El cubo mostrado en la figura 4.39 es la población Y de n individuos que se crea en cada iteración de muestreo y el espacio de búsqueda que se forma para cada variable a sintonizar a, b y c. La función aptitud de cada individuo se plantea tal como se utiliza en el ISE (k) [7] para un controlador robusto de la siguiente forma:

Función aptitud = $1 - \alpha * error + \beta * derivada\ del\ error.$

La expresión de la función objetivo convierte el problema de optimización de la función objetivo en un problema de maximización de la función pero cumpliendo el papel de un índice de funcionamiento (ISE) [7].

La cara frontal del cubo de la figura 4.39 representa la posición que mantiene cada vértice inferior de las funciones triangulares y que es generado para cada iteración de prueba para los algoritmos genéticos. El objetivo de los algoritmos genéticos para este problema en particular es minibar lo más posible la función aptitud o función objetivo que permite encontrar la población final adecuada; Por lo tanto la cara derecha lateral derecha representa el espacio generado por A y A' para distinguir las opciones que puede tener los algoritmos genéticos durante la simulación del generador síncrono. La implementación de un algoritmo genético simple sobre la lógica difusa en las funciones de membresía queda como se muestra en la figura 4.40.

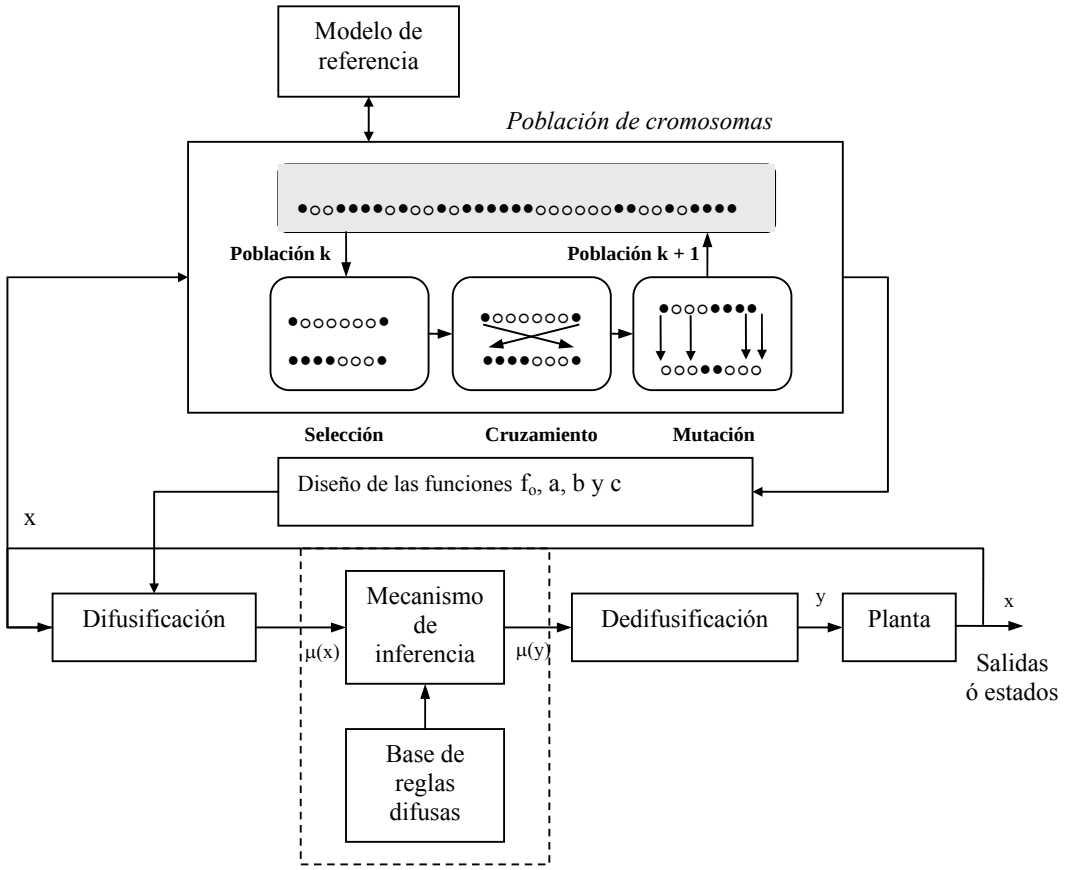
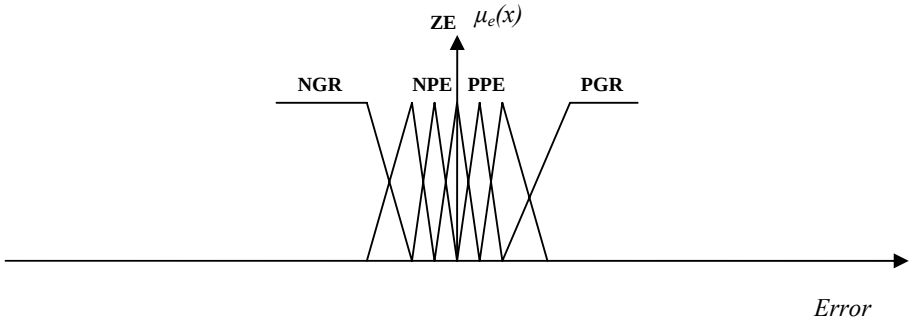
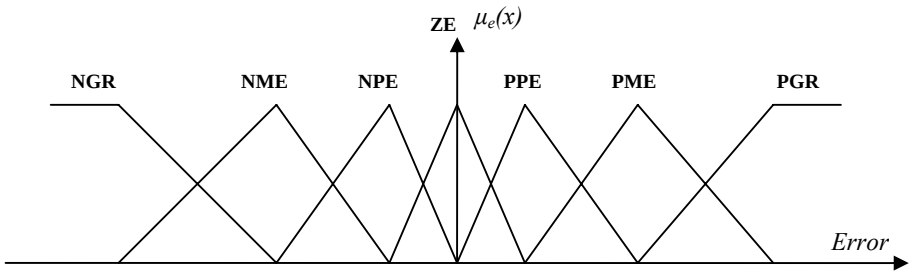



**Figura 4.40.** Arquitectura del controlador lógico difuso utilizando AG en la optimización de las funciones de membresía.

Cuando se estableció TS sobre la sintonización de las funciones de membresía X tenía las dimensiones de 8x8; donde las dimensiones de la base de las funciones triangulares estaban delimitadas por un valor $m_{inicial}$ y $m_{final}$ como se muestra en la figura 4.36 entonces X era todo el espacio intermedio entre $m_{inicial}$ y $m_{final}$ y TS podía recordar las características de cada elemento visitado; en esta ocasión no existe un $m_{inicial}$ y un $m_{final}$ la característica que se conserva es que en cada iteración de búsqueda AG utiliza la estructura X para plantear 64 posibles soluciones las cuales son representadas por el cromosoma compuesto de los individuos de una generación g dentro de una población $po_n$.




4.41 (a**)** Espacio de búsqueda A. Intervalos de las funciones de membresía pertenecientes al elemento 1 de la figura 4.21 donde las funciones de membresía presentan el intervalo inicial ($m_{inicial}$)más reducido propuesto por TS para el error.




4.41 (b) Espacio de búsqueda A'. Intervalos de las funciones de membresía pertenecientes al elemento 1 de la figura 4.21 donde las funciones de membresía presentan el intervalo final ($m_{final}$) más amplio propuesto por TS para el error.

**Figura 4.41** Espacio generado X.

El comportamiento (fitness) promedio $F_m$ de una población se calcula como se muestra en la siguiente expresión:

$$F_m = \frac{\sum_{i=1}^{n} F(c_i)}{\mu} \qquad 4.1$$

- Donde μ es el tamaño de la población.

El comportamiento relativo de un individuo ci es calculado por la siguiente expresión:

$$P_i = \frac{F(c_i)}{\sum_{i=1}^{n} F(c_i)} \qquad 4.2$$

Las dos expresiones arriba mencionadas son utilizadas en la etapa de selección, permitiendo decidir en esta etapa cual o cuales son los individuos más aptos de una generación. El tipo de selección planteada en este trabajo es del tipo rueda ruleta que es del tipo no elitista permitiendo seleccionar a los individuos más aptos tener una proporción mayor en la ruleta; cuando esta ruleta sea girada tendrán mas probabilidad de ser los individuos seleccionados para pertenecer en la etapa de cruzamiento.

Existen diferentes métodos de selección, la selección es una etapa muy importante en el desarrollo de un algoritmo genético existen diversas formas de selección y el utilizar un tipo de otro depende de la experiencia del diseñador y del problema en particular.

En la figura 4.42 se muestra el diagrama de flujo durante la aplicación de los algoritmos genéticos.

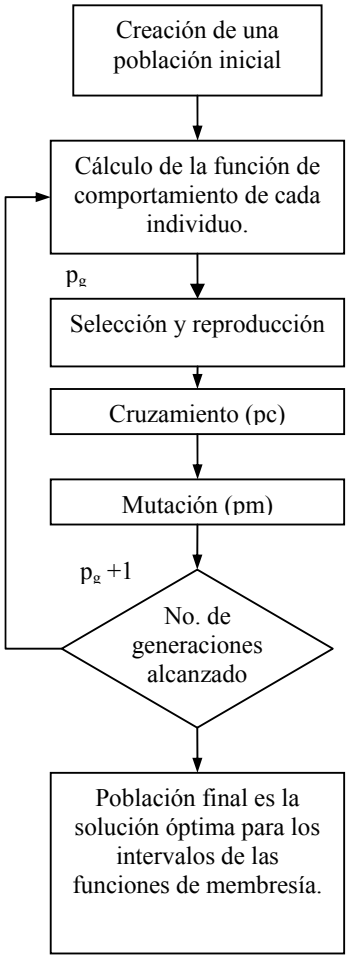



**Figura 4.42.** Representación de las operaciones ejecutadas durante la aplicación de los AG sobre lógica difusa.

Las abreviaturas $p_c$ y $p_m$ serán descritas posteriormente en este contexto, su significado es referente a la probabilidad de mutación y probabilidad de cruzamiento. En este trabajo se realiza un análisis con 300 generaciones y con 500 generaciones. Tomando la misma aplicación de AG sobre la lógica difusa en la optimización de las funciones de membresía como el ejemplo que servirá para describir el funcionamiento de AG siguiendo el flujo del diagrama de la figura 4.42.

### *4.4.1 CREACIÓN DE LA POBLACIÓN INICIAL.*

Partiendo de una plantilla de opciones con respecto al dominio de trabajo, se retoma el espacio de búsqueda X descrito por TS, la forma de optimizar valores de base es por función de membresía a la vez introduciendo como variables de análisis para AG los intervalos a, b y c descritos en la figura 4.36, la función central solo cambiara de la forma siguiente tal como se muestra en la figura 4.43:

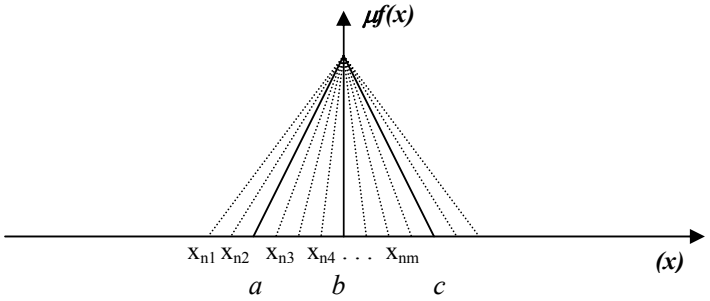



**Figura 4.43.** Espacio generado de búsqueda para el universo de discusión.

Los valores de a y c se verán modificados durante la aplicación de los AG para la función del discurso de ZE. La forma de elegir la población inicial se lleva en forma aleatoria con la función rand()%2, la función población_inicial(), construye alelo por alelo (valor del bit: 1 o 0) de cada individuo de la población inicial, en este trabajo elegimos el tamaño de la población de 6 individuos con una probabilidad de cruzamiento (*pc*) de 0.987 y una probabilidad de mutación de 0.123, generalmente estos valores son contrarios permitiendo tener mayor posibilidad al cruzamiento que en una mutación, tal como sucede con los seres vivos. La población inicial es mostrada en la tabla 4.4.1:

**Tabla 4.4.1** *Población inicial*

| *No.* | *Cadena(individuo)* | *Valor de función objetivo (fo)* | *Valor entero* | $f_i/\Sigma f$ |
|---|---|---|---|---|
| 1 | **0 1 0 0 1 0 1 1 0 1 1 0** | 0.1254 | 4/11/6 | 0.1444 |
| 2 | **0 1 0 0 1 1 0 0 0 1 1 0** | 0.1369 | 4/12/6 | 0.157519 |
| 3 | **0 0 0 1 1 1 0 1 0 1 0 1** | 0.111 | 1/13/5 | 0.12771 |
| 4 | **1 1 1 0 0 0 0 0 0 1 0 0** | 0.225 | 14/0/4 | 0.2588 |
| 5 | **1 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1** | 0.1268 | 9/15/15 | 0.14589 |
| 6 | **0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 0 1** | 0.1444 | 0/7/13 | 0.166148 |
| Suma | | 0.8691 | | 1 |
| Promedio | | 0.14485 | | 0.1667 |
| Mínimo | | 0.111 | | 0.1266148 |

Recordando que el espacio de búsqueda propuesto en TS es una estructura de n x n donde n = 8, los intervalos manejados forman un total de 64 opciones, la base de las funciones triangulares puede reducirse o ampliarse tanto para las funciones del error como para la derivada del error, AG pretende encontrar modificando en base a las propuestos de cada individuo los parámetros de la base de las funciones a, b y c, tal como se establece en la figura 4.36. Este paso $p_g$ considerada la población inicial solo trabaja al comienzo de AG con el fin de establecer un punto de partida.

### *4.4.2 SELECCIÓN Y REPRODUCCIÓN.*

El siguiente paso es elegir los individuos más aptos de la tabla 4.4.1 pertenecientes a la primer población y realizar la reproducción de dichos individuos [7] [8]. Existen varios métodos de selección, este trabajo utiliza un método de selección no elitista por ruleta, el cual consiste en dividir una rueda-ruleta en secciones que serán proporcionales al tamaño del comportamiento de cada individuo, en la tabla 4.4.2 se muestra la forma de obtener dichos porcentajes de zona de cada individuo sobre la rueda-ruleta.

**Tabla 4.4.2** *Selección*

| *No.* | *Cadena(individuo)* | *Valor de función objetivo (fo)* | *Valor entero* | *Conteo de la ruleta* | % del total |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | **0 1 0 0 1 0 1 1 0 1 1 0** | 0.1254 | 4/11/6 | 1 | 14.44 |
| 2 | **0 1 0 0 1 1 0 0 0 1 1 0** | 0.1369 | 4/12/6 | 1 | 15.75 |
| 3 | **0 0 0 1 1 1 0 1 0 1 0 1** | 0.111 | 1/13/5 | 0 | 12.77 |
| 4 | **1 1 1 0 0 0 0 0 0 1 0 0** | 0.225 | 14/0/4 | 2 | 25.88 |
| 5 | **1 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1** | 0.1268 | 9/15/15 | 0 | 14.5 |
| 6 | **0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 0 1** | 0.1444 | 0/7/13 | 2 | 16.66 |
| Suma | | 0.8691 | | 1 | 100 |
| Promedio | | 0.14485 | | 0.1667 | |
| Mínimo | | 0.111 | | 0.1266148 | |

A continuación se presenta en la figura 4.44 las secciones de la rueda-ruleta de acuerdo al comportamiento de cada individuo.

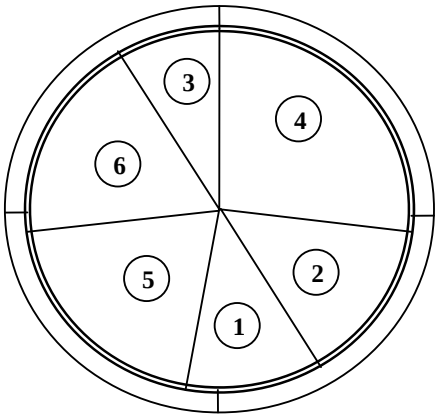



**Figura 4.44.** Rueda-Ruleta secciones pertenecientes a cada individuo

En la columna conteo de la ruleta son los elementos que se reproducirán para estar en una zona de cruzamiento quedando la tabla 4.4.2 tal como se muestra en la tabla 4.4.3:

**Tabla 4.4.3** *Selección.*

| *No.* | *Cadena(individuo)* | *Valor de función objetivo (fo)* | *Valor entero* | *Conteo de la ruleta* | % del total |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | **0 1 0 0 1 0 1 1 0 1 1 0** | 0.1254 | 4/11/6 | 1 | 14.44 |
| 2 | **0 1 0 0 1 1 0 0 0 1 1 0** | 0.1369 | 4/12/6 | 1 | 15.75 |
| 3 | **0 0 0 1 1 1 0 1 0 1 0 1** | 0.111 | 1/13/5 | 0 | 12.77 |
| 4 | **1 1 1 0 0 0 0 0 0 1 0 0** | 0.225 | 14/0/4 | 2 | 25.88 |
| 5 | **1 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1** | 0.1268 | 9/15/15 | 1 | 14.5 |
| 6 | **0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 0 1** | 0.1444 | 0/7/13 | 1 | 16.66 |
| Suma | | 0.8691 | | 1 | 100 |
| Promedio | | 0.14485 | | 0.1667 | |
| Mínimo | | 0.111 | | 0.1266148 | |

La ruleta de la figura 4.43 muestra los segmentos correspondientes a cada individuo de la población, se seleccionan los individuos después de hacer girar la rueda y los elementos seleccionados se reproducen y combinan aleatoriamente, este tipo de selección permite elegir a aquellos individuos que muestren el mejor comportamiento. La función objetivo es nuestra función de comportamiento de cada individuo, siendo la prueba que determinara en base a las características de los mismos individuos cuál combinación es la óptima, la función objetivo utilizada es la siguiente:

***Función objetivo*** = 1 - $\alpha$ *error + $\beta$*Derivada del error, donde $\alpha = 10$ y $\beta = 125$

El proceso de reproducción da el siguiente resultado:

**Tabla 4.4.4** *Selección.*

| *No.* | *Cadena(individuo)* | *Reproducción seleccionada aleatoriamente* | *Valor entero* | *No. de elecciones recibidas* | % del total |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | **0 1 0 0 1 0 1 1 0 1 1 0** | 1 | 18 | 1 | 14.44 |
| 2 | **0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 0 1** | 6 | 1 | 1 | 16.66 |
| 3 | **0 1 0 0 1 1 0 0 0 1 1 0** | 2 | 19 | 1 | 15.75 |
| 4 | **1 1 1 0 0 0 0 0 0 1 0 0** | 4 | 48 | 2 | 25.88 |
| 5 | **1 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1** | 5 | 39 | 1 | 14.5 |
| 6 | **1 1 1 0 0 0 0 0 0 1 0 0** | 4 | 48 | 1 | 25.88 |

En la columna reproducción seleccionada aleatoriamente indica los individuos que fueron elegidos en base a la ruleta que serán reproducidos y formaran muy probablemente parte de la siguiente población.

La estructura establecida para indicar los individuos de una determinada población es tomada de la figura 4.39; tomar un valor demasiado pequeño de incremento para a, b ó c es posible pero el comportamiento de los individuos sería muy similar, tampoco es

recomendable incrementar o disminuir el valor de a, b ó c porque distorsionaría el resultado buscado por GA.

### *4.4.3 CRUZAMIENTO Y MUTACIÓN.*

En este paso de AG cruza los individuos seleccionados que formaran parte de la siguiente generación; la probabilidad de cruzamiento en este trabajo planteada como pc = 0.987 y para la probabilidad de mutación establecida como pm = 0.123, generalmente pc y pm son valores contrarios, la mutación al igual que los seres vivos y plantas en la naturaleza ocurre en baja proporción a los individuos concebidos como normales. El cruzamiento común empleado por AG es en 1 o 2 puntos sobre la cadena binaria. La elección acerca de cual posición binaria es el punto de cruzamiento se realiza aleatoriamente como se muestra en la figura 4.4.5.

**Tabla 4.4.5** *Cruzamiento.*

| *No.* | *Cadena(individuo)* | *Reproducción seleccionada aleatoriamente* | *Punto de cruzamiento* | *Después del cruzamiento* | *No. de solución o individuo* |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | **0 1 0 0 1 0 1 1 0 1 1 0** | 1 | 6 | **010010111101** | 17 |
| 2 | **0 0 0 0 0 1 1 1 1 1 0 1** | 6 | 6 | **000001110110** | 2 |
| 3 | **0 1 0 0 1 1 0 0 0 1 1 0** | 2 | 8 | **010011000100** | 16 |
| 4 | **1 1 1 0 0 0 0 0 0 1 0 0** | 4 | 8 | **111000000110** | 51 |
| 5 | **1 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1** | 5 | 1 | **111000000100** | 32 |
| 6 | **1 1 1 0 0 0 0 0 0 1 0 0** | 4 | 1 | **100111111111** | 55 |

La forma de realizar la operación de cruzamiento se ilustra a continuación:

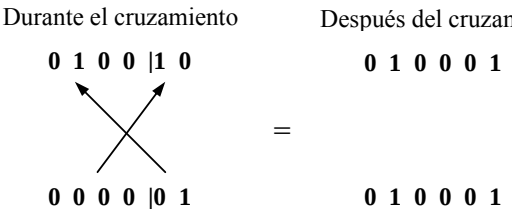



**Figura 4.39** Operador cruzamiento

El operador mutación tiene una ocurrencia baja y en este trabajo con el cambio de valor a nivel de bit, digitalmente seria el complemento de un alelo, una mutación puede resultar benéfica o acarrear malos resultados. La mutación juega el mismo rol que el proceso de diversificación nos permite salir de óptimos locales, en ocasiones dicho punto encontrado puede ser el óptimo global sin embargo AG tenderá de nuevo a puntos cercanos o al punto del óptimo global.

Tomaremos el elemento 5, simularemos una mutación en el bit 3.

1 0 **0** 0 0 0 1 0 **1** 0 0 0

Antes de la mutación. Después de la mutación.

A continuación se muestra en la figura 4.45 el trabajo de n generaciones realizadas en la simulación y su evaluación.

| Valor Voltaje terminal | Tiempo (inicio de falla t = 1 seg.) | Cadenas (representación binaria) | | No. de generación |
|---|---|---|---|---|
| 0.9629552 | 1.31 | 011101111101111101111011111011111011-- | 0.353601 -- | 246 |
| 0.9646950 | 1.31 | 011101111101111101111011111011111011-- | 0.335652 -- | 246 |
| 0.9664848 | 1.32 | 011101111101111101111011111011111011-- | 0.317254 -- | 247 |
| 0.9683198 | 1.32 | 011101111101111101111011111011111011-- | 0.298451 -- | 247 |
| 0.9701954 | 1.32 | 011101111101111111111011111011111011-- | 0.279291 -- | 247 |
| 0.9721065 | 1.33 | 011101111101111011111011111011111011-- | 0.259824 -- | 248 |
| 0.9740487 | 1.33 | 011101111101111011111011111011111011-- | 0.240090 -- | 248 |
| 0.9760175 | 1.33 | 011101111101111111111011111011111011-- | 0.220137 -- | 248 |
| 0.9780086 | 1.34 | 011111111111111111111111110011110011-- | 0.200004 -- | 249 |
| 0.9800176 | 1.34 | 011001111111111111111111111111110011-- | 0.179734 -- | 249 |
| 0.9820405 | 1.34 | 011111111111111111110011111111111111-- | 0.159367 -- | 249 |
| 0.9840731 | 1.35 | 011111111111111111110011111111111111-- | 0.138943 -- | 250 |
| 0.9861116 | 1.35 | 011001111111111001111111111111111111-- | 0.118499 -- | 250 |
| 0.9881521 | 1.35 | 011111111001111001111111111111110011-- | 0.098074 -- | 250 |
| 0.9901909 | 1.36 | 011001111001111001111111110011111111-- | 0.077702 -- | 251 |
| 0.9922245 | 1.36 | 011001111001111001110011110111111011-- | 0.057420 -- | 251 |
| 0.9942492 | 1.36 | 011001111001111001110011111011110111-- | 0.037261 -- | 251 |
| 0.9962616 | 1.37 | 011001111101111001110011111011110111-- | 0.017260 -- | 252 |
| 0.9982583 | 1.37 | 011101111001111101110111111011110011-- | 0.002557 -- | 252 |
| 1.0002353 | 1.37 | 011001111001111001111011110011111011-- | 0.022123 -- | 252 |
| 1.0021886 | 1.38 | 011001111001111001110011110011110011-- | 0.041418 -- | 253 |
| 1.0041151 | 1.38 | 011001111001111001110011110011110011-- | 0.060416 -- | 253 |
| 1.0060115 | 1.38 | 011001111001111001111011110011110011-- | 0.079079 -- | 253 |
| 1.0078712 | 1.39 | 011001111001111001111001111001110011-- | 0.097308 -- | 254 |
| 1.0096749 | 1.39 | 011001111001111001111001111011110011-- | 0.114787 -- | 254 |
| 1.0113910 | 1.39 | 011001011001011001011001011010110010-- | 0.131072 -- | 254 |
| 1.0129778 | 1.40 | 011001011001011001011001011010110010-- | 0.145646 -- | 255 |
| 1.0144023 | 1.40 | 011001011001011001011001011010110010-- | 0.158267 -- | 255 |
| 1.0156612 | 1.40 | 011001011001011001011001011010110010-- | 0.169202 -- | 255 |
| 1.0167670 | 1.41 | 011001011001011001011001010010110010-- | 0.178728 -- | 256 |
| 1.0177321 | 1.41 | 011001011001011001011001010010110010-- | 0.186973 -- | 256 |
| 1.0185684 | 1.41 | 011011011011011011011011110000110000-- | 0.194046 -- | 256 |
| 1.0192875 | 1.42 | 011001011010011000011010110110110000-- | 0.200065 -- | 257 |
| 1.0199001 | 1.42 | 011001111010110001010010100110100000-- | 0.205132 -- | 257 |

**Figura 4.45**. Simulación de AG para vT = 1 p.u. θ = 57.19 con 2 ciclos de falla cuando t= 1segundo con pc = 0.987 y pc = 0.123, No. máximo de generaciones = 500.

## *4.5 ALGORITMOS GENÉTICOS Y BÚSQUEDA POR TABÚ CON LÓGICA DIFUSA.*

La aplicación de las técnicas trabajando juntas es como se representa en la figura 4.46, consiste en la unión digital de los algoritmos genéticos y de la búsqueda por tabú.

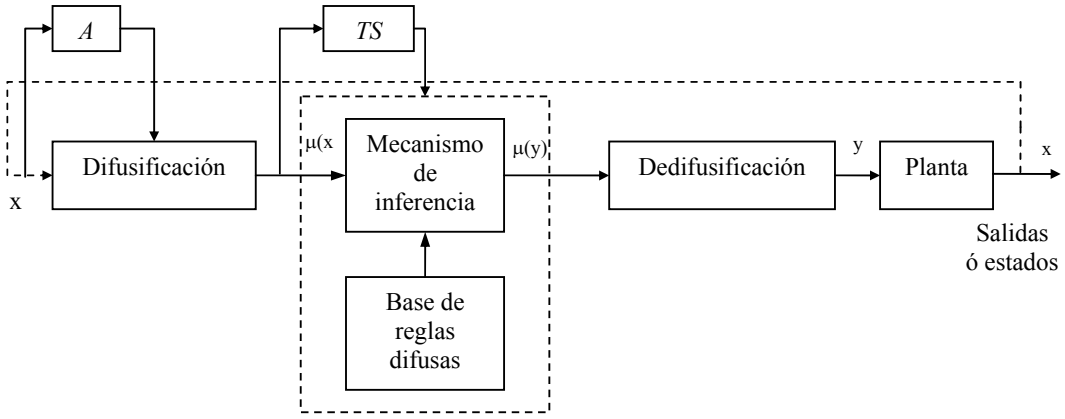



**Figura 4.46.** Arquitectura del controlador lógico difuso utilizando AG y TS.

La aplicación de los algoritmos genéticos y la búsqueda por tabú es planteada en este trabajo como la unión digital de ambas técnicas en cada fase correspondiente sobre el control difuso. El problema se convierte en la maximización-minimización de la función objetivo. La búsqueda por tabú combina la derivada del error y el error en un espacio de búsqueda que permite abarcar los elementos disponibles a sintonizar en un controlador difuso, de igual forma los algoritmos genéticos pretenden resolver el problema de optimización a través de la maximización de la función objetivo debido al tipo de selección establecido y permitir una reproducción no elitista sobre la construcción de las variables establecidos en los algoritmos genéticos sobre la lógica difusa.

El tiempo de muestreo que se requiere en cada iteración es:

Paso de integración / 9-ecuaciones diferenciales = *iteración (tiempo de muestreo)*

Pero en cada tiempo de muestreo los algoritmos genéticos y la búsqueda por tabú emplean un tiempo de simulación extra requerido parea simular el modelo de referencia por lo tanto el tiempo de muestreo se ve afectado.

Por lo tanto el tiempo requerido por los algoritmos en cada tiempo de muestreo es:

Iteración AG-TS = *iteración / [tiempo-simulación]*[N*(x)]*

A continuación se muestra en la figura 4.47 el diagrama de flujo que describe la optimización realizada por algoritmos genéticos y la búsqueda por tabú sobre las funciones de membresía y la tabla de reglas lingüísticas consecutivamente para una iteración, donde k es la iteración actual, ***n*** la iteración actual para los algoritmos genéticos, ***g*** número de generación actual para los algoritmos genéticos y ***m*** iteración actual para la búsqueda por tabú.

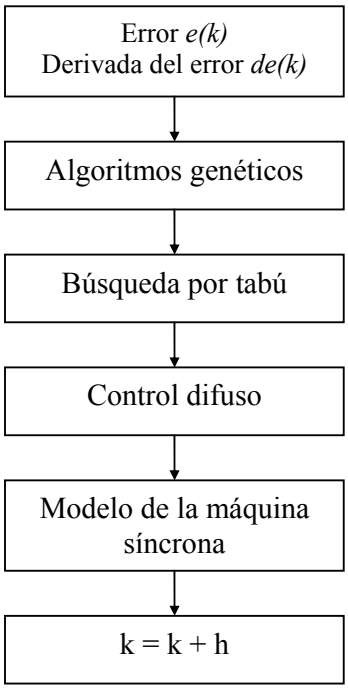



**Figura 4.47.** Diagrama de flujo para la optimización del controlador difuso empleando TS y AG para una iteración.

# CAPÍTULO V

# PRUEBAS Y RESULTADOS.

## *5.1 INTRODUCCIÓN.*

En este capítulo se presentan las pruebas realizadas, resultados obtenidos y análisis simulando el generador síncrono en diferentes puntos de operación y ante una falla trifásica. Inicialmente la regulación de voltaje es realizada por medio del regulador convencional ST1 (ver apéndice C) tipo proporcional. La regulación de voltaje realizada por medio del regulador ST1 es comparada con el controlador difuso estático (sin modificar la tabla de reglas lingüísticas y funciones de membresía) y empleando algoritmos genéticos y búsqueda por tabú para la sintonización del controlador difuso.

Este capítulo presenta diferentes secciones asociadas con los resultados de la siguiente forma:

La primer parte (5.2) presenta el funcionamiento y descripción del regulador convencional tipo ST1 en diversos puntos de operación.

La segunda parte (5.3) presenta las pruebas, resultados y análisis después de realizar una autosintonización sobre una tabla de 25 y 49 reglas lingüísticas utilizando la búsqueda por tabú describiendo un vecindario de búsqueda lateral por el criterio de alta y baja influencia.

La tercera parte (5.4) esta compuesta de las pruebas, resultados y análisis después de realizar una autosintonización sobre una tabla de 49 y 81 reglas por un vecindario de búsqueda de entorno por el criterio de alta influencia.

La cuarta parte (5.5) esta compuesta de las pruebas, resultados y análisis después de realizar una autosintonización sobre 5 y 7 funciones de membresía utilizando la búsqueda por tabú por el criterio de alta influencia y baja influencia

La quinta parte (5.6) esta compuesta de las pruebas, resultados y análisis después de realizar una autosintonización sobre 5 y 7 funciones de membresía utilizando un algoritmo genético simple.

La sexta parte (5.7) esta compuesta de las pruebas, resultados y análisis después de realizar una autosintonización sobre una tabla de 25 y 49 reglas lingüísticas utilizando la búsqueda por tabú y algoritmos genéticos.

## *5.2 RESULTADOS OBTENIDOS DESPUÉS DE SIMULAR EL GENERADOR SÍNCRONO UTILIZANDO EL REGULADOR CONVENCIONAL TIPO ST1.*

### *5.2.1 INTRODUCCIÓN.*

En esta sección se presentan las pruebas, resultados y análisis después de simular el generador en diferentes puntos de operación y simulando el regulador ST1 para el voltaje en terminales (ver apéndice C) considerando el valor de Z en la línea de transmisión como:

Línea corta: $Z = (0.024 + j0.0115)\ \Omega$

Línea larga: $Z = (0.12 + j1.1)\ \Omega$

Valores de: $Z = (0.04 + 0.4J)\ \Omega$ y $Z = (0.06 + 0.6j)$

Los parámetros del regulador son presentados en el apéndice C y sintonizado en vacío de acuerdo a [5], la aplicación del regulador es como un control proporcional sin utilizar la función de saturación (ver apéndice C).

En la figura 5.2 se presenta el comportamiento del voltaje en terminales y la potencia activa tomando como punto de operación inicial vacío hasta alcanzar un punto de operación donde la potencia activa es igual a 0.7888 p.u., al comienzo de la simulación el generador se encuentra en estado permanente y se podrá observar claramente el comportamiento del regulador que servirá como punto de comparación para las diversas técnicas inteligentes planteadas en esta tesis. En las figuras 5.2-5.7 se presentan diversos puntos de operación que muestran el comportamiento del generador síncrono empleando el regulador convencional, se puede notar que funciona correctamente en puntos de operación donde la máquina esta casi en vacío, cuando se trata de puntos de operación donde la máquina soporta una carga considerable, de acuerdo a las características propias de la máquina el regulador convencional presenta deficiencias y el voltaje en terminales se vuelve inestable; tales resultados sirven como referencia para observar el comportamiento de la lógica difusa, algoritmos genéticos y la búsqueda por tabú.

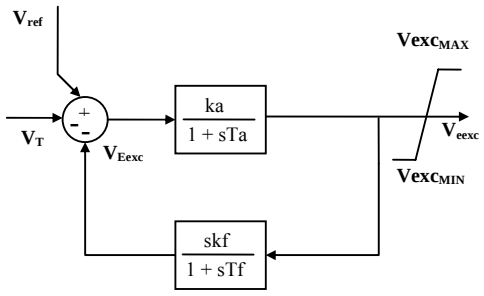



**Figura 5.1** Diagrama a bloques del regulador convencional ST1

A continuación se muestran en la figura 5.2 los resultados obtenidos después de realizar una simulación de prueba para el generador síncrono desde un punto de operación sin carga donde la potencia activa es igual a 0 p.u. hasta un punto donde la potencia activa es igual a 0.785 p.u.

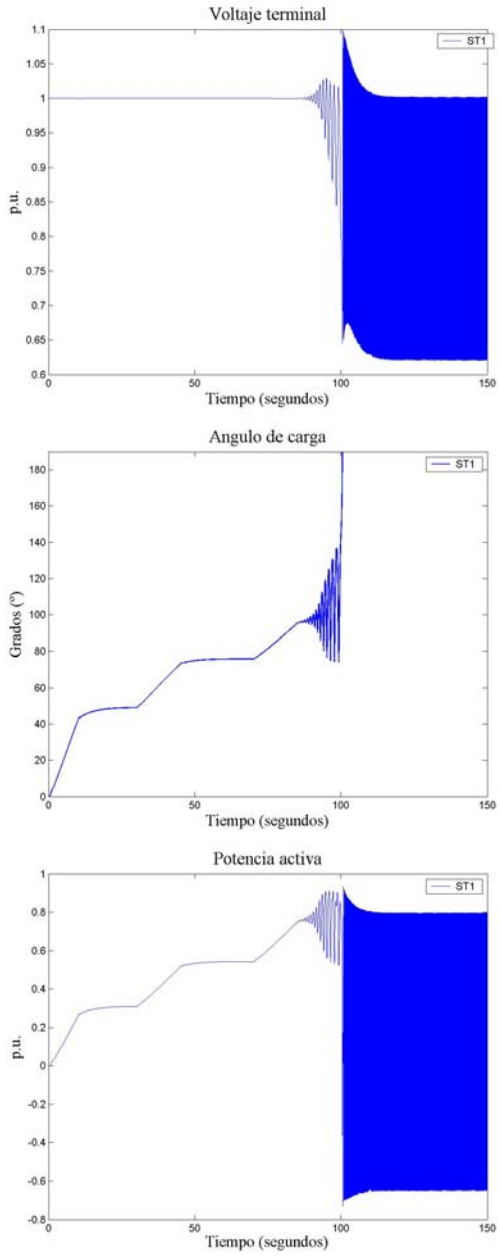
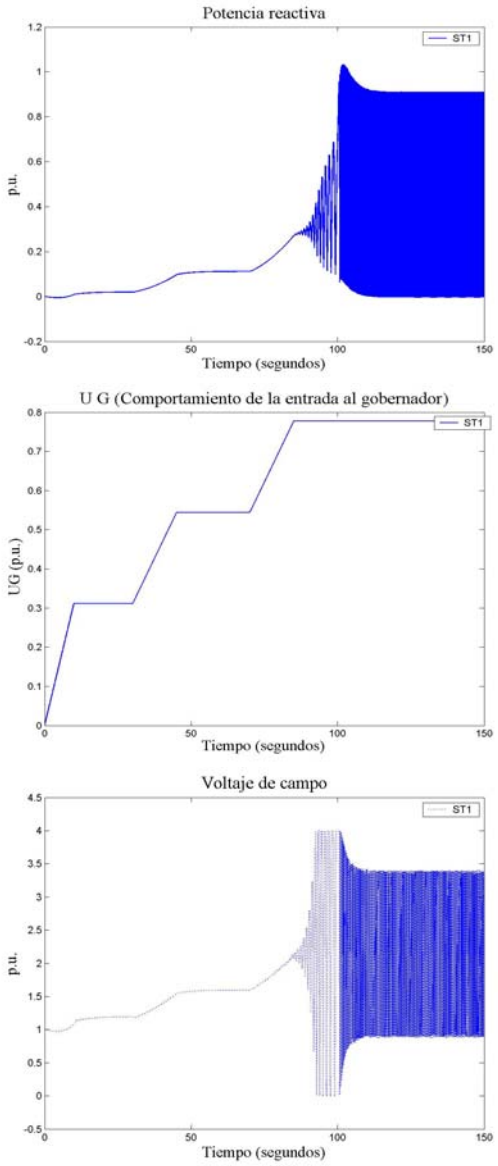



**Figura 5.2.** Comportamiento del generador ante un incremento de UG (entrada del gobernador) utilizando un regulador convencional tipo ST1.




Tal como se muestra en la figura 5.2 no se logra regular el voltaje en terminales con el regulador convencional en puntos cercanos al limite de capacidad del generador síncrono perdiendo síncronismo el generador reflejado en el resto de las variables, tal como se muestra en la figura 5.2 (Comportamiento del voltaje de campo) se limita de 0-4 en p.u. permitiendo establecer valores reales durante la simulación, el ángulo de carga (del rotot) es cercano a 100º donde el generador es de 650 MVA aproximándose al limite de su capacidad en base a las características propias de la máquina [6].

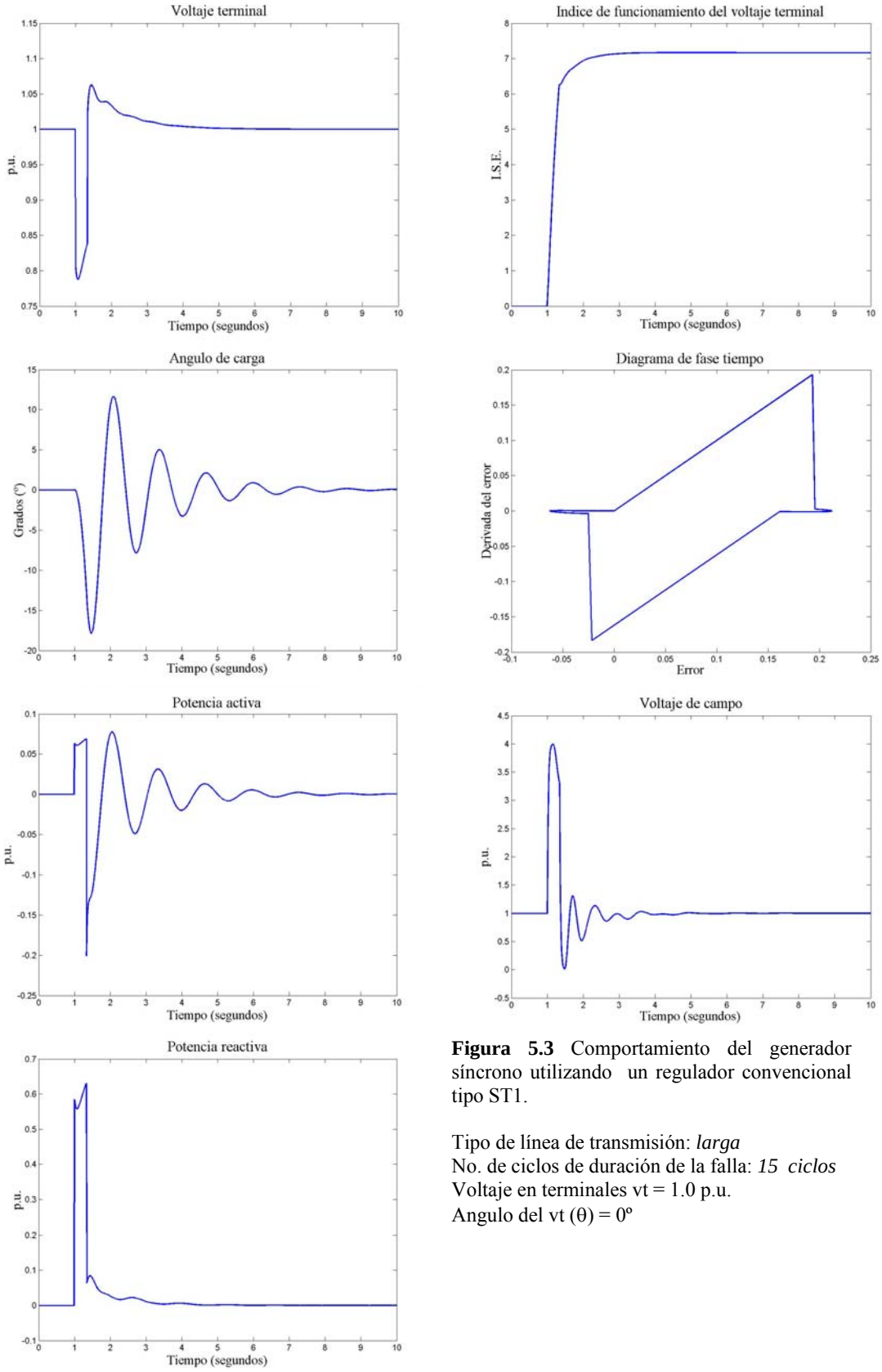



**Figura 5.3** Comportamiento del generador síncrono utilizando un regulador convencional tipo ST1.

Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: *15 ciclos*
Voltaje en terminales vt = 1.0 p.u.
Angulo del vt (θ) = 0º

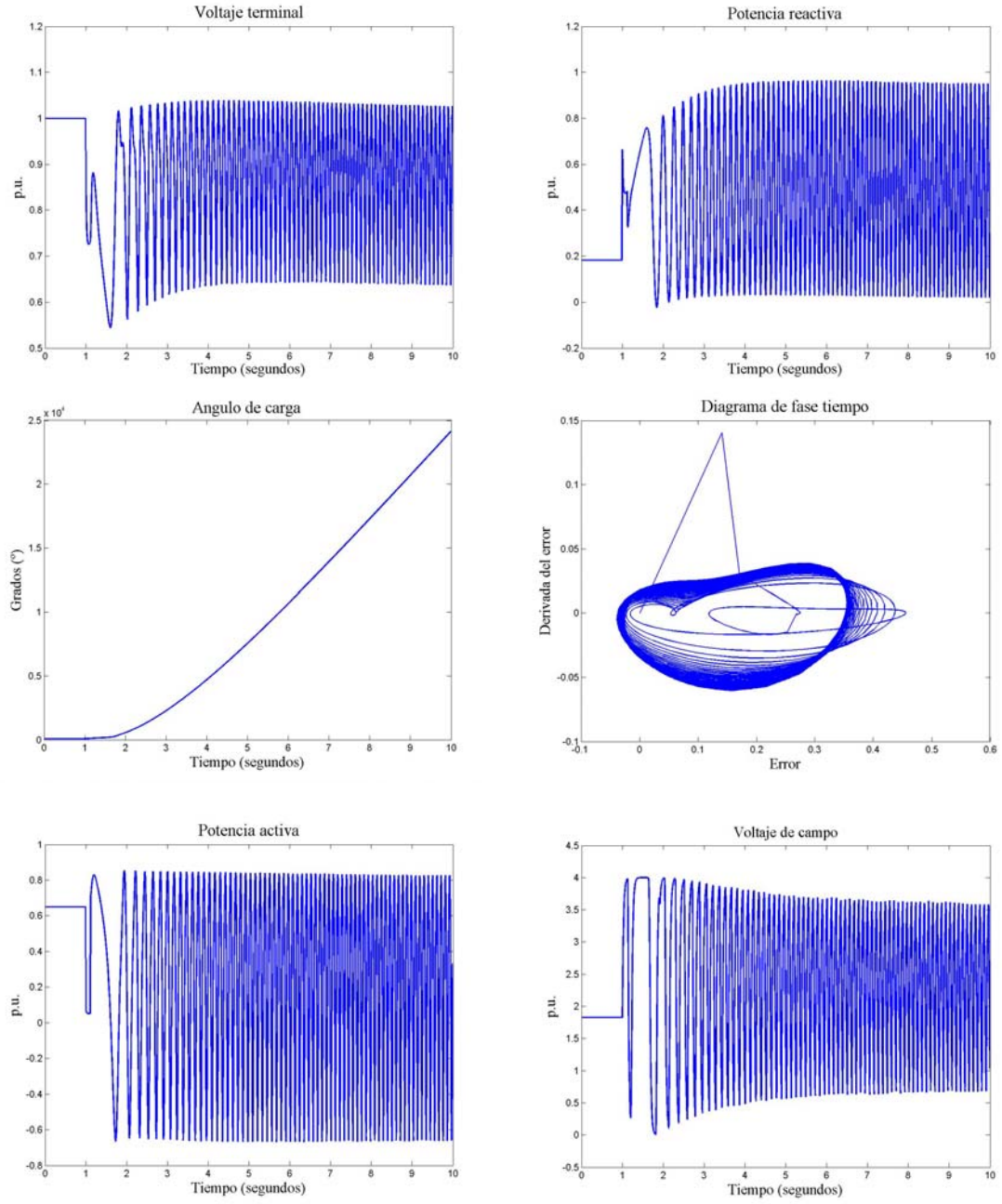



**Figura 5.4** Comportamiento del generador síncrono utilizando un regulador convencional tipo ST1.

Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: 3 *ciclos*
Voltaje en terminales vt = 1.0 p.u.
Angulo del vt (θ) = 52.3339º

Tal como se observa en la figura 5.4 no existe una regulación de voltaje debido al punto de operación tratado y es claramente reflejado en el ángulo del rotor y voltaje de campo después de liberar la falla.

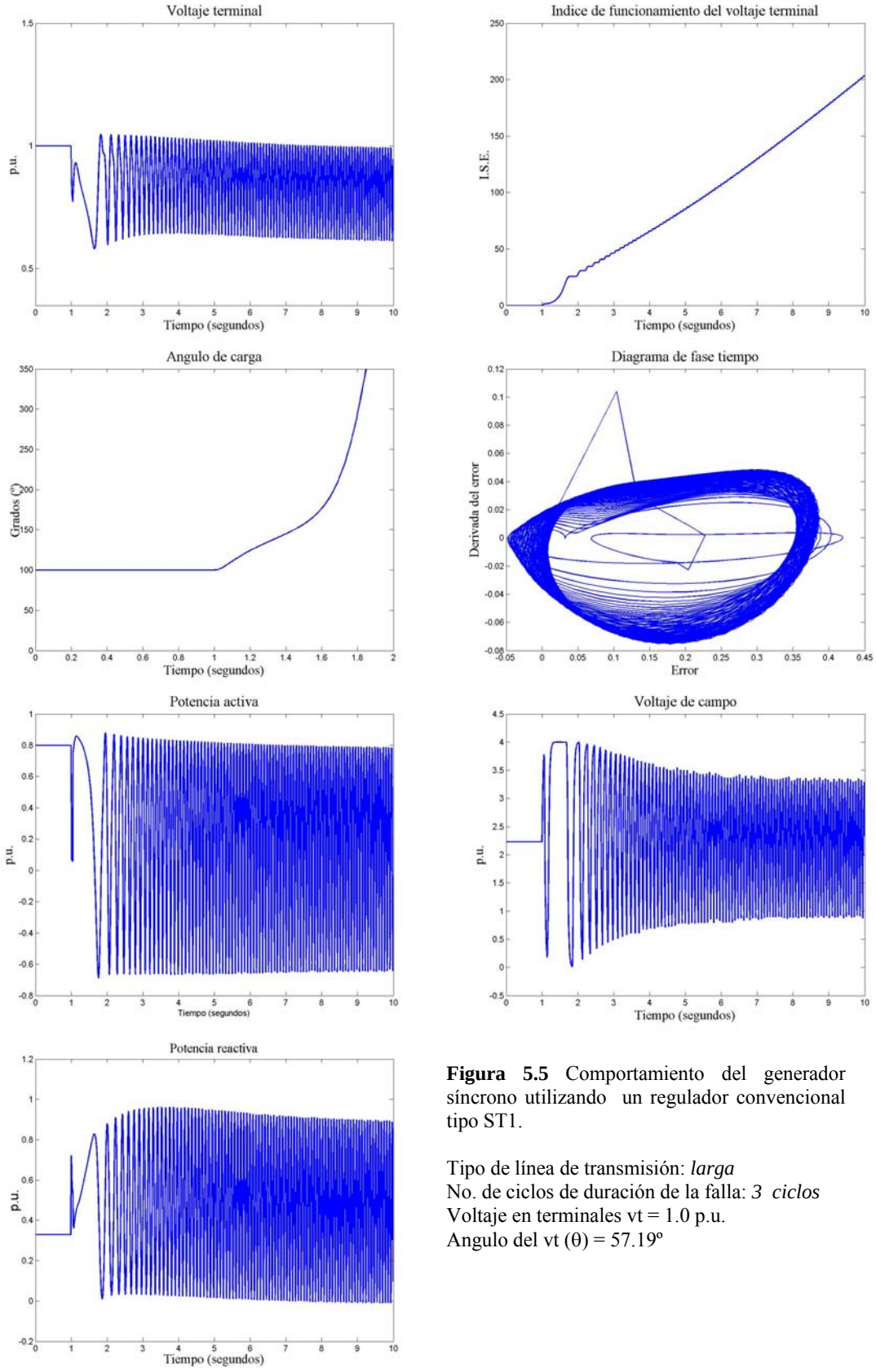



**Figura 5.5** Comportamiento del generador síncrono utilizando un regulador convencional tipo ST1.

Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: *3 ciclos*
Voltaje en terminales vt = 1.0 p.u.
Angulo del vt (θ) = 57.19º

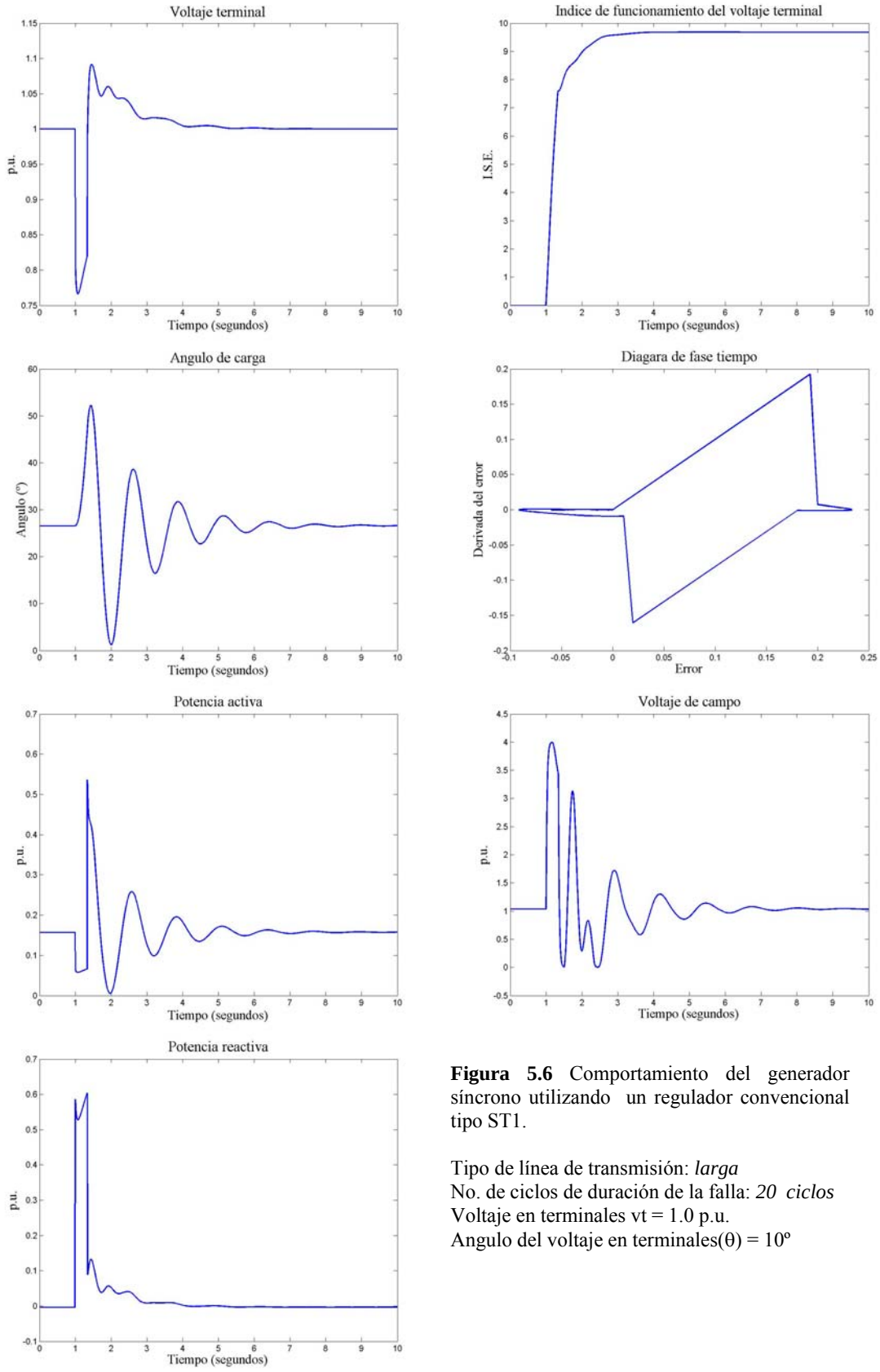



**Figura 5.6** Comportamiento del generador síncrono utilizando un regulador convencional tipo ST1.

Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: *20 ciclos*
Voltaje en terminales vt = 1.0 p.u.
Angulo del voltaje en terminales(θ) = 10º

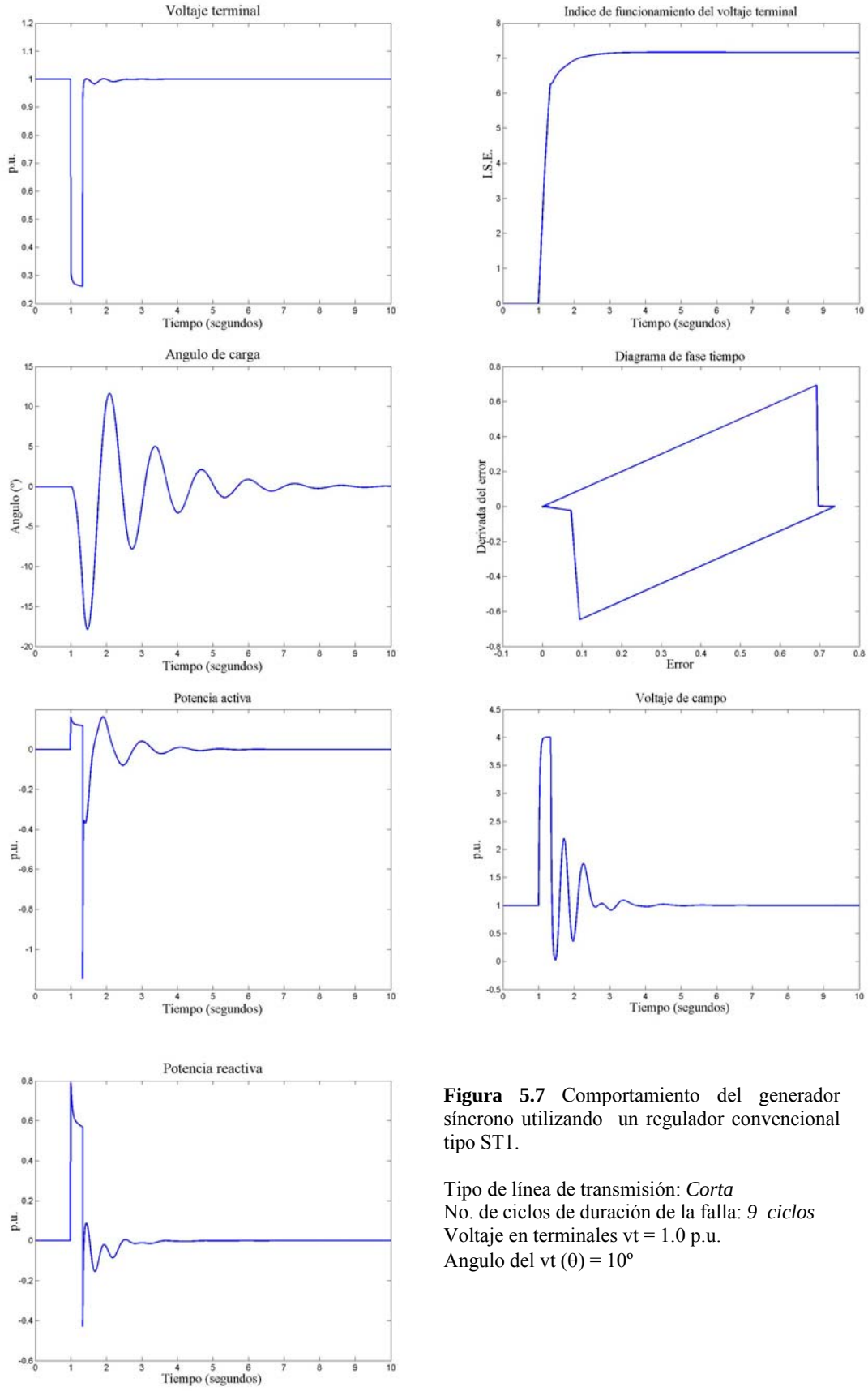



**Figura 5.7** Comportamiento del generador síncrono utilizando un regulador convencional tipo ST1.

Tipo de línea de transmisión: *Corta*
No. de ciclos de duración de la falla: *9 ciclos*
Voltaje en terminales vt = 1.0 p.u.
Angulo del vt (θ) = 10º

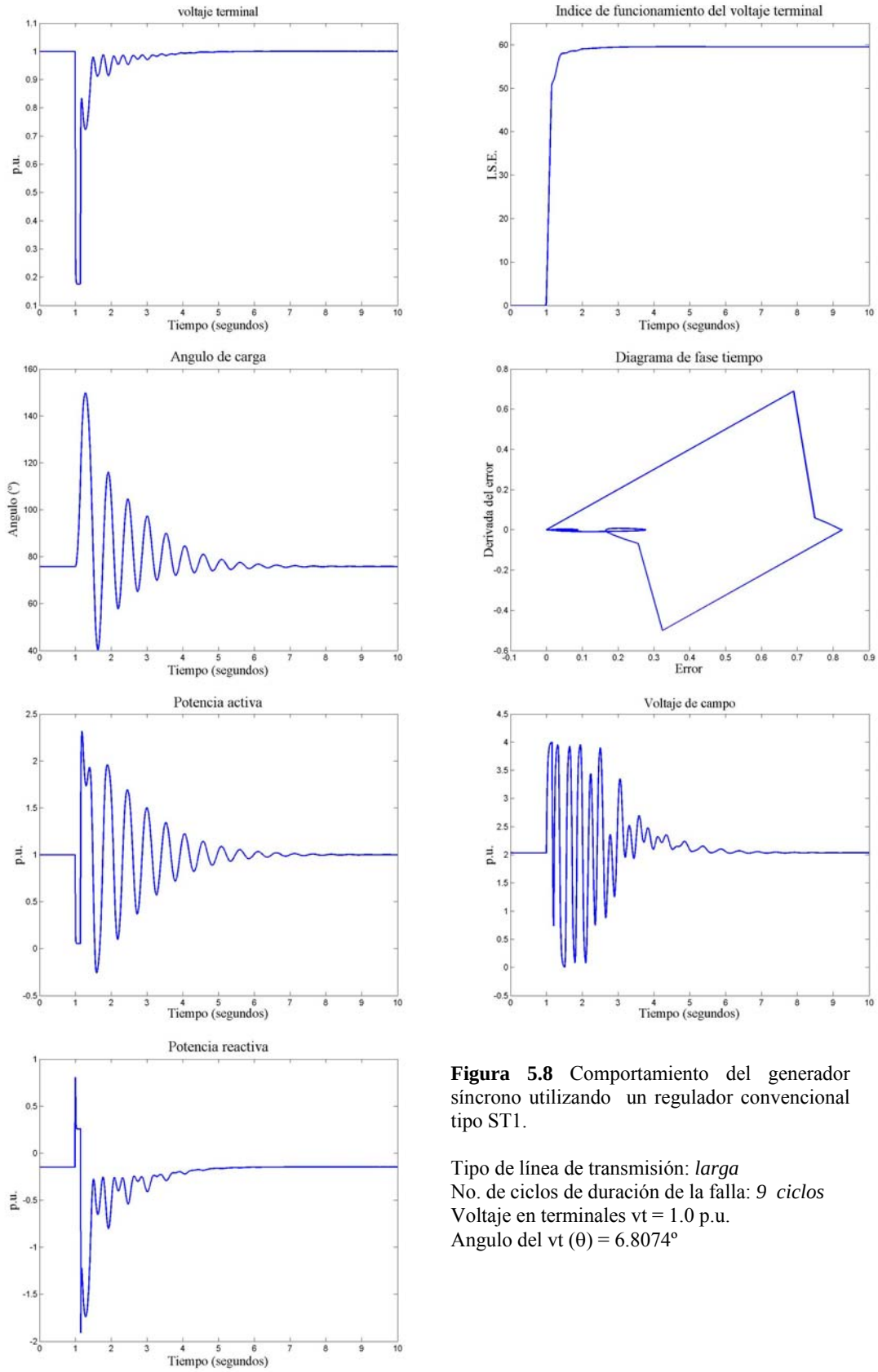



**Figura 5.8** Comportamiento del generador síncrono utilizando un regulador convencional tipo ST1.

Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: *9 ciclos*
Voltaje en terminales vt = 1.0 p.u.
Angulo del vt (θ) = 6.8074º

## *5.3 RESULTADOS OBTENIDOS DESPUÉS DE REALIZAR UNA AUTOSINTONIZACIÓN SOBRE UNA TABLA DE 25 Y 49 REGLAS LINGÜÍSTICAS EMPLEANDO LA BÚSQUEDA POR TABÚ POR VECINDADES LATERALES.*

### *5.3.1 INTRODUCCIÓN*

En esta sección se presentan los resultados obtenidos después de realizar diversas pruebas de autosintonización sobre una tabla de 25 y 49 reglas lingüísticas por medio de la búsqueda por tabú (TS) por vecindades laterales empleando el criterio de alta y baja influencia con una línea de transmisión corta y larga. Se simula una falla trifásica cuando t = 1 segundos empleando n ciclos de falla los cuales son indicados en cada prueba. Las distintas pruebas presentadas en este capítulo con respecto al controlador difuso estático son tablas no dinámicas y la comparación entre el controlador difuso tradicional y el optimizado muestra en parte el comportamiento del voltaje en terminales usando ambas técnicas.

### *5.3.2. RESULTADOS OBTENIDOS DESPUÉS DE REALIZAR UNA PRUEBA DE AUTOSINTONIZACIÓN SOBRE UNA TABLA DE 25 REGLAS LINGÜÍSTICAS POR EL CRITERIO DE ALTA INFLUENCIA EMPLEANDO UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN LARGA.*

Se presentan los resultados obtenidos después de realizar una prueba de autosintonización sobre una tabla de 25 reglas lingüísticas empleando una búsqueda por tabú por el criterio de alta influencia empleando una línea de transmisión larga [29].

Se realiza una comparación gráfica entre el control difuso sintonizando la tabla de reglas por medio de la búsqueda por tabú, control difuso sintonizado manualmente (estático) y el regulador convencional tipo ST1, los resultados presentados en esta sección inician con la figura 5.9 donde el generador partirá desde vacío hasta alcanzar un punto de operación donde la potencia activa es igual a 0.788 p.u. de acuerdo a las características de trabajo de la maquina [5][29] y limites de estabilidad [5].

*Los parámetros empleados en la búsqueda por tabú por el criterio de alta influencia para los diversos resultados mostrados en esta sección son:*

- Intervalo de tiempo para la memoria a corto plazo (término a corto plazo): 0.125 segundos.
- Intervalo de tiempo para la memoria a largo plazo: 0.240 segundos.
- Tabú-sumado: 0.125 segundos.
- Tabú-eliminado: 1 segundo.
- Tipo de criterio: Alta influencia.

A continuación se muestran los resultados encontrados en la figura 5.9 después de una prueba de regulación de voltaje a través de la manipulación del voltaje de campo empleando TS por el criterio de alta influencia y partiendo desde un punto de operación de vacío incrementando la carga hasta donde la potencia activa es igual a 0.78889 p.u.

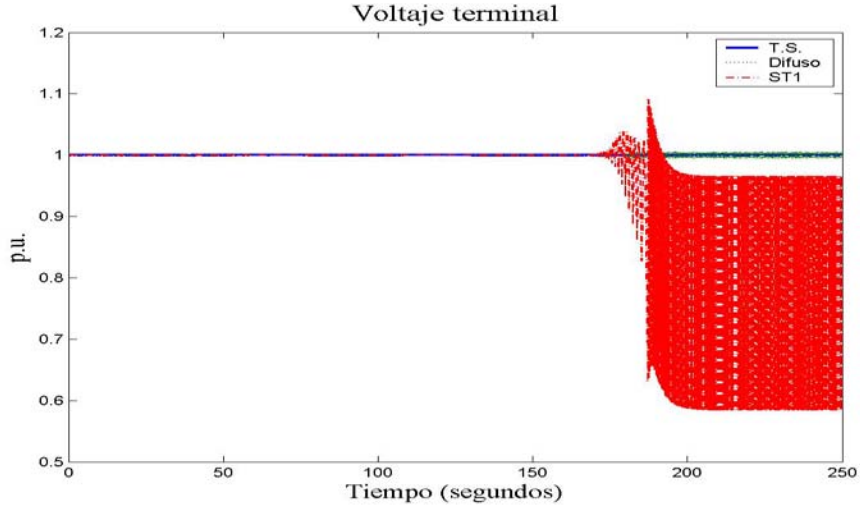



Figura 5.9 (a) Comportamiento del voltaje terminal.

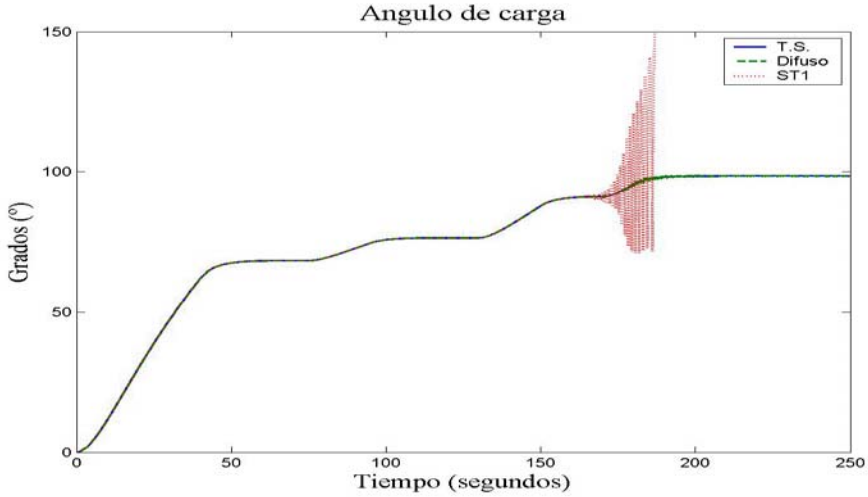



Figura 5.9 (b) Comportamiento del ángulo de carga

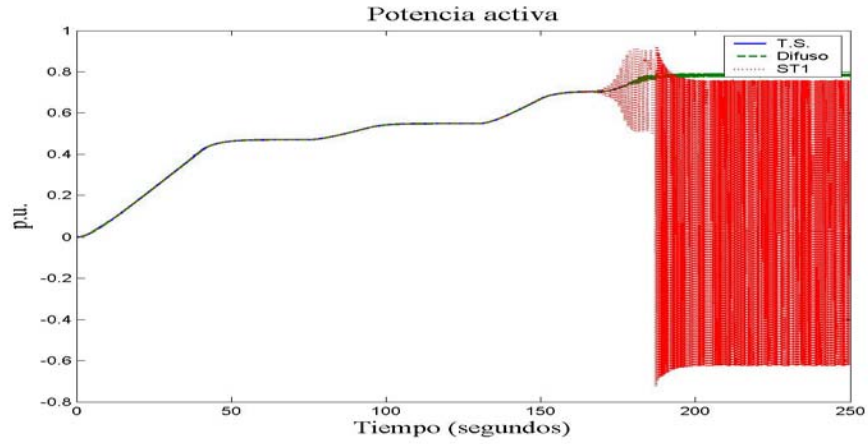



Figura 5.9 (c) Comportamiento del la potencia activa.

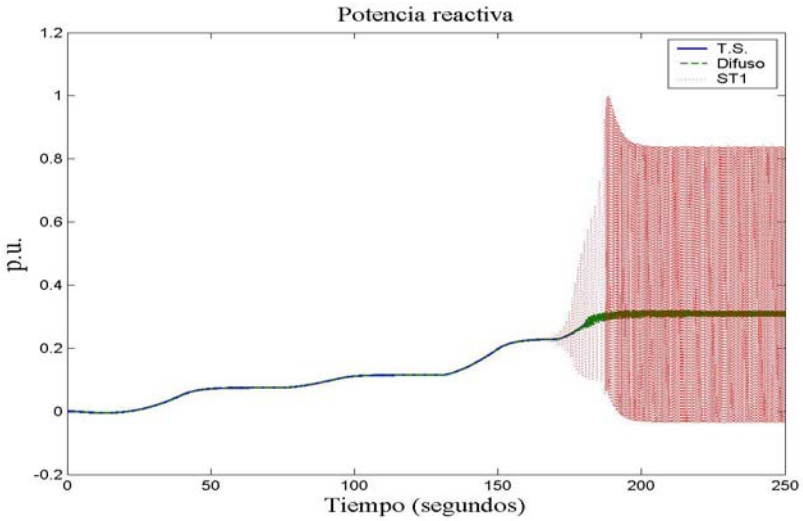
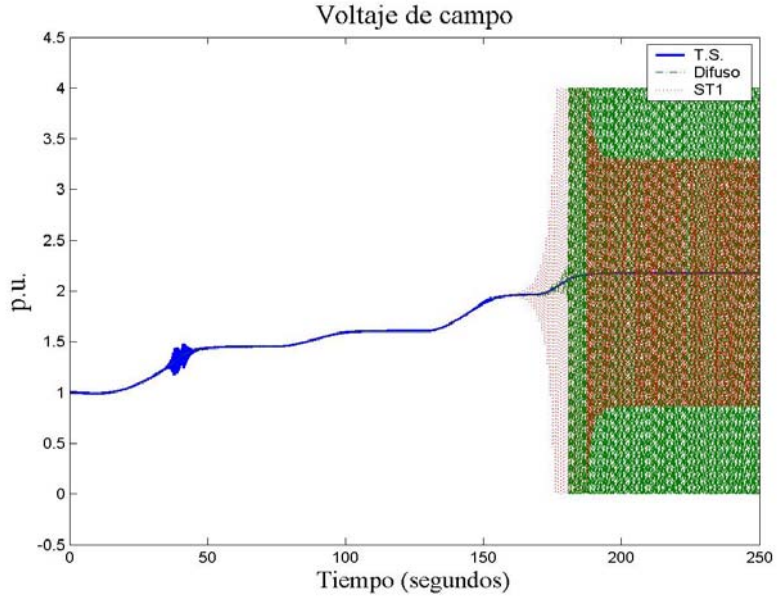



Figura 5.9 (d) Comportamiento de la potencia reactiva




5.9 (e).Comportamiento del voltaje de campo.

**Figura 5.9** Comportamiento del Generador síncrono cuando existe un incremento de carga.

Los resultados mostrados en la figura 5.9 son esquemas de trabajo muy requeridos en los sistemas eléctricos de potencia con respecto al desempeño del generador síncrono, tal como se puede observar a través del comportamiento de la potencia activa y el voltaje en terminales TS logra mantener a través del sistema de excitación la regulación deseada ante un incremento considerable de carga en un intervalo de tiempo muy reducido. Con respecto a las tablas del experto (de reglas lingüísticas) el controlador difuso comienza con las tabla estática establecida en el apéndice A para 5 funciones de membresía y es optimizada por la búsqueda durante toda la simulación y la tabla final resultante es la misma debido a que TS en el segundo 200 ha reincorporado todas las acciones lingüísticas ventaja de emplear intervalos pequeños para tabú sumado y eliminado, por otro lado la regulación realizada a través del regulador convencional no logra que la máquina permanezca en régimen permanente (figura 5.9 b) al final de la simulación.

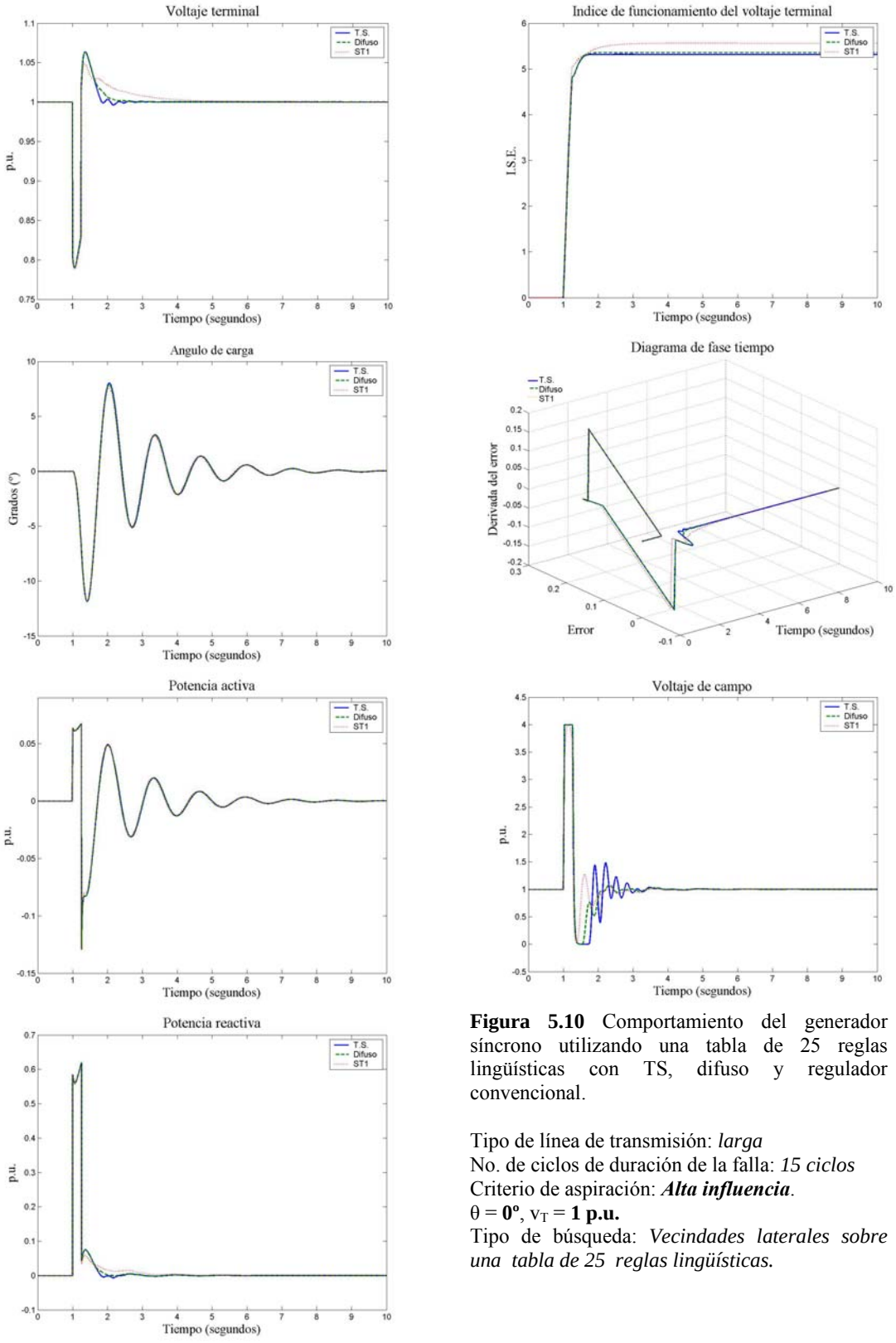



**Figura 5.10** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: *15 ciclos*
Criterio de aspiración: ***Alta influencia***.
$\theta$ = **0º**, $v_T$ = **1 p.u.**
Tipo de búsqueda: *Vecindades laterales sobre una tabla de 25 reglas lingüísticas.*

En la figura 5.11 se presentan algunas de las tablas resultantes después de la aplicación de TS por el criterio de alta influencia correspondientes a las pruebas presentadas en las figuras 5.10.

| ***Δe*** \| ***e*** | **NGR** | **NME** | **ZE** | **PME** | **PGR** |
|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | NG | NG | NG | NM | CE |
| **NME** | NG | NM | NM | CE | AM |
| **ZE** | NG | NM | CE | AM | AG |
| **PME** | NM | CE | AM | AG | AG |
| **PGR** | CE | PM | AG | AG | AG |

5.11. (a) tabla de reglas lingüísticas resultante

| ***Δe*** \| ***e*** | **NGR** | **NME** | **ZE** | **PME** | **PGR** |
|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | NG | NG | NG | NM | CE |
| **NME** | NG | NM | NM | CE | AM |
| **ZE** | NG | NM | CE | AM | AG |
| **PME** | NM | CE | AM | AG | AG |
| **PGR** | CE | PM | AG | AG | AG |

5.11. (b) diagrama de fase lingüístico

| ***Δe*** \| ***e*** | **NGR** | **NME** | **ZE** | **PME** | **PGR** |
|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **NME** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **ZE** | **6** | 0 | 0 | **5** | **6** |
| **PME** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **PGR** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

5.11. (c) memoria de frecuencia

| ***Δe*** \| ***e*** | **NGR** | **NME** | **ZE** | **PME** | **PGR** |
|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **NME** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **ZE** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **PME** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **PGR** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

5.11. (d) memoria explicita

**Figura 5.11.** Tablas resultantes después de la aplicación de TS por el criterio de aspiración de alta influencia con $\theta = 0^{o}$, $v_T = 1.0$ p.u. y simulando una duración de falla de 15 ciclos.

Las estructuras mostradas en la figura 5.11 son las estructuras finales obtenidas por TS en base a una búsqueda de características que describen la mejor tabla encontrada para este punto de operación en particular debido a que las estructuras encontradas hasta aquí serán las estructuras funcionales para los puntos de operación donde la potencia activa es mayor a 0 p.u.

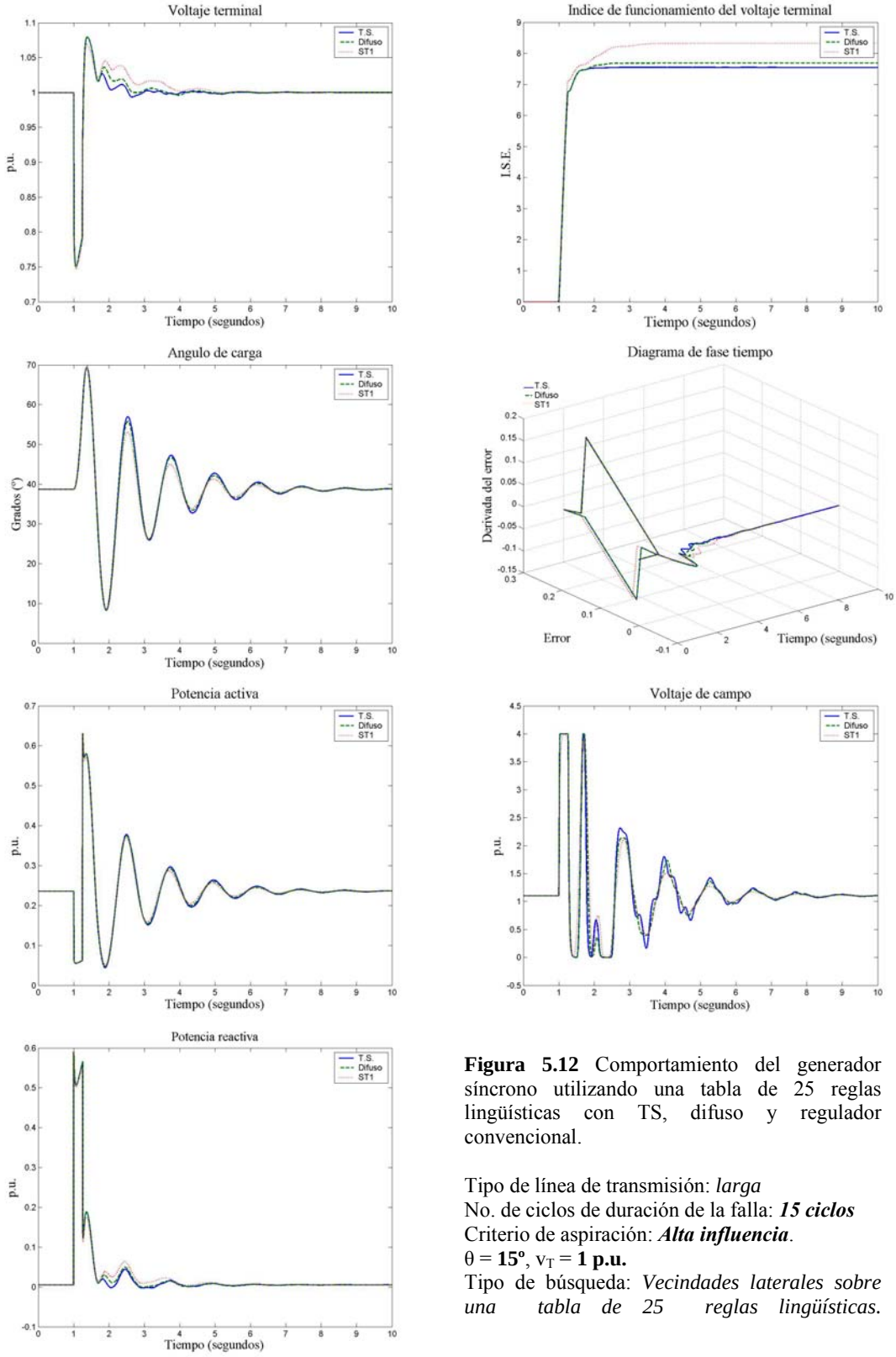



**Figura 5.12** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: ***15 ciclos***
Criterio de aspiración: ***Alta influencia***.
$\theta$ = **15º**, $v_T$ = **1 p.u.**
Tipo de búsqueda: *Vecindades laterales sobre una tabla de 25 reglas lingüísticas.*

En la figura 5.13 se presentan algunas de las tablas resultantes después de la aplicación de TS por el criterio de alta influencia correspondientes a las pruebas presentadas en las figuras 5.12.

| ***Δe*** \| ***e*** | **NGR** | **NME** | **ZE** | **PME** | **PGR** |
|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | NG | NG | NG | NM | CE |
| **NME** | NG | NG | NM | CE | AM |
| **ZE** | NG | NM | CE | AM | AG |
| **PME** | NM | CE | AM | AM | AG |
| **PGR** | CE | PM | AG | AG | AG |

5.13. (a) tabla de reglas lingüísticas resultante

| ***Δe*** \| ***e*** | **NGR** | **NME** | **ZE** | **PME** | **PGR** |
|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | NG | NG | NG | NM | CE |
| **NME** | NG | NG | NM | CE | AM |
| **ZE** | NG | NM | CE | AM | AG |
| **PME** | NM | CE | AM | AM | AG |
| **PGR** | CE | PM | AG | AG | AG |

5.13. (b) Diagrama de fase lingüístico

| ***Δe*** \| ***e*** | **NGR** | **NME** | **ZE** | **PME** | **PGR** |
|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| **NME** | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| **ZE** | 3 | 0 | 0 | 0 | 6 |
| **PME** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **PGR** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

5.13. (c) Memoria de frecuencia

| ***Δe*** \| ***e*** | **NGR** | **NME** | **ZE** | **PME** | **PGR** |
|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **NME** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **ZE** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **PME** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **PGR** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

5.13. (d) memoria explicita

**Figura 5.13**.Tablas resultantes después de la aplicación de TS por el criterio de aspiración de alta influencia con $\theta = 15^{o}$, $v_T = 1.0$ p.u. y simulando una duración de falla de 15 ciclos.

En las figuras 5.13 se muestran las estructuras finales encontradas por TS después de sintonizar la tabla de reglas lingüísticas con una duración de simulación de 10 segundos (tiempo máquina), tales estructuras muestran las soluciones óptimas correspondientes a la tabla de reglas lingüísticas que puede mejorar el comportamiento del control difuso sintonizado manualmente.

La memoria explicita y de frecuencia presentadas en las figuras 5.13 (c) y 5.13 (d) muestran en todos sus elementos la cantidad de cero esto refleja que TS no ha realizado un movimiento en la solución élite durante el último segundo debido ha que TS encontró una solución cercana al óptimo global o la solución óptima.

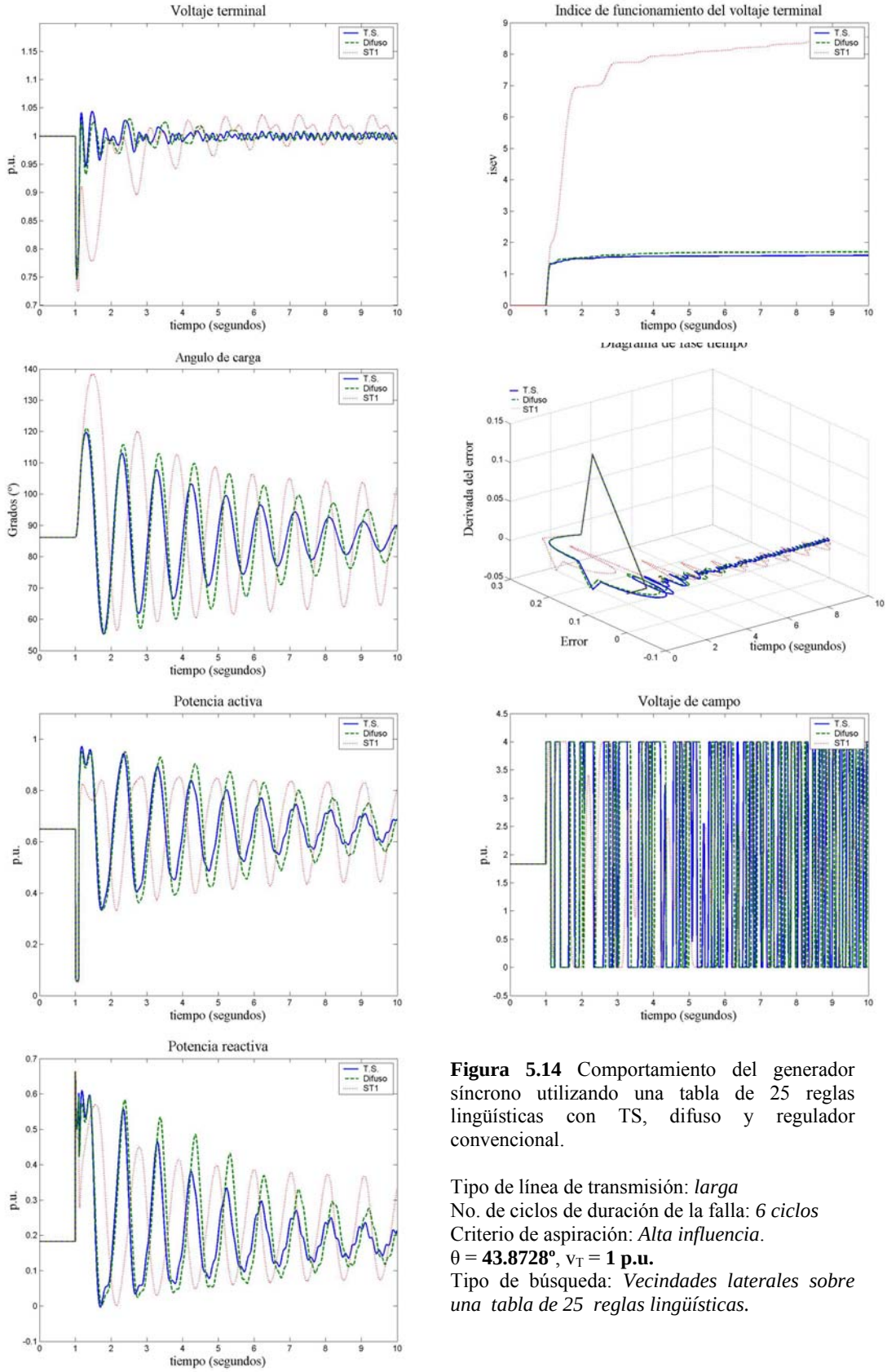



**Figura 5.14** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: *6 ciclos*
Criterio de aspiración: *Alta influencia*.
$\theta$ = **43.8728º**, $v_T$ = **1 p.u.**
Tipo de búsqueda: *Vecindades laterales sobre una tabla de 25 reglas lingüísticas.*

En la figura 5.15 se presentan algunas de las tablas resultantes después de la aplicación de TS por el criterio de alta influencia correspondientes a las pruebas presentadas en las figuras 5.14.

| ***Δe*** \| ***e*** | **NGR** | **NME** | **ZE** | **PME** | **PGR** |
|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | NG | NG | NG | NM | CE |
| **NME** | NG | NM | **NG** | CE | **AG** |
| **ZE** | NG | **NG** | CE | **AG** | AG |
| **PME** | NM | **AM** | AM | AM | AG |
| **PGR** | CE | AM | AG | AG | AG |

5.15. (a) tabla de reglas lingüísticas resultante

| ***Δe*** \| ***e*** | **NGR** | **NME** | **ZE** | **PME** | **PGR** |
|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | NG | NG | NG | NM | CE |
| **NME** | NG | NM | NG | CE | AG |
| **ZE** | NG | NG | CE | AG | AG |
| **PME** | NM | AM | AM | AM | AG |
| **PGR** | CE | AM | AG | AG | AG |

5.15. (b) diagrama de fase lingüístico

| ***Δe*** \| ***e*** | **NGR** | **NME** | **ZE** | **PME** | **PGR** |
|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **NME** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **ZE** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **PME** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **PGR** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

5.15. (c) Memoria explícita.

| ***Δe*** \| ***e*** | **NGR** | **NME** | **ZE** | **PME** | **PGR** |
|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | 0 | 0 | **2** | 0 | 0 |
| **NME** | 0 | 0 | 0 | **1** | **1** |
| **ZE** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **PME** | **21** | 0 | **15** | 0 | 1 |
| **PGR** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

5.15. (c) memoria de frecuencia

**Figura 5.15** Tablas resultantes después de la aplicación de TS por el criterio de aspiración de alta influencia con $\theta = 43.8728^{o}$, $v_T = 1.0$ p.u. y simulando una falla con una duración de 6 ciclos.

En la figura 5.15 la tabla final construida por TS no es muy diferente de la tabla estática, esto indica dos características: (1) La tabla encontrada en vacío fue la óptima y (2) se trata de un espacio pequeño, cualidad que refleja la capacidad de análisis de la búsqueda tabú sobre diversos tamaños de espacio. La tabla de la figura 5.15 (a) indica una serie corta de movimientos que son influenciados por la propia calidad de las acciones lingüísticas y en base al análisis de la función objetivo después de la falla, la forma exacta de conocer en realidad cuantos movimientos se realizaron durante la simulación es observar la tabla de frecuencia que indica cuantas veces una acción fue introducida a la estructura elite. El diagrama de fase lingüístico indica dos trabajos de optimización: (a) La diversificación de exploración de zonas (que nos permite no utilizar aún la teoría del caos) y (b) la ruta de búsqueda intensiva de acciones que mejoren la solución actual.

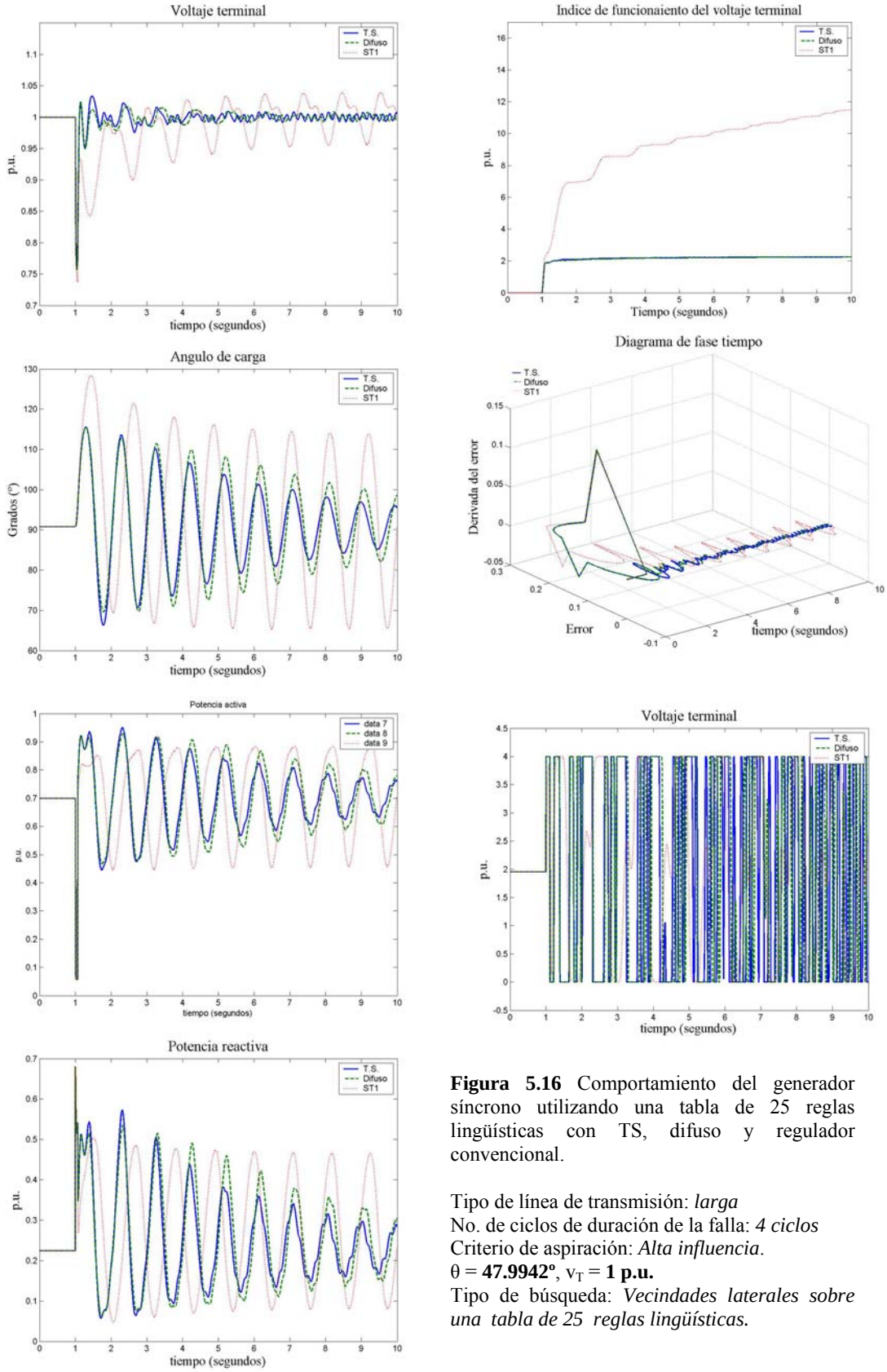



**Figura 5.16** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: *4 ciclos*
Criterio de aspiración: *Alta influencia*.
$\theta$ = **47.9942º**, $v_T$ = **1 p.u.**
Tipo de búsqueda: *Vecindades laterales sobre una tabla de 25 reglas lingüísticas.*

En la figura 5.17 se presentan algunas de las tablas resultantes después de la aplicación de TS por el criterio de alta influencia correspondientes a las pruebas presentadas en las figuras 5.16.

| ***Δe*** \| ***e*** | **NGR** | **NME** | **ZE** | **PME** | **PGR** |
|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | NG | NG | NG | NM | CE |
| **NME** | NG | NM | **NM** | CE | **CE** |
| **ZE** | NG | **NG** | CE | **AG** | AG |
| **PME** | NM | **NM** | AM | AM | AG |
| **PGR** | CE | PM | AG | AG | AG |

5.17. (a) tabla de reglas lingüísticas resultante

| ***Δe*** \| ***e*** | **NGR** | **NME** | **ZE** | **PME** | **PGR** |
|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | NG | NG | NG | NM | CE |
| **NME** | NG | NM | NM | CE | CE |
| **ZE** | NG | NG | CE | AG | AG |
| **PME** | NM | NM | AM | AM | AG |
| **PGR** | CE | PM | AG | AG | AG |

5.17. (b) diagrama de fase lingüístico

| ***Δe*** \| ***e*** | **NGR** | **NME** | **ZE** | **PME** | **PGR** |
|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| **NME** | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| **ZE** | 13 | 0 | 0 | 0 | 14 |
| **PME** | 18 | 0 | 16 | 0 | 1 |
| **PGR** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

5.17. (c) memoria de frecuencia

| ***Δe*** \| ***e*** | **NGR** | **NME** | **ZE** | **PME** | **PGR** |
|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **NME** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **ZE** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **PME** | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| **PGR** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

5.17. (d) memoria explicita

**Figura 5.17** Tablas resultantes después de la aplicación de TS por el criterio de aspiración de alta influencia con $\theta = 47.9942º$, $v_T = 1.0$ p.u. y simulando una duración de falla de 4 ciclos.

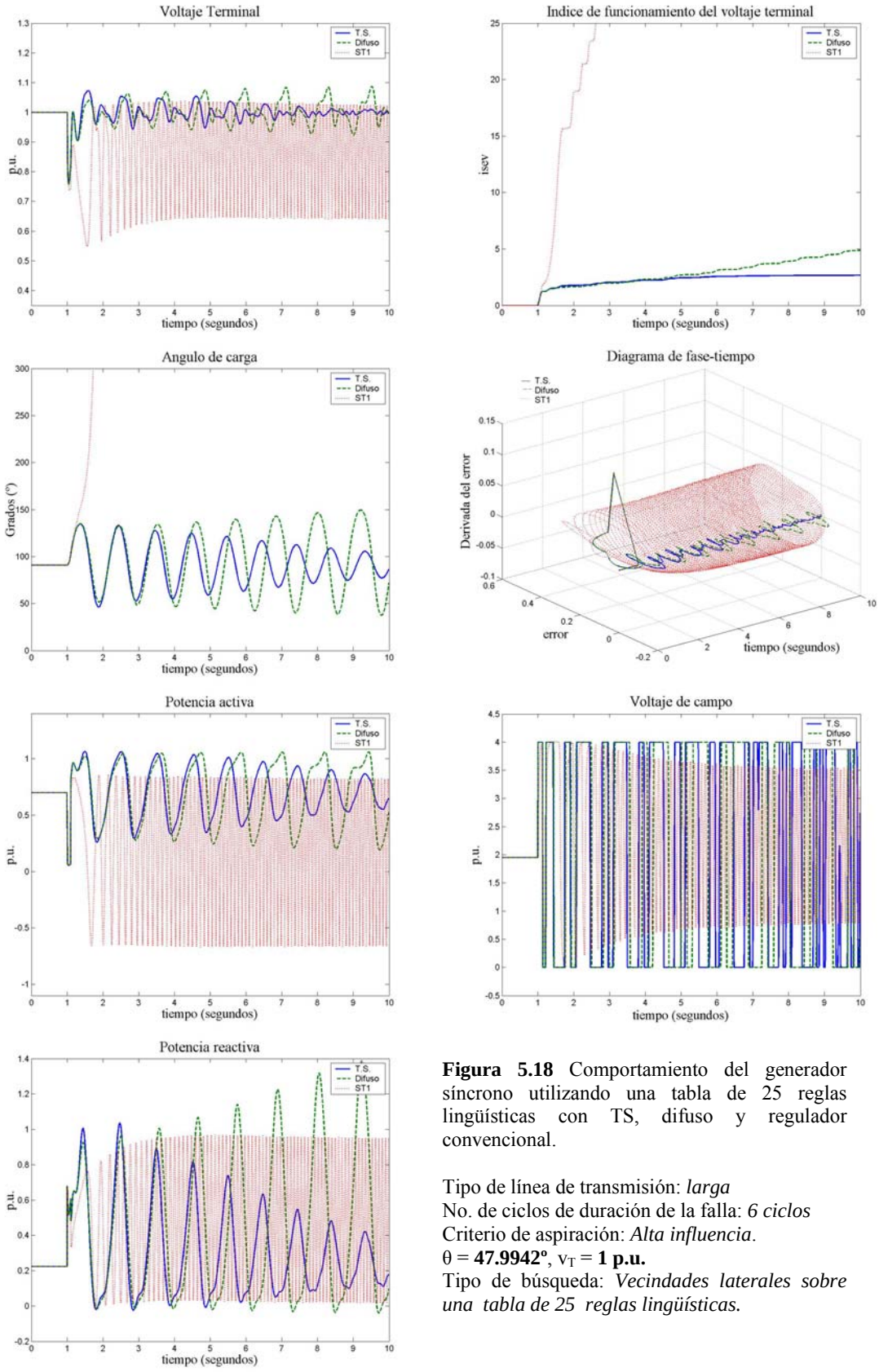



**Figura 5.18** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: *6 ciclos*
Criterio de aspiración: *Alta influencia*.
$\theta$ = **47.9942º**, $v_T$ = **1 p.u.**
Tipo de búsqueda: *Vecindades laterales sobre una tabla de 25 reglas lingüísticas.*

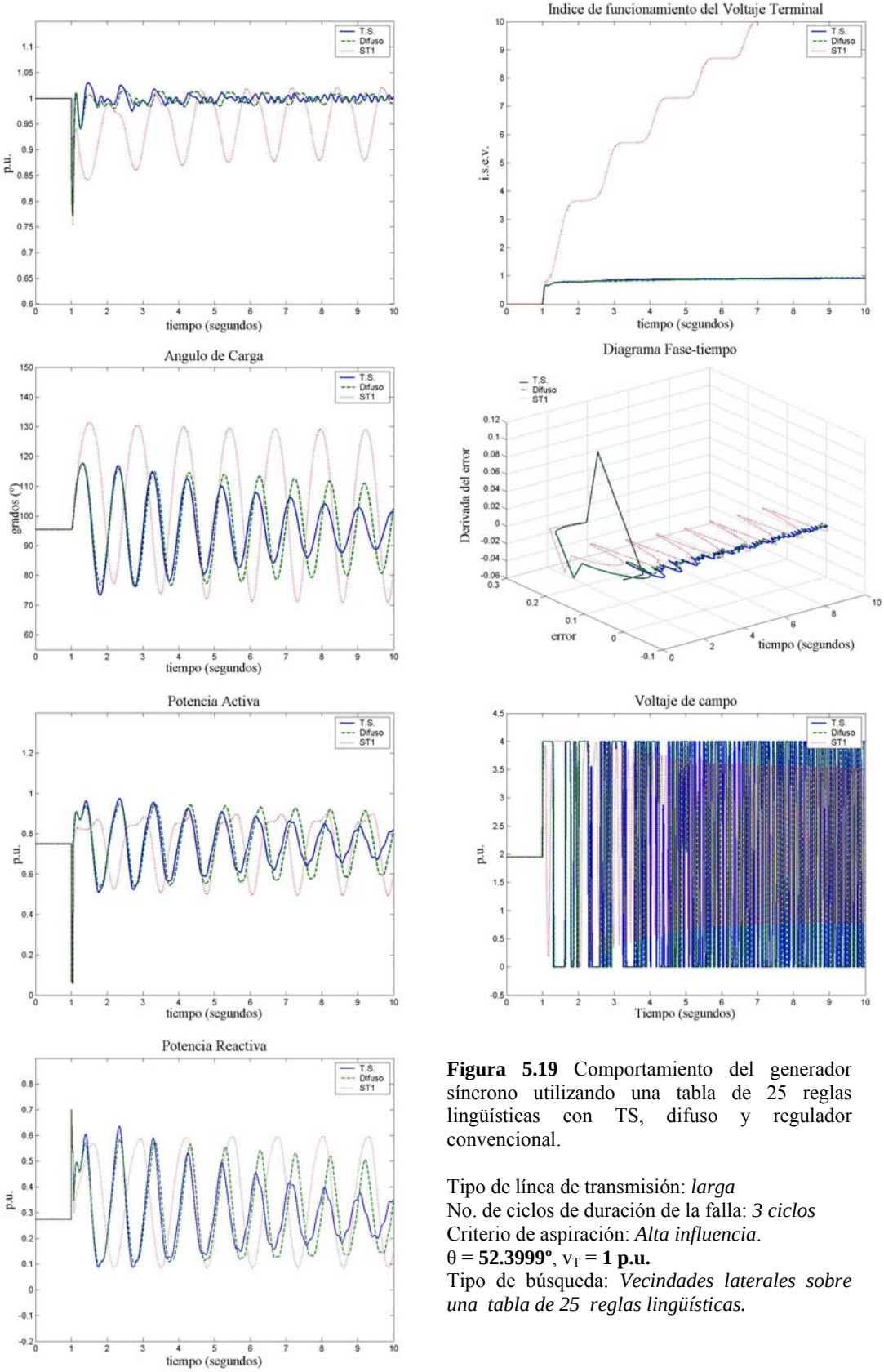



**Figura 5.19** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: *3 ciclos*
Criterio de aspiración: *Alta influencia*.
$\theta$ = **52.3999º**, $v_T$ = **1 p.u.**
Tipo de búsqueda: *Vecindades laterales sobre una tabla de 25 reglas lingüísticas.*

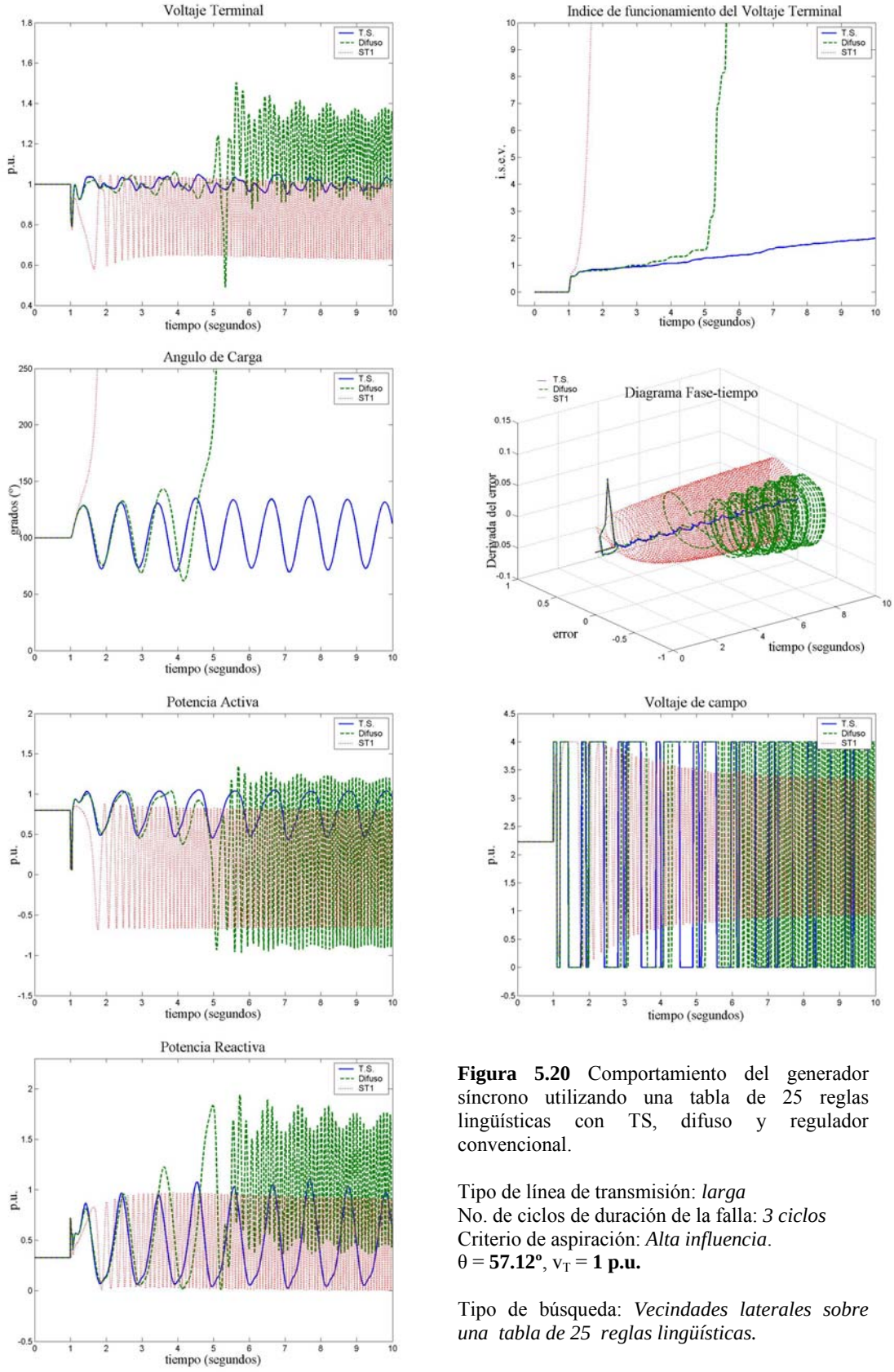



**Figura 5.20** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: *3 ciclos*
Criterio de aspiración: *Alta influencia*.
$\theta$ = **57.12º**, $v_T$ = **1 p.u.**

Tipo de búsqueda: *Vecindades laterales sobre una tabla de 25 reglas lingüísticas.*

En la figura 5.21 se presentan algunas de las tablas resultantes después de la aplicación de TS por el criterio de alta influencia correspondientes a las pruebas presentadas en las figuras 5.20.

| ***Δe*** \ ***e*** | **NGR** | **NME** | **ZE** | **PME** | **PGR** |
|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | NG | NG | NG | NM | CE |
| **NME** | NG | NM | NM | CE | AM |
| **ZE** | NG | **NG** | CE | **AG** | AG |
| **PME** | NM | NM | AM | AM | AG |
| **PGR** | CE | PM | AG | AG | AG |

5.21. (a) tabla de reglas lingüísticas resultante

| ***Δe*** \ ***e*** | **NGR** | **NME** | **ZE** | **PME** | **PGR** |
|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | NG | NG | NG | NM | CE |
| **NME** | NG | NM | NM | CE | AM |
| **ZE** | NG | NG | CE | AG | AG |
| **PME** | NM | NM | AM | AM | AG |
| **PGR** | CE | PM | AG | AG | AG |

5.21. (b) diagrama de fase lingüístico

| ***Δe*** \ ***e*** | **NGR** | **NME** | **ZE** | **PME** | **PGR** |
|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **NME** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **ZE** | 0 | 0 | 0 | **1** | **1** |
| **PME** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **PGR** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

5.21. (c) memoria explicita

| ***Δe*** \ ***e*** | **NGR** | **NME** | **ZE** | **PME** | **PGR** |
|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| **NME** | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| **ZE** | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 |
| **PME** | 10 | 0 | 0 | 2 | 0 |
| **PGR** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

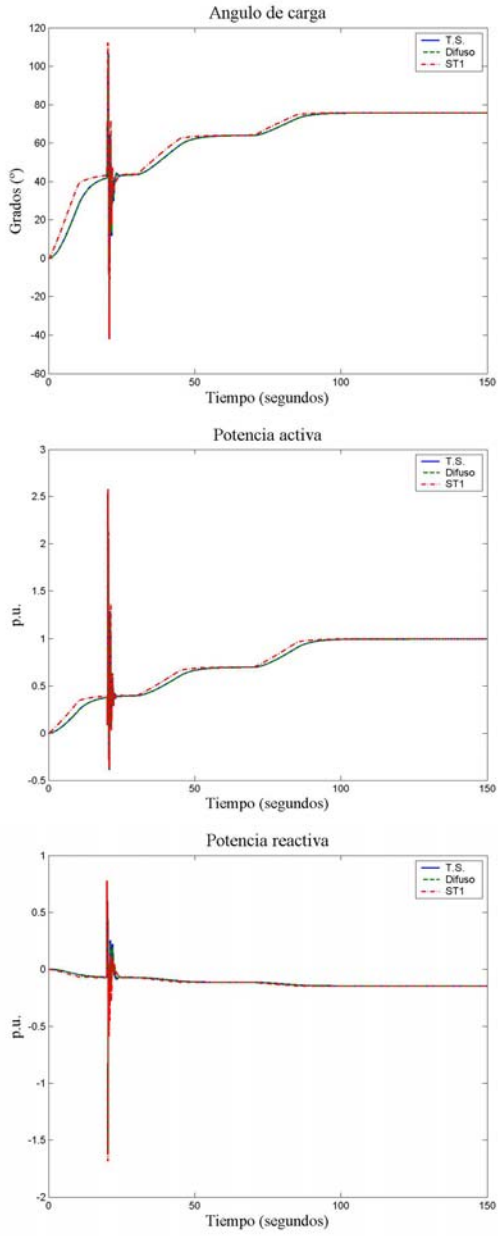
5.21. (c) memoria de frecuencia

**Figura 5.21.** Tablas resultantes después de la aplicación de TS por el criterio de aspiración de alta influencia con $\theta = 57.19º$, $v_T = 1.0$ p.u. y simulando una duración de falla de 2ciclos.

En esta prueba se empleo como tabla de reglas inicial la encontrada durante la prueba de la figura 5.16 (ver figura 5.17) y se puede observar que la tabla final de reglas lingüísticas encontrada en la figura 5.21(a) es idéntica a la mostrada en la figura 5.17 (a) debido a que la optimización no existió porque la tabla inicial empleada para los resultados en la prueba de la figura 5.20 fue la ideal en tal punto de operación, la memoria de frecuencia solo muestra el análisis desarrollado por la búsqueda por tabú durante el análisis de las vecindades.

### *5.3.3 RESULTADOS OBTENIDOS DESPUÉS DE REALIZAR UNA PRUEBA DE AUTOSINTONIZACIÓN SOBRE UNA TABLA DE 25 REGLAS LINGÜÍSTICAS POR EL CRITERIO DE ALTA INFLUENCIA EMPLEANDO UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN CORTA.*

En la figura 5.22 se simula el comportamiento del generador ante incremento de carga partiendo desde vacío hasta Pa = 1.0 p.u. y simulando una falla de 20 ciclos de duración cuando t = 20 segundos.



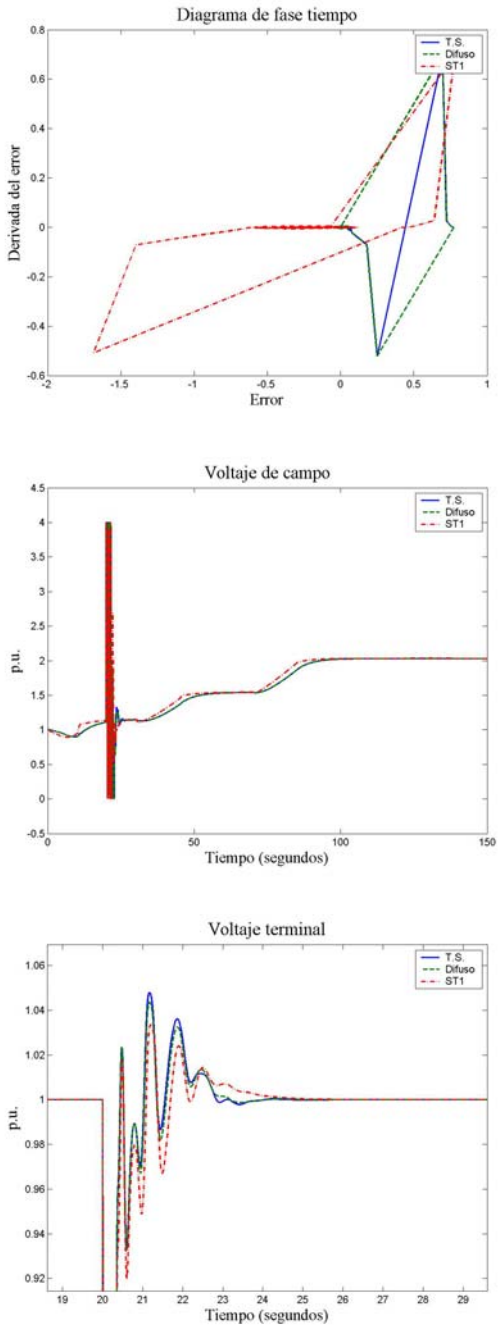




**Figura 5.22. (a).** Incremento de UG y simulación de una falla cuando t = 20 segundos con una duración de 20 ciclos.

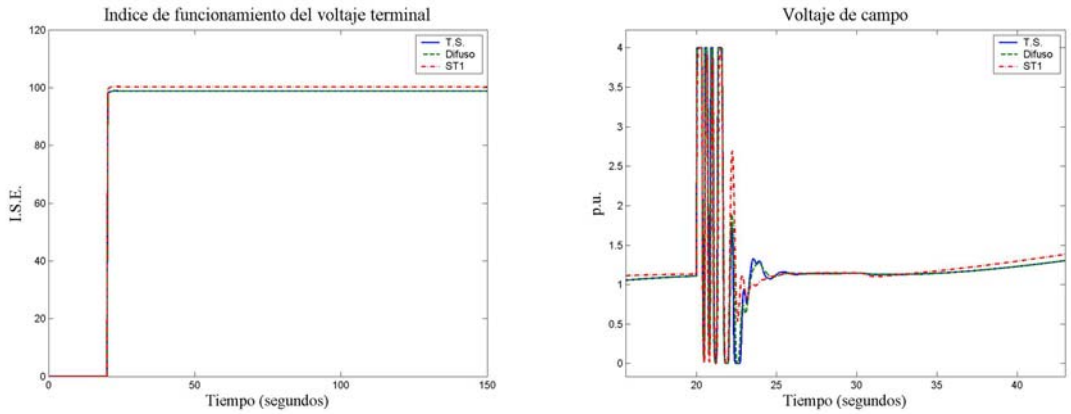



**Figura 5.22. (b).** Simulación del generador desde el punto de vacío donde la potencia activa igual a 0 p.u. hasta un punto donde la potencia activa es igual a 1.0 p.u. simulando también una falla cuando t = 20 seg. Con una duración de 20 ciclos.

| *Δe* \ *e* | **NGR** | **NME** | **ZE** | **PME** | **PGR** |
|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | NG | NG | NG | NM | CE |
| **NME** | NG | NM | NM | CE | AM |
| **ZE** | NG | NM | CE | AM | AG |
| **PME** | NM | CE | AM | AM | AG |
| **PGR** | CE | PM | AG | AG | AG |

5.23 (a) Diagrama de fase tiempo

| *Δe* \ *e* | **NGR** | **NME** | **ZE** | **PME** | **PGR** |
|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | NG | NG | NG | NM | CE |
| **NME** | NG | NM | NM | CE | AM |
| **ZE** | NG | NG | CE | AG | AG |
| **PME** | NM | CE | AM | AM | AG |
| **PGR** | CE | PM | AG | AG | AG |

5.23 (b) Espacio X resultante después de la liberación de la falla.

| *Δe* \ *e* | **NGR** | **NME** | **ZE** | **PME** | **PGR** |
|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| **NME** | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 |
| **ZE** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **PME** | 0 | 0 | 2 | 0 | 3 |
| **PGR** | 0 | 0 | 2 | 1 | 0 |

5.23 (c) Memoria de frecuencia.

| *Δe* \ *e* | **NGR** | **NME** | **ZE** | **PME** | **PGR** |
|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | NG | NG | NG | NM | CE |
| **NME** | NG | NM | NM | CE | AM |
| **ZE** | NG | **NG** | CE | **AG** | AG |
| **PME** | NM | CE | AM | AM | AG |
| **PGR** | CE | PM | AG | AG | AG |

Figura 5.23 Tabla de reglas lingüísticas resultante.

**Figura 5.23.** Estructuras asociadas a la búsqueda por tabú simulando el generador durante 150 segundos con una falla de 20 ciclos cuando t = 20 segundos correspondiente a la figura 5.23.

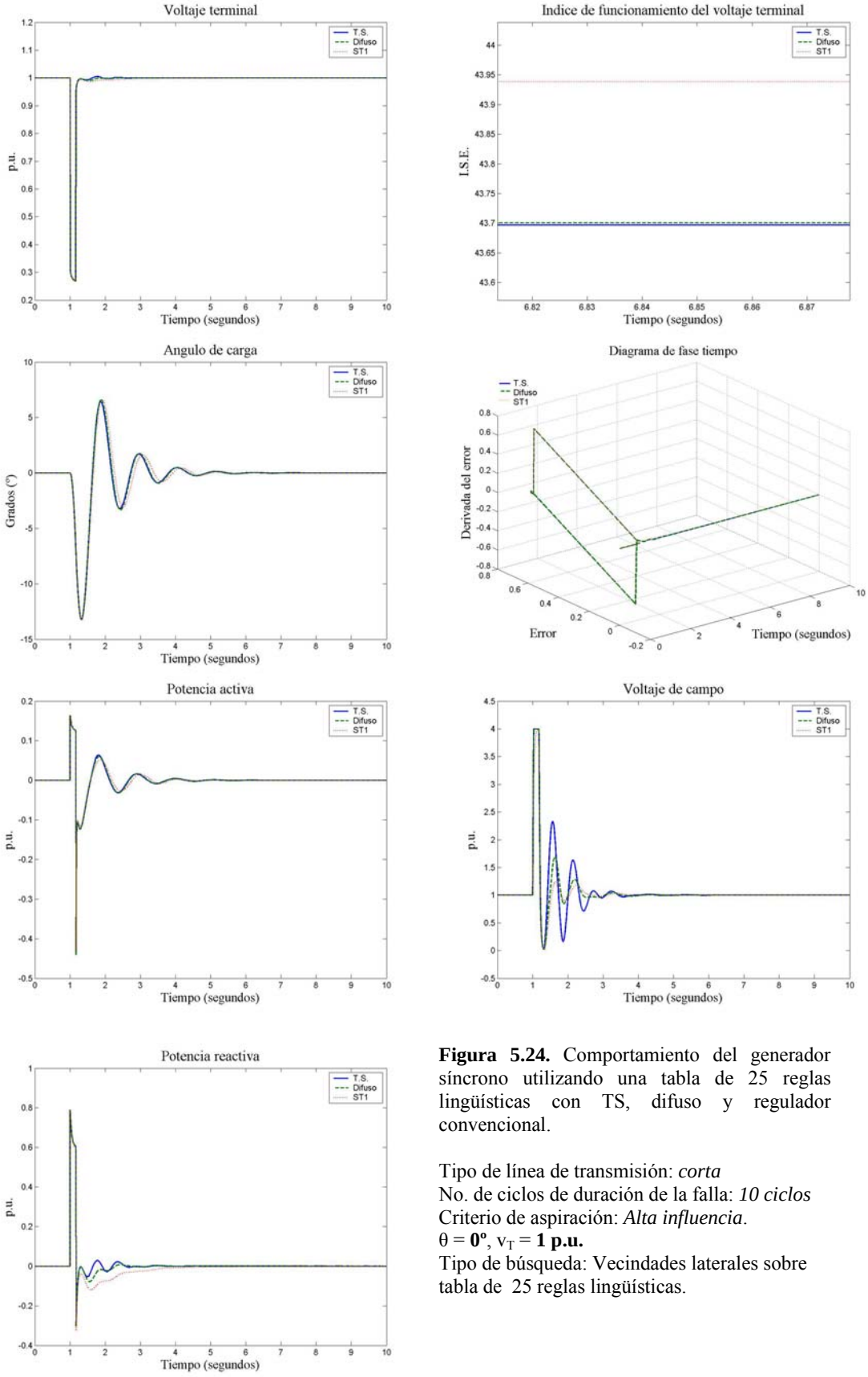



**Figura 5.24.** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: *corta*
No. de ciclos de duración de la falla: *10 ciclos*
Criterio de aspiración: *Alta influencia*.
$\theta$ = **0º**, $v_T$ = **1 p.u.**
Tipo de búsqueda: Vecindades laterales sobre tabla de 25 reglas lingüísticas.

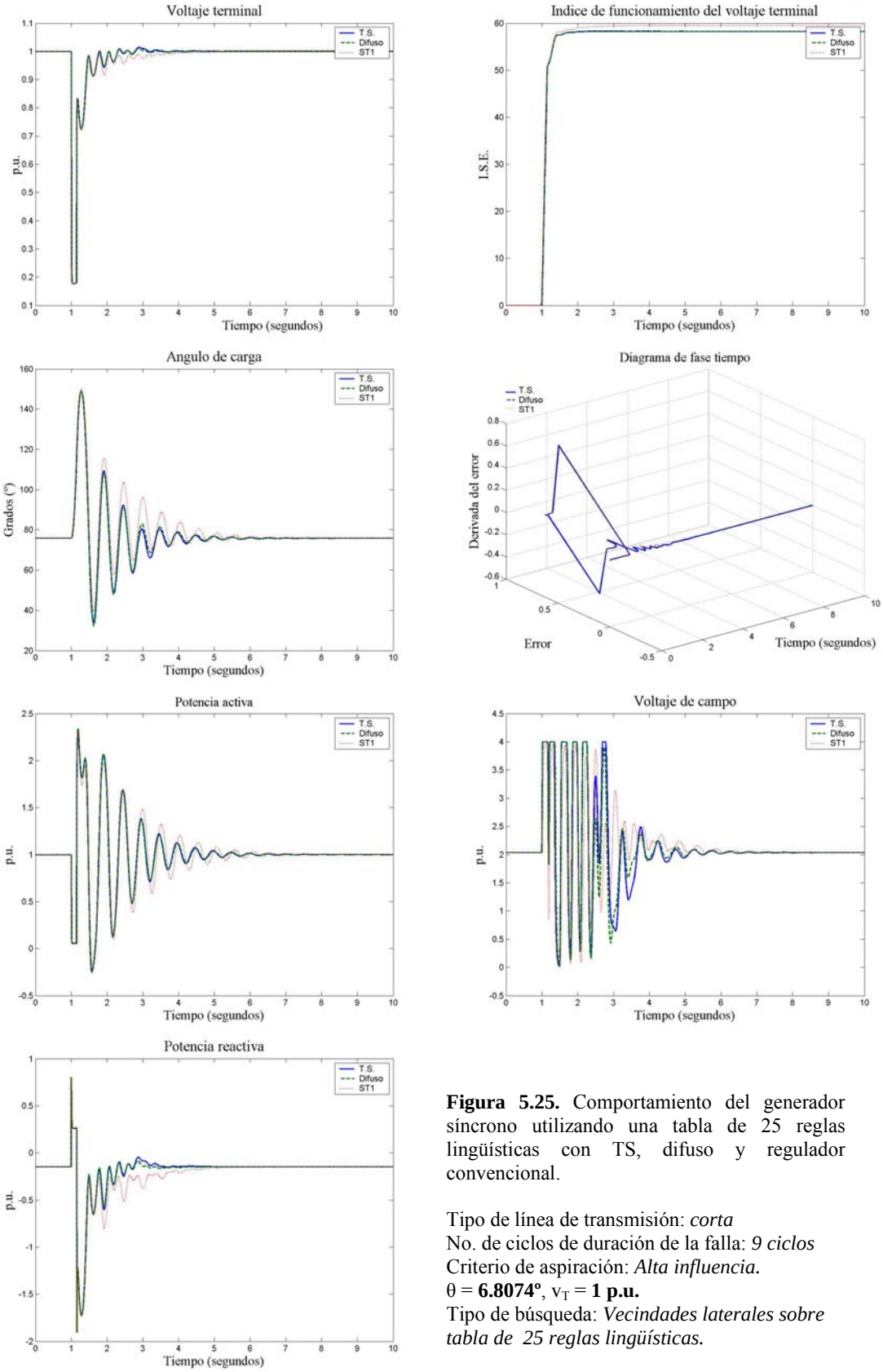



**Figura 5.25.** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: *corta*
No. de ciclos de duración de la falla: *9 ciclos*
Criterio de aspiración: *Alta influencia.*
$\theta$ = **6.8074º**, $v_T$ = **1 p.u.**
Tipo de búsqueda: *Vecindades laterales sobre tabla de 25 reglas lingüísticas.*

### *5.3.4 RESULTADOS OBTENIDOS DESPUÉS DE REALIZAR UNA PRUEBA DE AUTOSINTONIZACIÓN SOBRE UNA TABLA DE 25 REGLAS LINGÜÍSTICAS POR EL CRITERIO DE BAJA INFLUENCIA EMPLEANDO UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN LARGA.*

A continuación se muestran las características de la prueba:

Se realiza una comparación gráfica entre:

a) Aplicación del control difuso empleando una tabla de 25 reglas lingüísticas sintonizado manualmente.
b) Aplicación del control difuso sintonizado automáticamente por el empleo de una búsqueda por tabú enfocada sobre la tabla de 25 reglas lingüísticas ***sobre vecindades laterales***.
c) Aplicación del regulador convencional tipo ST1 (tipo proporcional)

Donde se tienen los siguientes datos:

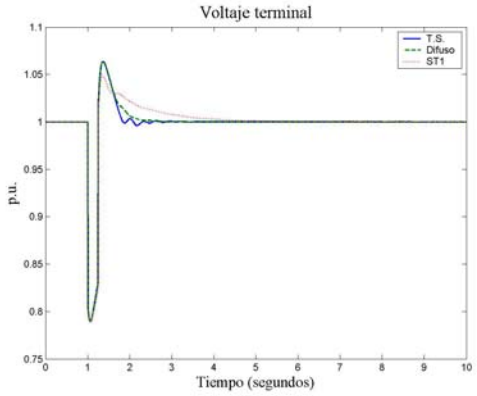
- Tipo de línea de transmisión: Larga
- Criterio de influencia: Baja
- Tipo de Falla: Corto circuito(Trifásica)
- No. de ciclos de Falla: Indicados en cada punto de operación (cada figura).

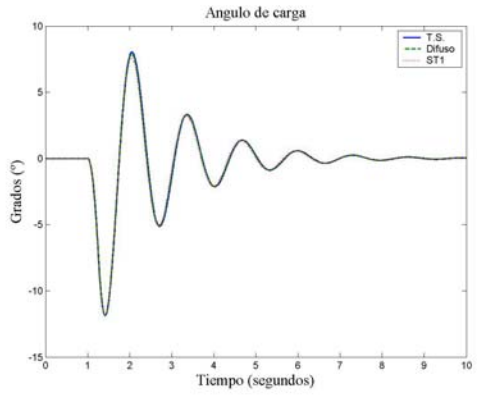
Los resultados presentados son los correspondientes a las figuras 5.26 A 5.40.

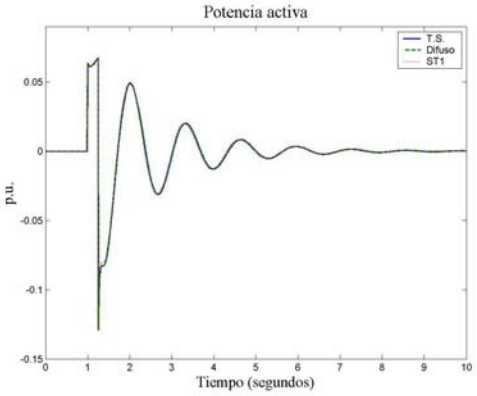
En esta sección se muestran todos aquellos resultados obtenidos después de realizar una prueba utilizando la búsqueda por tabú por el criterio de baja influencia indicando el número de ciclos de falla en cada prueba en cada figura y realizando la comparación gráfica con las técnicas de control previamente descritas en el capítulo 4.

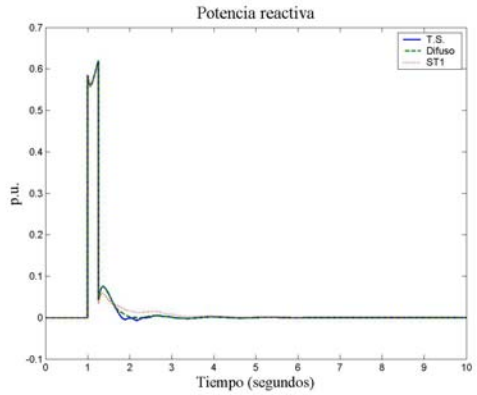
El análisis entre la diferencia de utilizar un criterio de alta influencia y un criterio de baja influencia será presentado en la sección ***5.3.10*** donde se indican las características principales sobre el trabajo realizado por un criterio y otro.

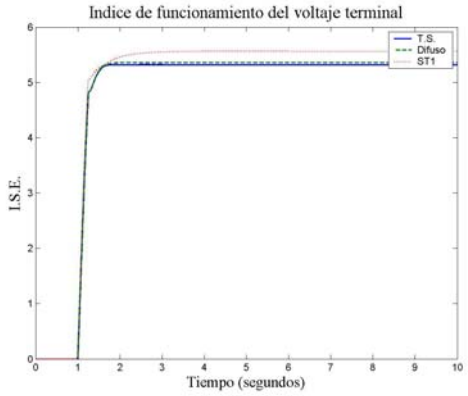
En las gráficas 5.10 y 5.26 son casi idénticas esto se debe a que ambos criterios (alta influencia y baja influencia) tomaron las mismas decisiones al comienzo y un par de segundos después no hubo que rectificar la trayectoria del voltaje de campo, esta característica no siempre se cumple en todos los puntos de operación de la máquina ni cuando esta trabaja en vacío; dependerá básicamente de las memorias de largo plazo y las multas e incentivos establecidas por TS.

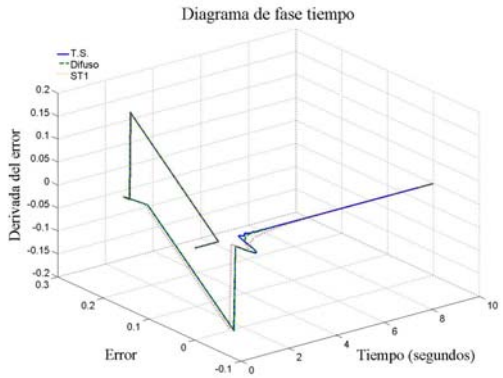


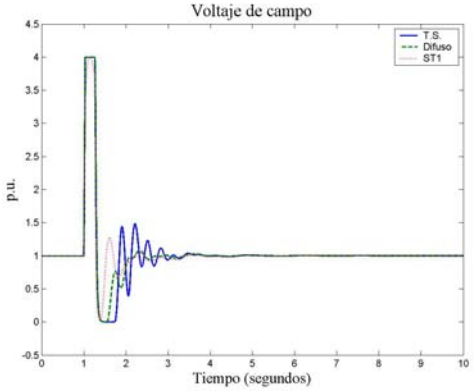




**Figura 5.26** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: *15 ciclos*
Criterio de aspiración: ***Baja influencia***.
$\theta$ = **0º**, $v_T$ = **1 p.u.**
Tipo de búsqueda: *Vecindades laterales en tabla de reglas lingüísticas.*

En las figuras 5.28 y 5.29 se presentan algunas de las tablas resultantes después de la aplicación de TS por el criterio de Baja influencia empleando una búsqueda por vecindades laterales correspondiente a la figura 5.26 y la figura 5.30 consecutivamente.

| *Δe* \ *e* | NGR | NME | ZE | PME | PGR |
|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | NG | NG | NG | NM | CE |
| **NME** | NG | NM | NM | CE | AM |
| **ZE** | NG | NG | CE | AM | AG |
| **PME** | NM | CE | AM | AM | AG |
| **PGR** | CE | PM | AG | AG | AG |

Figura 5.27 (a) tabla de reglas lingüísticas resultante

| *Δe* \ *e* | NGR | NME | ZE | PME | PGR |
|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | NG | NG | NG | NM | CE |
| **NME** | NG | NM | NM | CE | AM |
| **ZE** | NG | NG | CE | AM | AG |
| **PME** | NM | CE | AM | AM | AG |
| **PGR** | CE | PM | AG | AG | AG |

Figura 5.27 (b) diagrama de fase lingüístico

| *Δe* \ *e* | NGR | NME | ZE | PME | PGR |
|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **NME** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **ZE** | **6** | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **PME** | 0 | **1** | 0 | 0 | 0 |
| **PGR** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Figura 5.27 (c) memoria de frecuencia

| *Δe* \ *e* | NGR | NME | ZE | PME | PGR |
|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **NME** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **ZE** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **PME** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **PGR** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Figura 5.27 (d) memoria explicita

**Figura 5.27** Tablas resultantes después de la aplicación de TS por el criterio de aspiración de Baja influencia con $\theta = 0^{o}$, $v_T = 1.0$ p.u. y simulando una duración de falla de 25 ciclos.

| *Δe* \ *e* | NGR | NME | ZE | PME | PGR |
|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | NG | NG | NG | NM | CE |
| **NME** | NG | NG | NM | CE | AM |
| **ZE** | NG | NM | CE | **AG** | AG |
| **PME** | NM | CE | AM | AG | AG |
| **PGR** | CE | PM | AG | AG | AG |

Figura 5.28 (a) Tabla de reglas lingüísticas resultante

| *Δe* \ *e* | NGR | NME | ZE | PME | PGR |
|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | NG | NG | NG | NM | CE |
| **NME** | NG | NG | NM | CE | AM |
| **ZE** | NG | NM | CE | AG | AG |
| **PME** | NM | CE | AM | AG | AG |
| **PGR** | CE | PM | AG | AG | AG |

Figura 5.28 (b) diagrama de fase lingüístico

| *Δe* \ *e* | NGR | NME | ZE | PME | PGR |
|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **NME** | 0 | **4** | 0 | 0 | 0 |
| **ZE** | 0 | 0 | 0 | **2** | 0 |
| **PME** | 0 | 0 | 0 | **3** | 0 |
| **PGR** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Figura 5.28 (c) memoria de frecuencia

| *Δe* \ *e* | NGR | NME | ZE | PME | PGR |
|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **NME** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **ZE** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **PME** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **PGR** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Figura 5.28 (d) memoria explicita

**Figura 5.28** Tablas resultantes después de la aplicación de TS por el criterio de aspiración de Baja influencia con $\theta = 20^{o}$, $v_T = 1.0$ p.u. y simulando una duración de falla de 15 ciclos.

En las figuras 5.27 y 5.28 se muestran las estructuras resultantes después de aplicar TS por el criterio de baja influencia sobre una tabla de 25 reglas lingüísticas, dichas estructuras muestran poca ocurrencia de movimientos sobre la tabla de reglas; esto se debe principalmente a que TS puede trabajar con espacios pequeños de búsqueda sin producir ciclos repetitivos y manteniendo una pista de las soluciones x' encontradas como buenas que pueden formar parte de la solución élite.

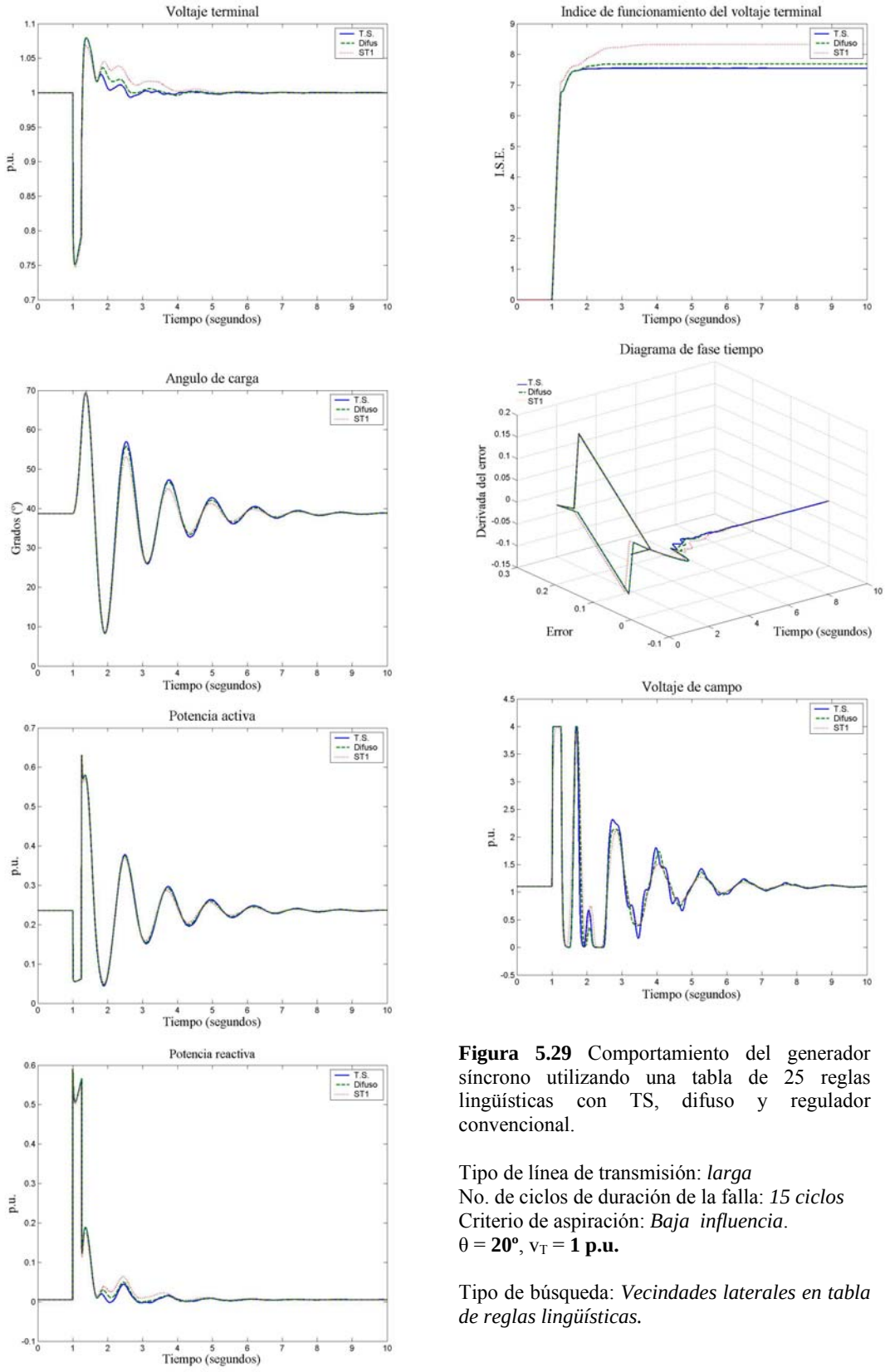



**Figura 5.29** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: *15 ciclos*
Criterio de aspiración: *Baja influencia*.
$\theta$ = **20º**, $v_T$ = **1 p.u.**

Tipo de búsqueda: *Vecindades laterales en tabla de reglas lingüísticas.*

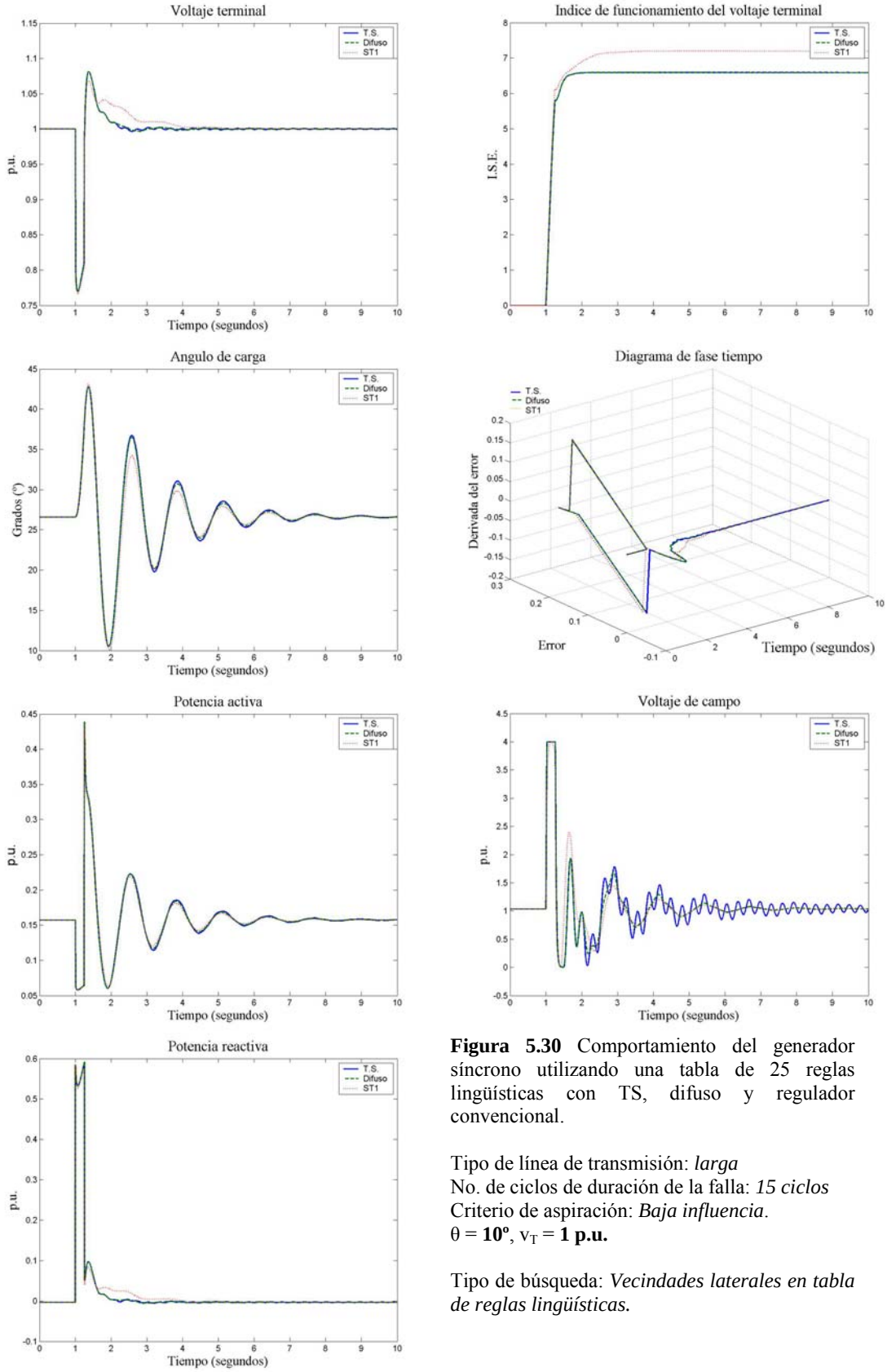



**Figura 5.30** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: *15 ciclos*
Criterio de aspiración: *Baja influencia*.
$\theta$ = **10º**, $v_T$ = **1 p.u.**

Tipo de búsqueda: *Vecindades laterales en tabla de reglas lingüísticas.*

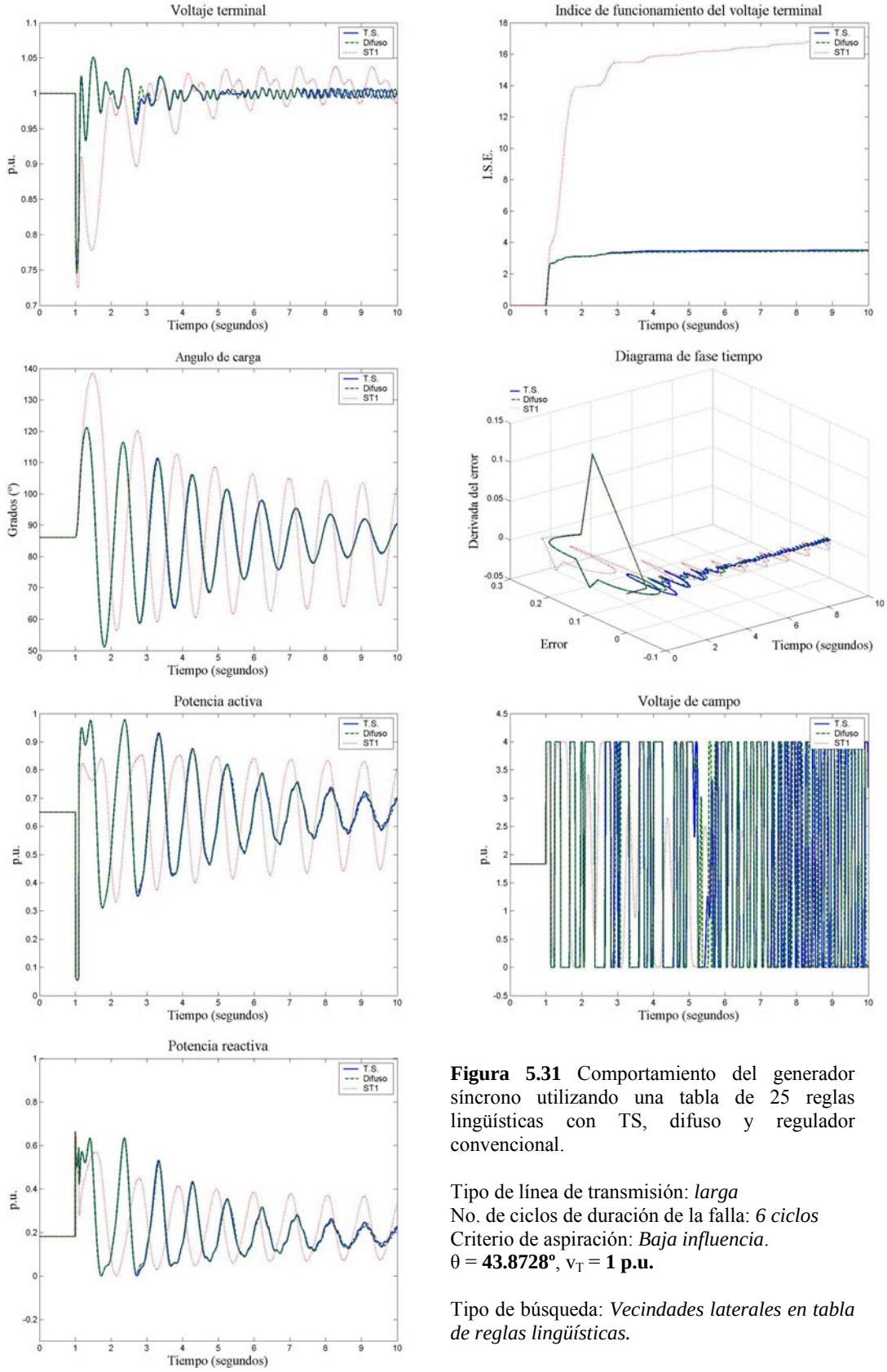



**Figura 5.31** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: *6 ciclos*
Criterio de aspiración: *Baja influencia*.
$\theta$ = **43.8728º**, $v_T$ = **1 p.u.**

Tipo de búsqueda: *Vecindades laterales en tabla de reglas lingüísticas.*

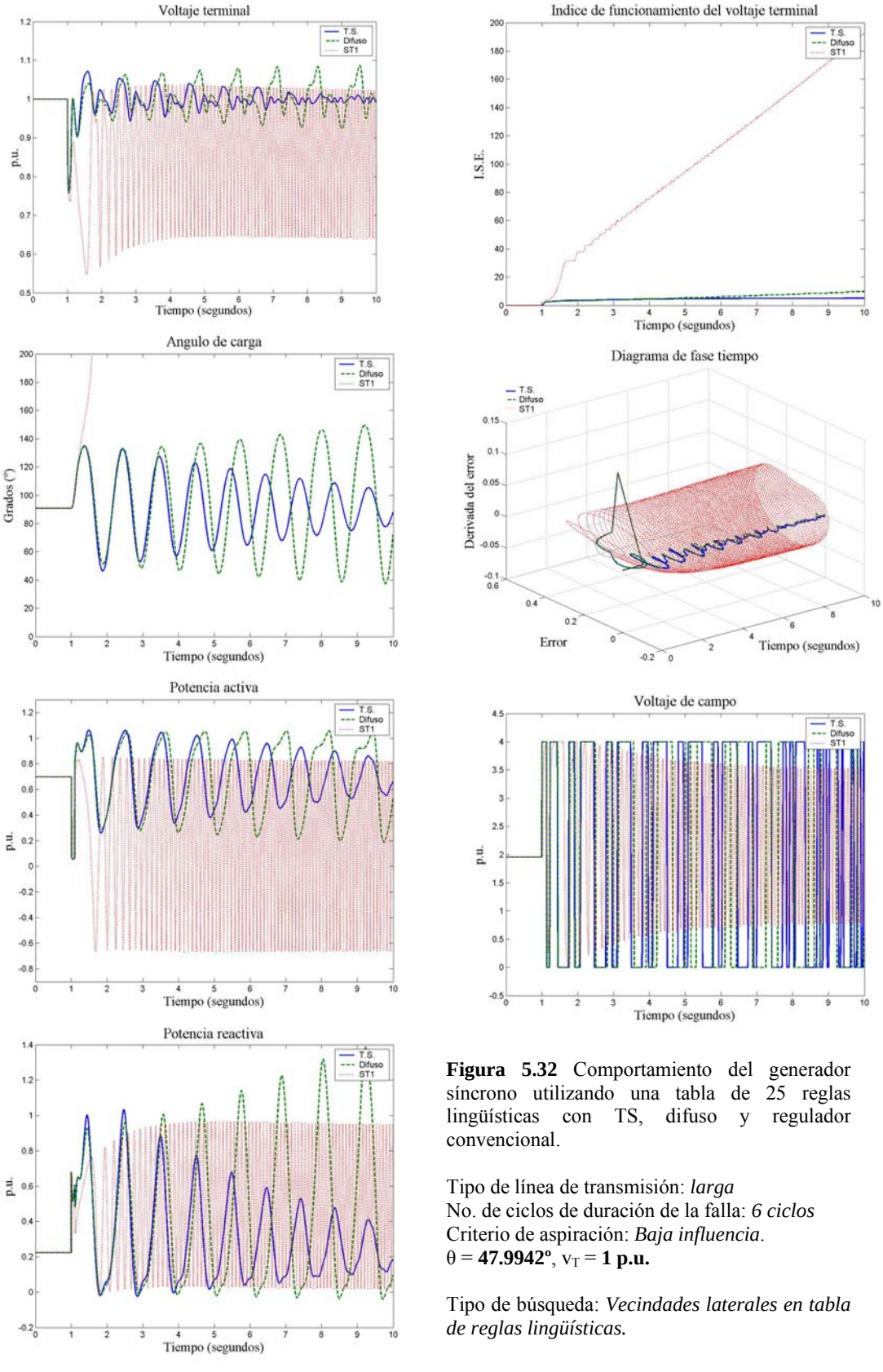



**Figura 5.32** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: *6 ciclos*
Criterio de aspiración: *Baja influencia*.
$\theta$ = **47.9942º**, $v_T$ = **1 p.u.**

Tipo de búsqueda: *Vecindades laterales en tabla de reglas lingüísticas.*

En la figura 5.33 se presentan algunas de las tablas resultantes correspondientes a la figuras 5.32 después de la aplicación de TS por el criterio de Baja influencia.

| ***Δe*** \| ***e*** | **NGR** | **NME** | **ZE** | **PME** | **PGR** |
|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | NG | NG | NG | NM | CE |
| **NME** | NG | NM | NM | CE | AM |
| **ZE** | NG | **NG** | CE | **AG** | AG |
| **PME** | NM | **NM** | AM | AM | AG |
| **PGR** | CE | PM | AG | AG | AG |

Figura 5.33 (a) Tabla de reglas lingüísticas resultante

| ***Δe*** \| ***e*** | **NGR** | **NME** | **ZE** | **PME** | **PGR** |
|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | NG | NG | NG | NM | CE |
| **NME** | NG | NM | NM | CE | AM |
| **ZE** | NG | NG | CE | AG | AG |
| **PME** | NM | NM | AM | AM | AG |
| **PGR** | CE | PM | AG | AG | AG |

Figura 5.33 (b) Diagrama de fase lingüístico

| ***Δe*** \| ***e*** | **NGR** | **NME** | **ZE** | **PME** | **PGR** |
|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| **NME** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **ZE** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **PME** | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| **PGR** | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |

Figura 5.33 (c) Memoria explícita.

| ***Δe*** \| ***e*** | **NGR** | **NME** | **ZE** | **PME** | **PGR** |
|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 |
| **NME** | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| **ZE** | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| **PME** | 0 | 0 | 1 | 0 | 2 |
| **PGR** | 1 | 1 | 1 | 2 | 0 |

Figura 5.33 (d) Memoria de frecuencia.

| ***Δe*** \| ***e*** | **NGR** | **NME** | **ZE** | **PME** | **PGR** |
|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **NME** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **ZE** | 2.25 | 0 | 0 | 3.1256 | 0 |
| **PME** | 0 | 0 | 0 | 0 | 9.36 |
| **PGR** | 1.125 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Figura 5.33 (e) Base tabú elemento-sumado

**Figura 5.33** Tablas resultantes después de la aplicación de TS por el criterio de aspiración de Baja influencia con $\theta = 47.9942º$, $v_T = 1.0$ p.u. y simulando una duración de falla de 6 ciclos correspondientes a la figura 5.35.

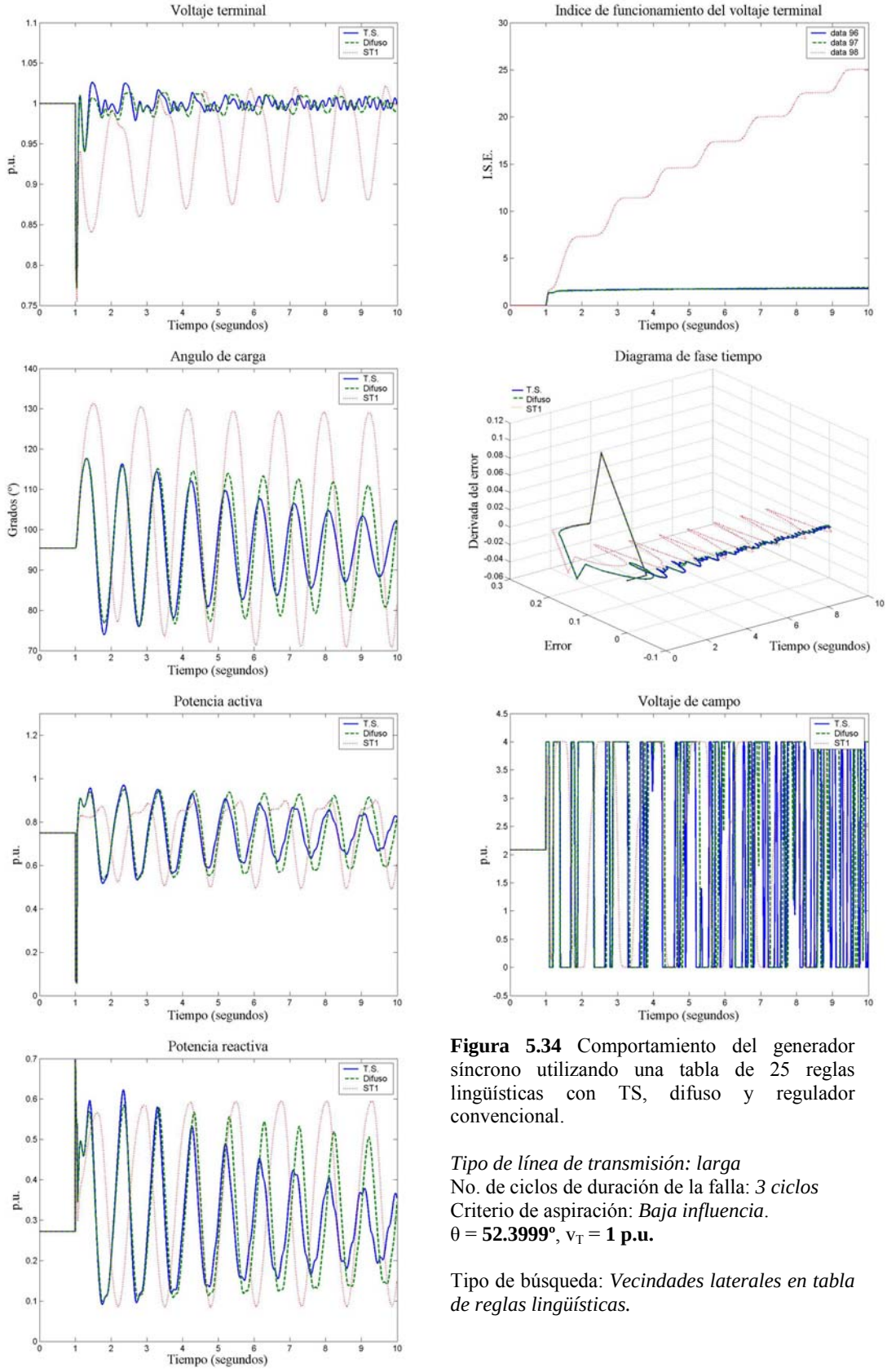



**Figura 5.34** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional.

*Tipo de línea de transmisión: larga*
No. de ciclos de duración de la falla: *3 ciclos*
Criterio de aspiración: *Baja influencia*.
$\theta$ = **52.3999º**, $v_T$ = **1 p.u.**

Tipo de búsqueda: *Vecindades laterales en tabla de reglas lingüísticas.*

En la figura 5.35 se presentan algunas de las tablas resultantes correspondientes a la figuras 5.34 después de la aplicación de TS por el criterio de Baja influencia.

| ***Δe*** \ ***e*** | **NGR** | **NME** | **ZE** | **PME** | **PGR** |
|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | NG | NG | NG | NM | CE |
| **NME** | NG | NM | NM | CE | AM |
| **ZE** | NG | **NG** | CE | **AG** | AG |
| **PME** | NM | **NM** | AM | AM | AG |
| **PGR** | CE | PM | AG | AG | AG |

Figura 5.35 (a) Tabla de reglas lingüísticas resultante

| ***Δe*** \ ***e*** | **NGR** | **NME** | **ZE** | **PME** | **PGR** |
|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | NG | NG | NG | NM | CE |
| **NME** | NG | NM | NM | CE | AM |
| **ZE** | NG | NG | CE | AG | AG |
| **PME** | NM | NM | AM | AM | AG |
| **PGR** | CE | PM | AG | AG | AG |

Figura 5.35 (b) diagrama de fase lingüístico

| ***Δe*** \ ***e*** | **NGR** | **NME** | **ZE** | **PME** | **PGR** |
|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **NME** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **ZE** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **PME** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **PGR** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Figura 5.35 (c) Memoria explícita

| ***Δe*** \ ***e*** | **NGR** | **NME** | **ZE** | **PME** | **PGR** |
|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **NME** | 0 | 3 | 0 | 0 | 4 |
| **ZE** | 0 | 0 | 0 | 1 | 4 |
| **PME** | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 |
| **PGR** | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |

Figura 5.35 (d) Memoria de frecuencia

| ***Δe*** \ ***e*** | **NGR** | **NME** | **ZE** | **PME** | **PGR** |
|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **NME** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **ZE** | 0 | 2.624 | 0 | 0 | 0 |
| **PME** | 0 | 0 | 0 | 1.24 | 0 |
| **PGR** | 0 | 0 | 2.124 | 0 | 0 |

Figura 5.35 (e) Base tabú elemento-eliminado.

| ***Δe*** \ ***e*** | **NGR** | **NME** | **ZE** | **PME** | **PGR** |
|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **NME** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **ZE** | 6.3 | 2.25 | 0 | 0 | 3.125 |
| **PME** | 0 | 0 | 0 | 7.125 | 1.125 |
| **PGR** | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 |

Figura 5.35 (e) Base tabú elemento-sumado.

**Figura 5.35** Tablas resultantes después de la aplicación de TS por el criterio de aspiración de baja influencia con $\theta = 52.3999^{o}$, $v_T = 1.0$ p.u. y simulando una duración de falla de 3 ciclos.

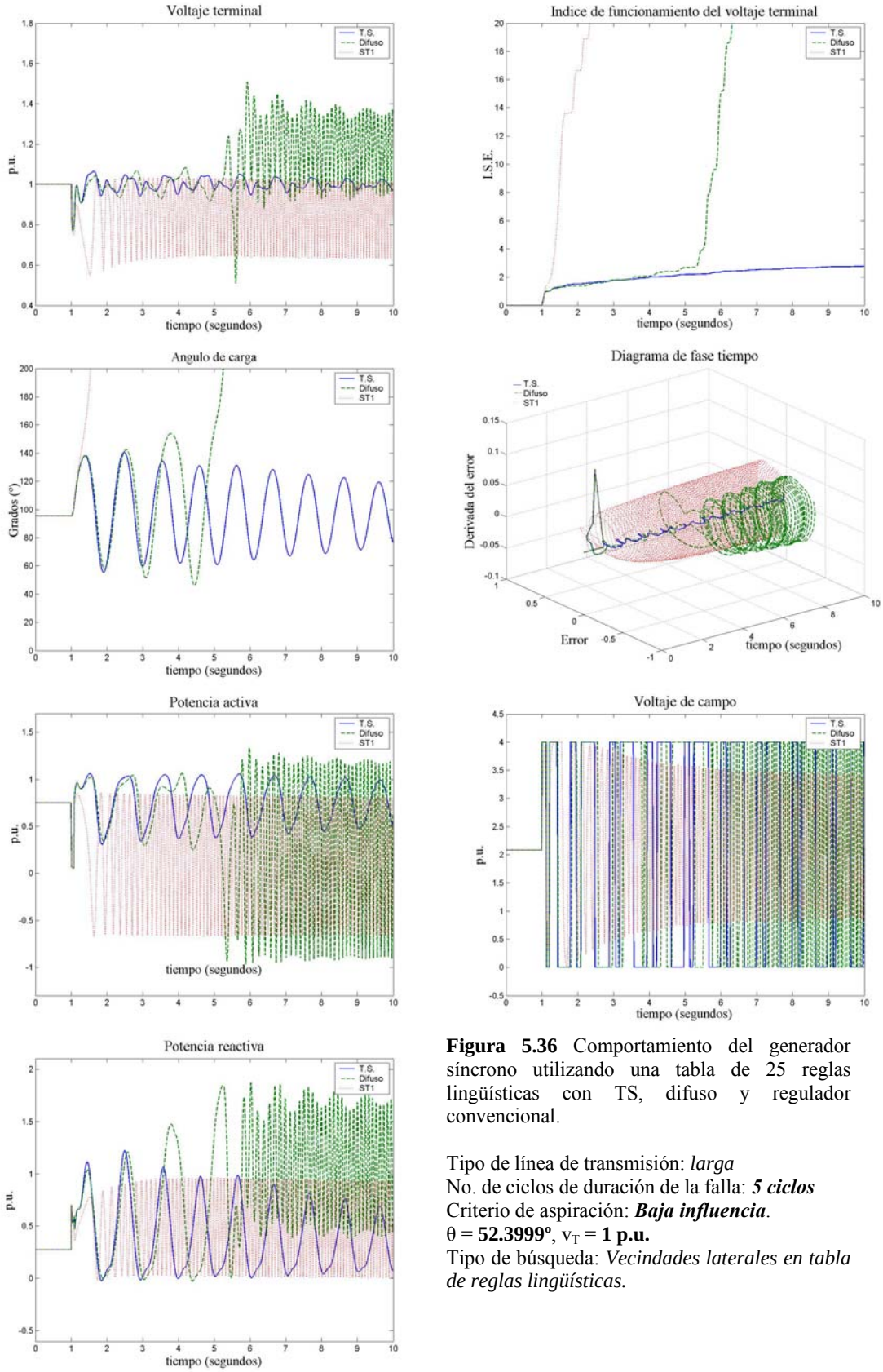



**Figura 5.36** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: ***5 ciclos***
Criterio de aspiración: ***Baja influencia***.
$\theta$ = **52.3999º**, $v_T$ = **1 p.u.**
Tipo de búsqueda: *Vecindades laterales en tabla de reglas lingüísticas.*

En la figura 5.37 se presentan algunas de las tablas resultantes correspondientes a la figuras 5.36 después de la aplicación de TS por el criterio de Baja influencia.

| ***Δe*** \| ***e*** | **NGR** | **NME** | **ZE** | **PME** | **PGR** |
|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | NG | NG | NG | NM | CE |
| **NME** | NG | NM | NM | CE | AM |
| **ZE** | NG | **NG** | CE | AM | AG |
| **PME** | NM | **NM** | AM | AM | AG |
| **PGR** | CE | **PM** | **AG** | AG | AG |

Figura 5.37 (a) Tabla de reglas lingüísticas resultante

| ***Δe*** \| ***E*** | **NGR** | **NME** | **ZE** | **PME** | **PGR** |
|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | NG | NG | NG | NM | CE |
| **NME** | NG | NM | NM | CE | AM |
| **ZE** | NG | NG | CE | AM | AG |
| **PME** | NM | NM | AM | AM | AG |
| **PGR** | CE | PM | AG | AG | AG |

Figura 5.37 (b) Diagrama de fase lingüístico

| ***Δe*** \| ***e*** | **NGR** | **NME** | **ZE** | **PME** | **PGR** |
|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | 0 | 0 | **1** | 0 | 0 |
| **NME** | 0 | 0 | 0 | **1** | **1** |
| **ZE** | **6** | 0 | 0 | 0 | **5** |
| **PME** | **7** | 0 | **7** | 0 | **1** |
| **PGR** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Figura 5.37 (c) Memoria de frecuencia

| ***Δe*** \| ***e*** | **NGR** | **NME** | **ZE** | **PME** | **PGR** |
|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | 0 | 0 | **1** | 0 | 0 |
| **NME** | 0 | 0 | 0 | **1** | **1** |
| **ZE** | **6** | 0 | 0 | 0 | **5** |
| **PME** | **7** | 0 | **7** | 0 | **1** |
| **PGR** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Figura 5.37 (c) Memoria explícita

| ***Δe*** \| ***e*** | **NGR** | **NME** | **ZE** | **PME** | **PGR** |
|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | 0 | 0 | 0 | 4.506 | 0 |
| **NME** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **ZE** | 1.125 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **PME** | 3.125 | 0 | 0 | 0 | 7.125 |
| **PGR** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Figura 5.37 (c) Base elemento-sumado

**Figura 5.37** Tablas resultantes después de la aplicación de TS por el criterio de aspiración de Baja influencia con $\theta = 52.3999^{o}$, $v_T = 1.0$ p.u. y simulando una duración de falla de 5 ciclos.

-

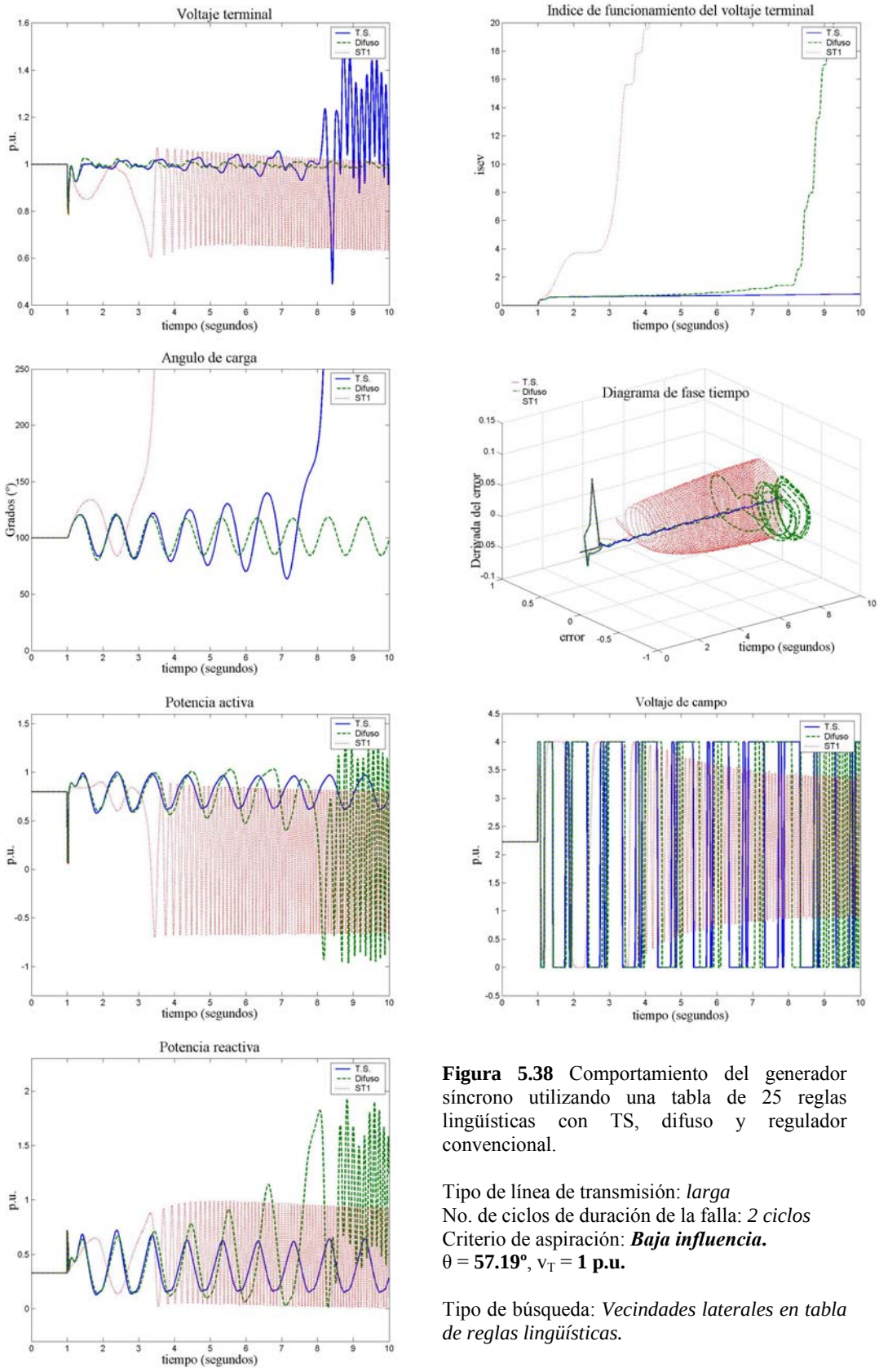



**Figura 5.38** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: *2 ciclos*
Criterio de aspiración: ***Baja influencia.***
$\theta$ = **57.19º**, $v_T$ = **1 p.u.**

Tipo de búsqueda: *Vecindades laterales en tabla de reglas lingüísticas.*

En la figura 5.39 se presentan algunas de las tablas resultantes correspondientes a la figuras 5.38 después de la aplicación de TS por el criterio de Baja influencia.

| ***Δe*** \| ***e*** | **NGR** | **NME** | **ZE** | **PME** | **PGR** |
|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | NG | NG | NG | NM | CE |
| **NME** | NG | NM | NM | CE | AM |
| **ZE** | NG | NM | CE | AM | AG |
| **PME** | NM | **AM** | AM | AM | AG |
| **PGR** | CE | PM | AG | AG | AG |

5.39 (a) Tabla de reglas lingüísticas resultante

| ***Δe*** \| ***e*** | **NGR** | **NME** | **ZE** | **PME** | **PGR** |
|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | NG | NG | NG | NM | CE |
| **NME** | NG | NM | NM | CE | AM |
| **ZE** | NG | NM | CE | AM | AG |
| **PME** | NM | AM | AM | AM | AG |
| **PGR** | CE | PM | AG | AG | AG |

5.39 (b) Diagrama de fase lingüístico

| ***Δe*** \| ***e*** | **NGR** | **NME** | **ZE** | **PME** | **PGR** |
|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | 0 | 0 | **2** | 0 | 0 |
| **NME** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **ZE** | **6** | 0 | **1** | 0 | **17** |
| **PME** | **4** | 0 | **8** | 0 | **1** |
| **PGR** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

5.39 (c) Memoria de frecuencia

| ***Δe*** \| ***e*** | **NGR** | **NME** | **ZE** | **PME** | **PGR** |
|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **NME** | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| **ZE** | 0 | 0 | 0 | **1** | **1** |
| **PME** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **PGR** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

5.39 (d) Memoria explicita

| ***Δe*** \| ***e*** | **NGR** | **NME** | **ZE** | **PME** | **PGR** |
|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **NME** | 0 | 1.36 | 0 | 0 | 0 |
| **ZE** | 0 | 0 | 0 | 1.125 | 9.236 |
| **PME** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **PGR** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

5.39 (d) Base elemento sumado

**Figura 5.39** Tablas resultantes después de la aplicación de TS por el criterio de aspiración de Baja influencia con $\theta = 57.19^{\circ}$, $v_T = 1.0$ p.u. y simulando una duración de falla de 2 ciclos.

En la figura 5.39 se muestran las tablas resultantes después de la aplicación de TS por el criterio de aspiración de Baja influencia correspondientes a la simulación presentada en la figura 5.39 con $\theta = 57.19^{\circ}$, $v_T = 1.0$ p.u. y simulando una duración de falla de 2 ciclos. La figura (a) muestra solo un cambio sobre la tabla de reglas, la razón de este resultado es la reincorporación de elementos pertenecientes a la tabla en un comienzo de la búsqueda debido en gran parte al criterio elegido manifestándose en la memoria de frecuencia.

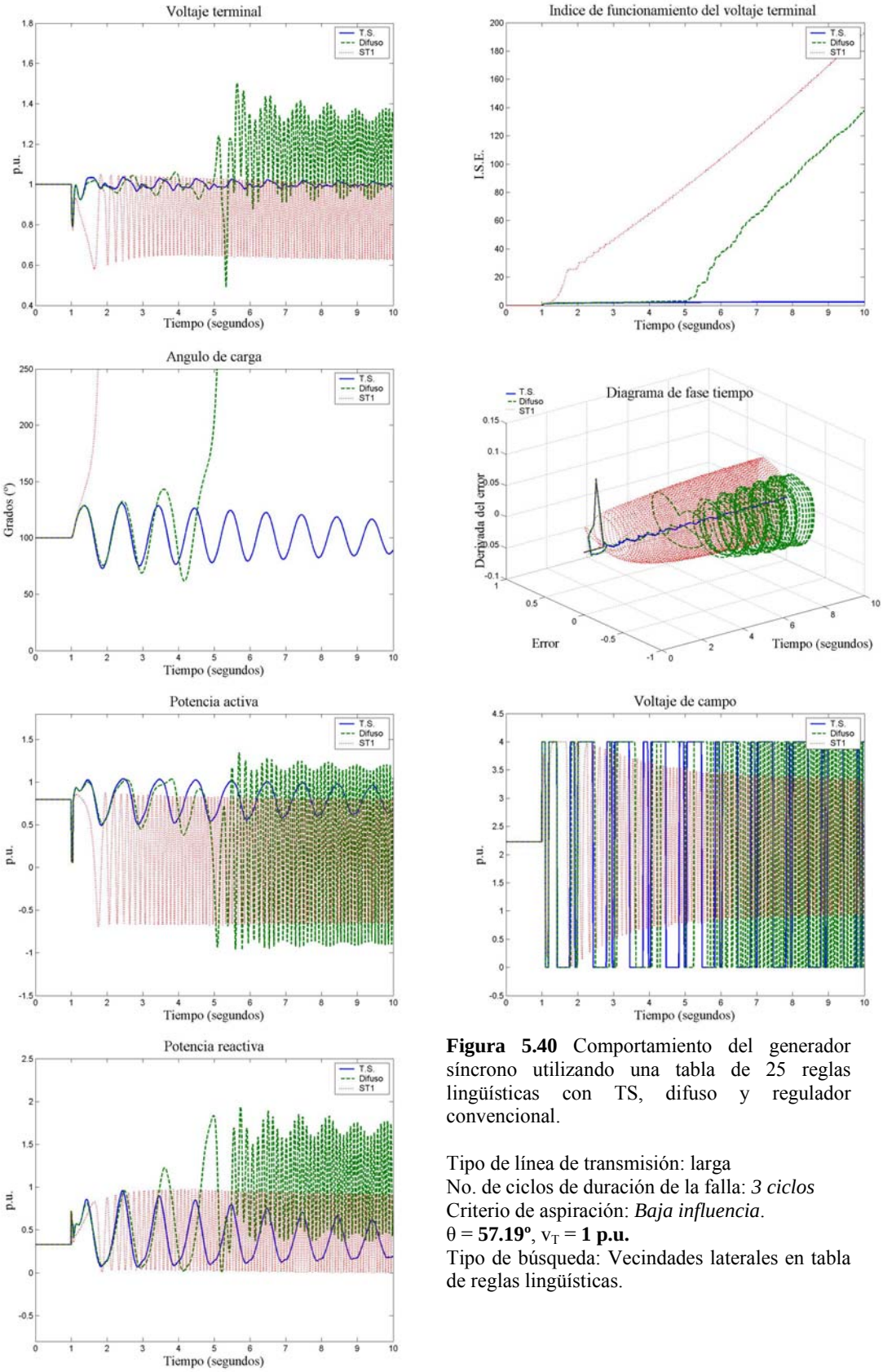



**Figura 5.40** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: larga
No. de ciclos de duración de la falla: *3 ciclos*
Criterio de aspiración: *Baja influencia*.
$\theta$ = **57.19º**, $v_T$ = **1 p.u.**
Tipo de búsqueda: Vecindades laterales en tabla de reglas lingüísticas.

### *5.3.5 RESULTADOS OBTENIDOS DESPUÉS DE REALIZAR UNA PRUEBA DE AUTOSINTONIZACIÓN SOBRE UNA TABLA DE 25 REGLAS LINGÜÍSTICAS POR EL CRITERIO DE BAJA INFLUENCIA EMPLEANDO UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN CORTA.*

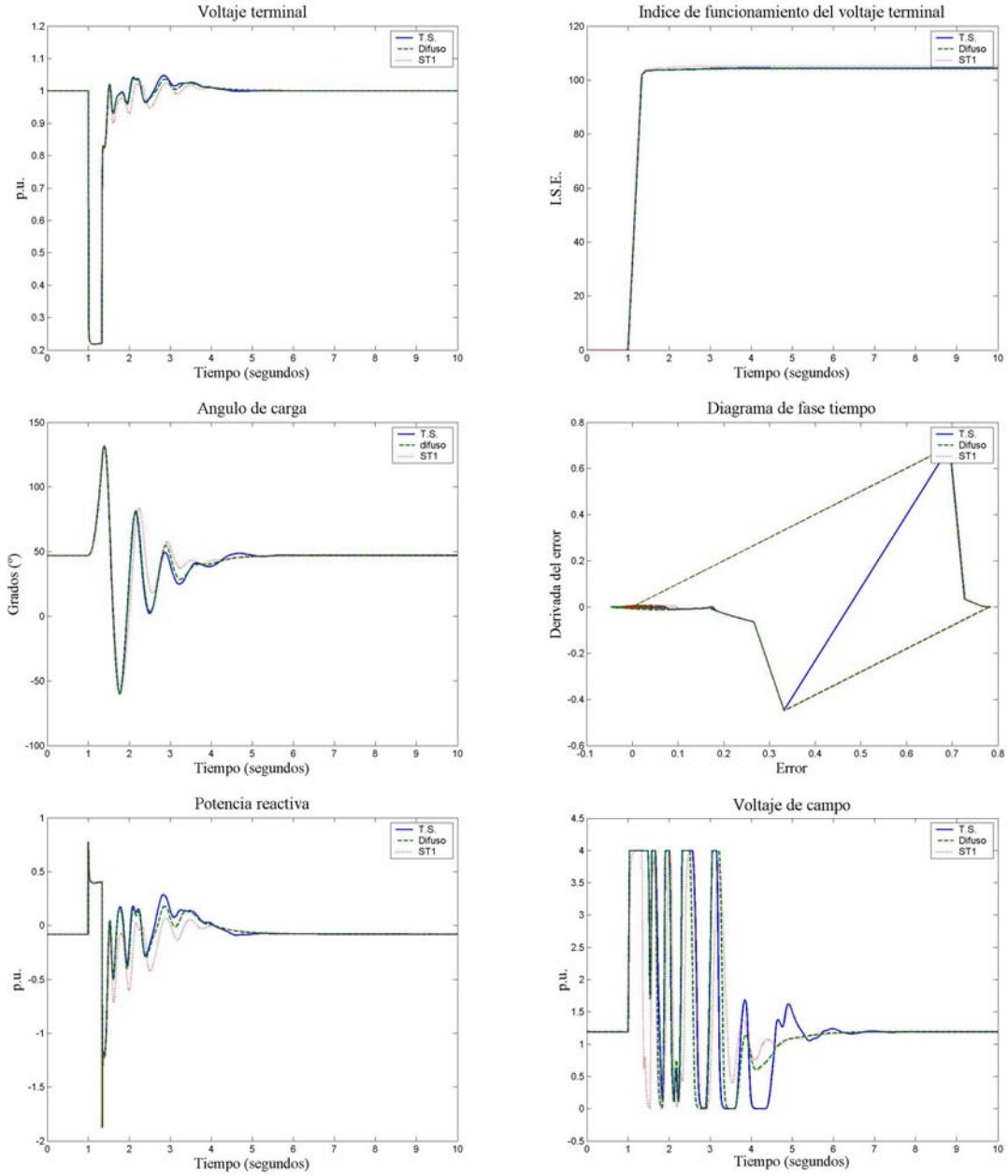



**Figura 5.41.** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: corta
No. de ciclos de duración de la falla: *10 ciclos*
Criterio de aspiración: *Baja influencia*.
$\theta = 3^{o}$, $v_T = 1$ p.u.

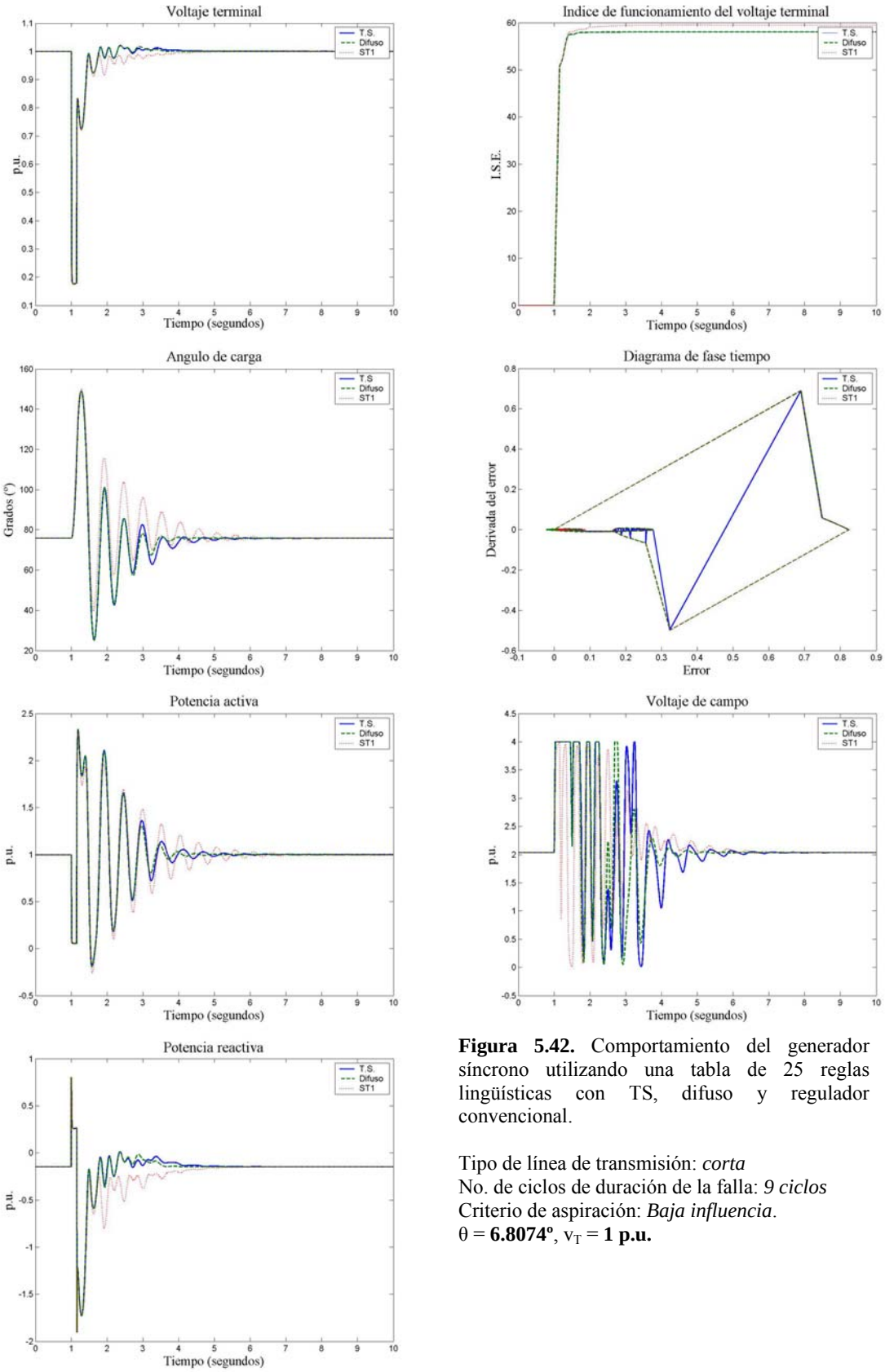



**Figura 5.42.** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: *corta*
No. de ciclos de duración de la falla: *9 ciclos*
Criterio de aspiración: *Baja influencia*.
$\theta$ = **6.8074º**, $v_T$ = **1 p.u.**

### *5.3.6 RESULTADOS OBTENIDOS DESPUÉS DE REALIZAR UNA PRUEBA DE AUTOSINTONIZACIÓN SOBRE UNA TABLA DE 49 REGLAS LINGÜÍSTICAS POR EL CRITERIO DE ALTA INFLUENCIA EMPLEANDO UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN LARGA.*

#### *5.3.6.1 INTRODUCCIÓN.*

Esta sección abarca todos aquellos resultados pertenecientes a la optimización implementada a través de la búsqueda por tabú sobre una tabla de 49 reglas lingüísticas, el criterio de influencia (tipo de aspiración o umbral) empleando es de alta influencia significado de tomar todas aquellas acciones lingüísticas que resulten en una optimización de la función objetivo. La figura 5.43 muestra el comportamiento del generador síncrono partiendo desde vacío hasta alcanzar un punto de operación donde la potencia activa es 0.7889 p.u. observando un incremento de carga reflejado sobre el comportamiento de las diversas variables. Tal prueba muestra el desempeño del voltaje en terminales en base a la aplicación de un regulador convencional y una técnica inteligente. Es importante resaltar que la lógica difusa autosintonizable no es un control extraordinariamente inteligente pero logra distinguir cuando un valor es correcto en base a experiencias similares pasadas y establecer cual valor debe generarse en el campo.

Los parámetros del controlador difuso al comienzo de la prueba son:

Tabla de reglas lingüísticas inicial:

| $\Delta e$ \| $e$ | **NGR** | **NME** | **NPE** | **ZE** | **PPE** | **PME** | **PGR** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | BG | BG | BG | BM | BP | BP | **CE** |
| **NME** | BG | BG | BM | BM | BP | **CE** | AP |
| **NPE** | BG | BM | BM | BP | **CE** | AP | AP |
| **ZE** | BM | BM | BP | **CE** | AP | AM | AM |
| **PPE** | BP | BP | **CE** | AP | AM | AM | AG |
| **PME** | BP | **CE** | AP | AP | AM | AG | AG |
| **PGR** | **CE** | AP | AP | AM | AG | AG | AG |

Los intervalos iniciales de las funciones de membresía para la prueba son aquellos mostrados en el apéndice A, debido a que la prueba mostrada a continuación solo abarca la optimización de la tabla de reglas.

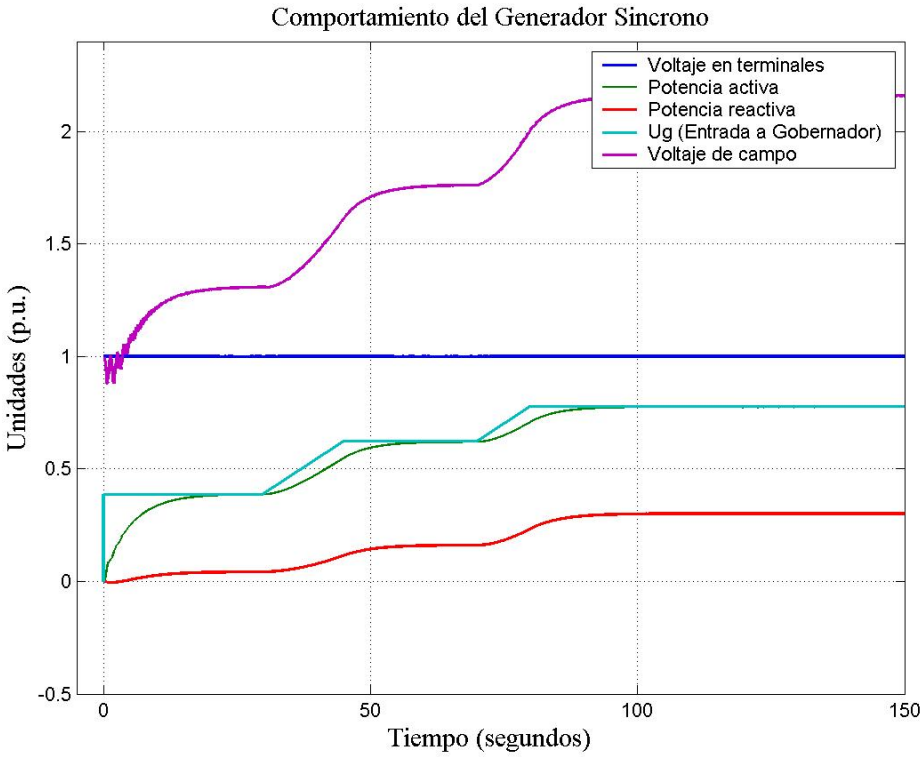
Los parámetros de la búsqueda por tabú son:

Tabú-elemento eliminado: 1.0 segundos
Tabú elemento sumado: 0.125 según dos

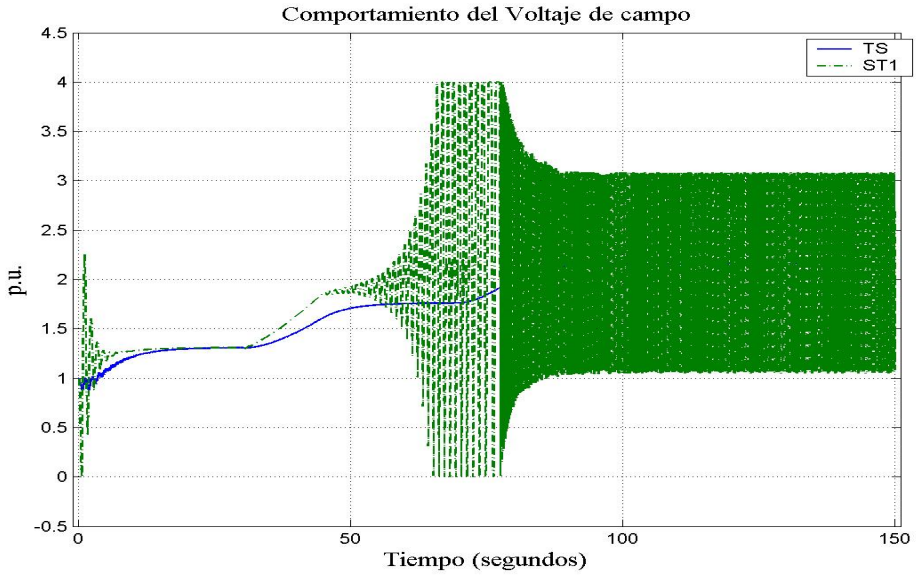
Termino de corto plazo: 0.125 segundos
Termino a largo plazo: 0.24 segundos.

Los resultados mostrados en la figura 5.43 pueden ser comparados con el comportamiento mostrado por el generador síncrono empleando una técnica convencional regulación de voltaje mostrado en la figura 5.2.

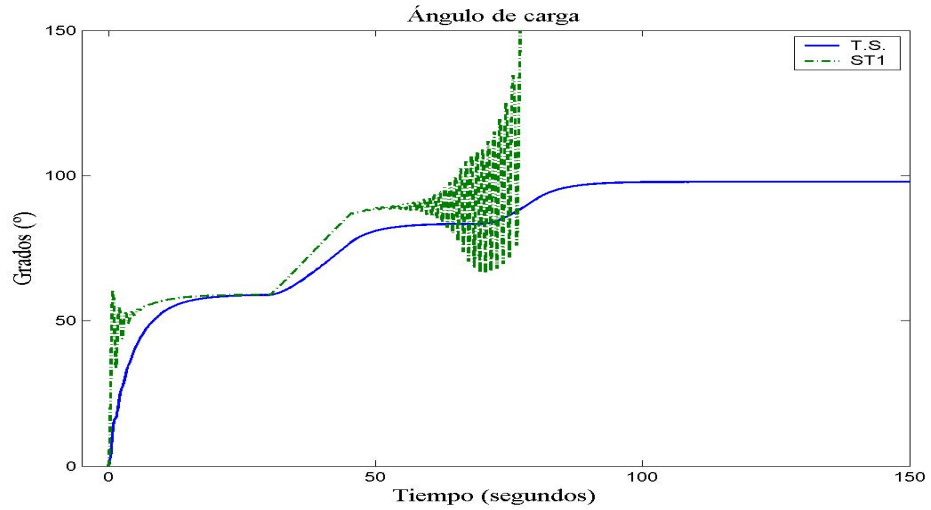
***NOTA:*** La distancia entre el termino a corto plazo y a largo plazo es mínima debido a el tamaño empleado de búsqueda sobre la tabla de reglas lingüísticas.

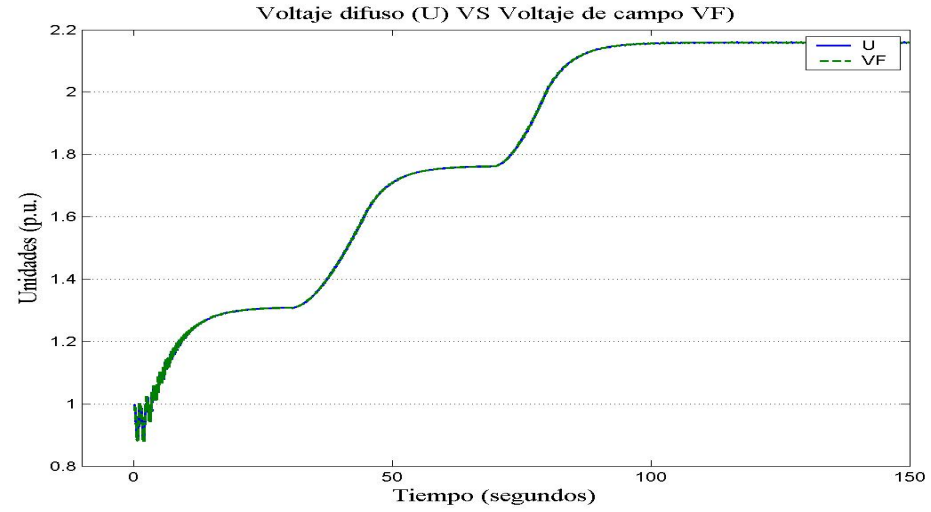


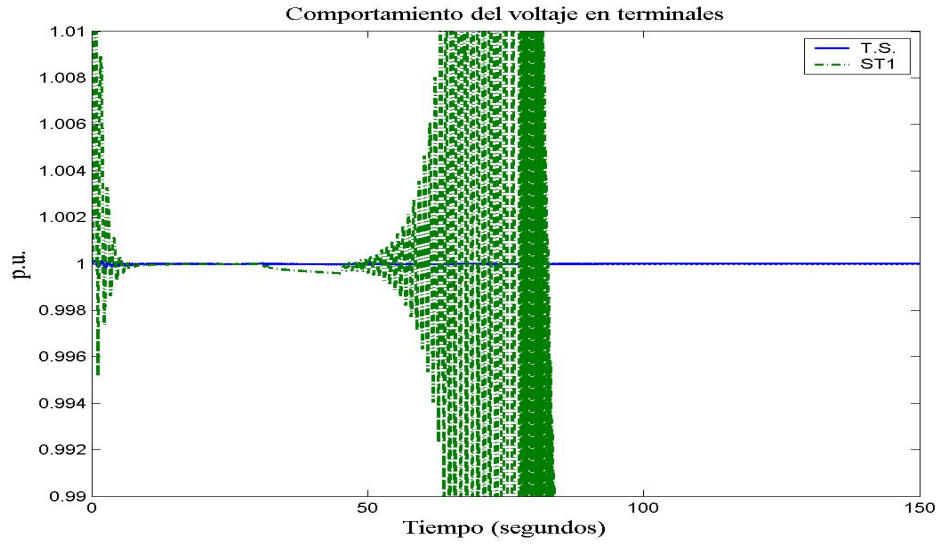

5.43 (a) Comportamiento del Generador Síncrono ante un escalón en el incremento de carga durante una simulación de 150 segundos.




5.43 (b) Comportamiento del voltaje de campo empleando Control difuso optimizado y regulador convencional durante una simulación de incremento de carga




5.43 (c) Comportamiento del ángulo de carga, voltaje de campo, señal de control u y voltaje en terminales.

A continuación se muestra en la figura 5.43 la tabla resultante de acciones lingüísticas de aplicar la búsqueda por tabú por el criterio de alta influencia.

| $\Delta e$ \ $e$ | NGR | NME | NPE | ZE | PPE | PME | PGR |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | BG | BG | BG | BM | BM | BP | **CE** |
| **NME** | BG | BG | BM | BM | BP | **CE** | AM |
| **NPE** | BG | BM | BM | BP | **CE** | AP | AM |
| **ZE** | BM | BM | BP | **CE** | AP | AM | AM |
| **PPE** | BM | BP | **CE** | AP | AM | AM | AG |
| **PME** | BP | **CE** | AP | AM | AM | AG | AG |
| **PGR** | **CE** | AP | AM | AM | AG | AG | AG |

5.43 (d) tabla de reglas lingüísticas resultantes.

| $\Delta e$ \ $e$ | NGR | NME | NPE | ZE | PPE | PME | PGR |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | BG | BG | BG | BM | BM | BP | **CE** |
| **NME** | BG | BG | BM | BM | BP | **CE** | AM |
| **NPE** | BG | BM | BM | BP | **CE** | AP | AM |
| **ZE** | BM | BM | BP | **CE** | AP | AM | AM |
| **PPE** | BM | BP | **CE** | AP | AM | AM | AG |
| **PME** | BP | **CE** | AP | AM | AM | AG | AG |
| **PGR** | **CE** | AP | AM | AM | AG | AG | AG |

5.43 (e) Diagrama de fase lingüístico.

| $\Delta e$ \ $e$ | NGR | NME | NPE | ZE | PPE | PME | PGR |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | 0 | 0 | 0 | 21 | 2 | 0 | 0 |
| **NME** | 0 | 0 | 0 | 17 | 11 | 0 | 0 |
| **NPE** | 0 | 0 | 15 | 12 | 0 | 0 | 0 |
| **ZE** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5 | 0 |
| **PPE** | 0 | 23 | 0 | 0 | 0 | 12 | 0 |
| **PME** | 0 | 0 |  | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **PGR** | 0 | 0 | 3 | 14 | 0 | 0 | 0 |

5.43 (f) Memoria de frecuencia final.

| $\Delta e$ \ $e$ | NGR | NME | NPE | ZE | PPE | PME | PGR |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **NME** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **NPE** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **ZE** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **PPE** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **PME** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **PGR** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

5.43 (g) Memoria Explícita.

**Figura** 5.43 Comportamiento del generador síncrono y estructuras finales asociadas empleando 7 funciones de membresía

La búsqueda por tabú permitió encontrar durante la simulación presentada en la figura 5.43 la correcta tabla de reglas lingüísticas permitiendo al generador síncrono permanecer en estado estacionario y permanente después del incremento de carga simulando 1 escalón y dos rampas en diferentes puntos de tiempo.

A continuación se presentan algunos resultados correspondientes a algunos puntos de operación simulando un intervalo de ciclos de falla trifásica en el bus empleando los reguladores mencionados al principio de este capítulo.

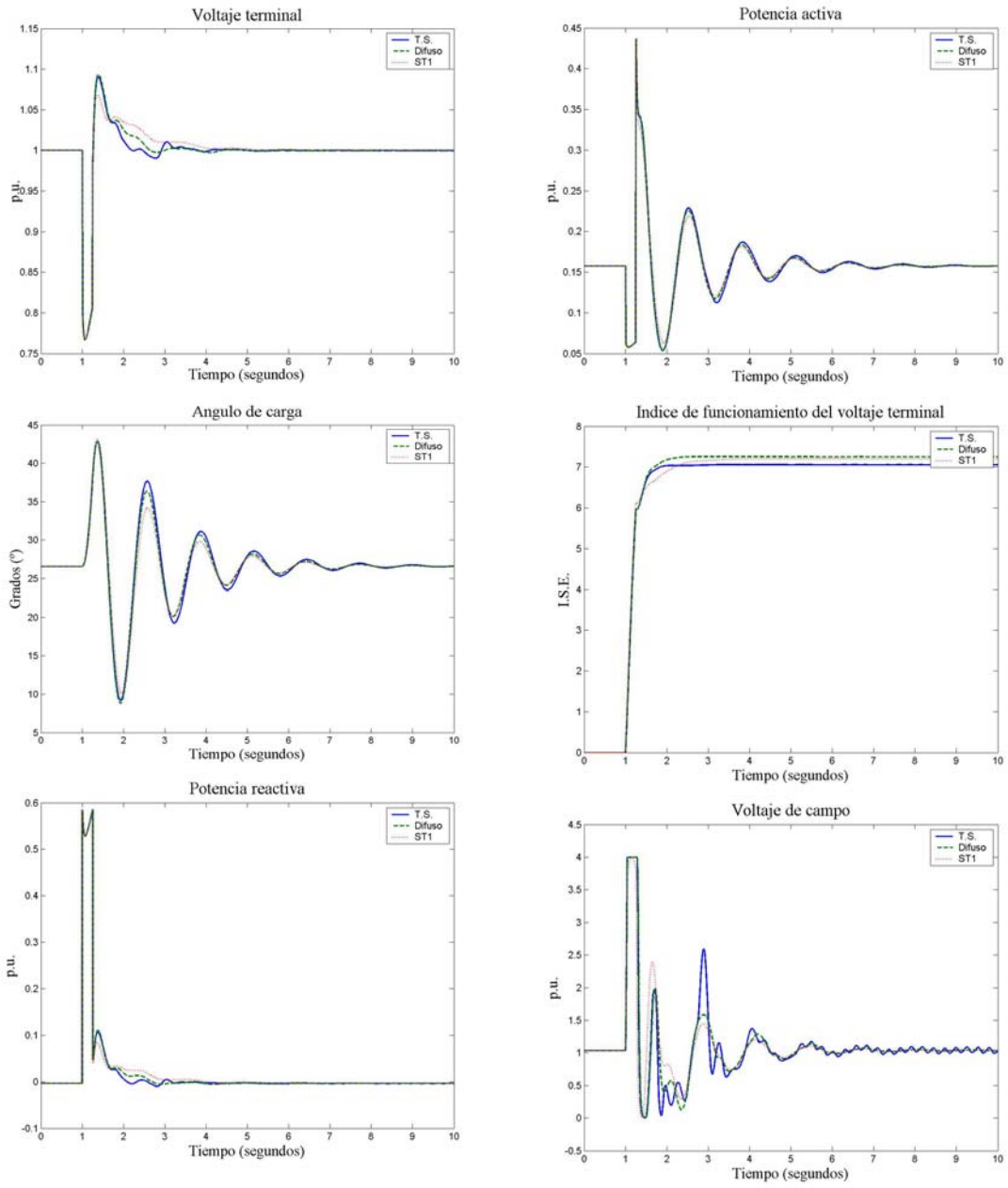



**Figura 5.44** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: *15 ciclos*
Criterio de aspiración: *Alta influencia*.
$\theta$ = **15º**, $v_T$ = **1 p.u.**
Tipo de búsqueda: *Vecindades laterales en tabla de reglas lingüísticas.*

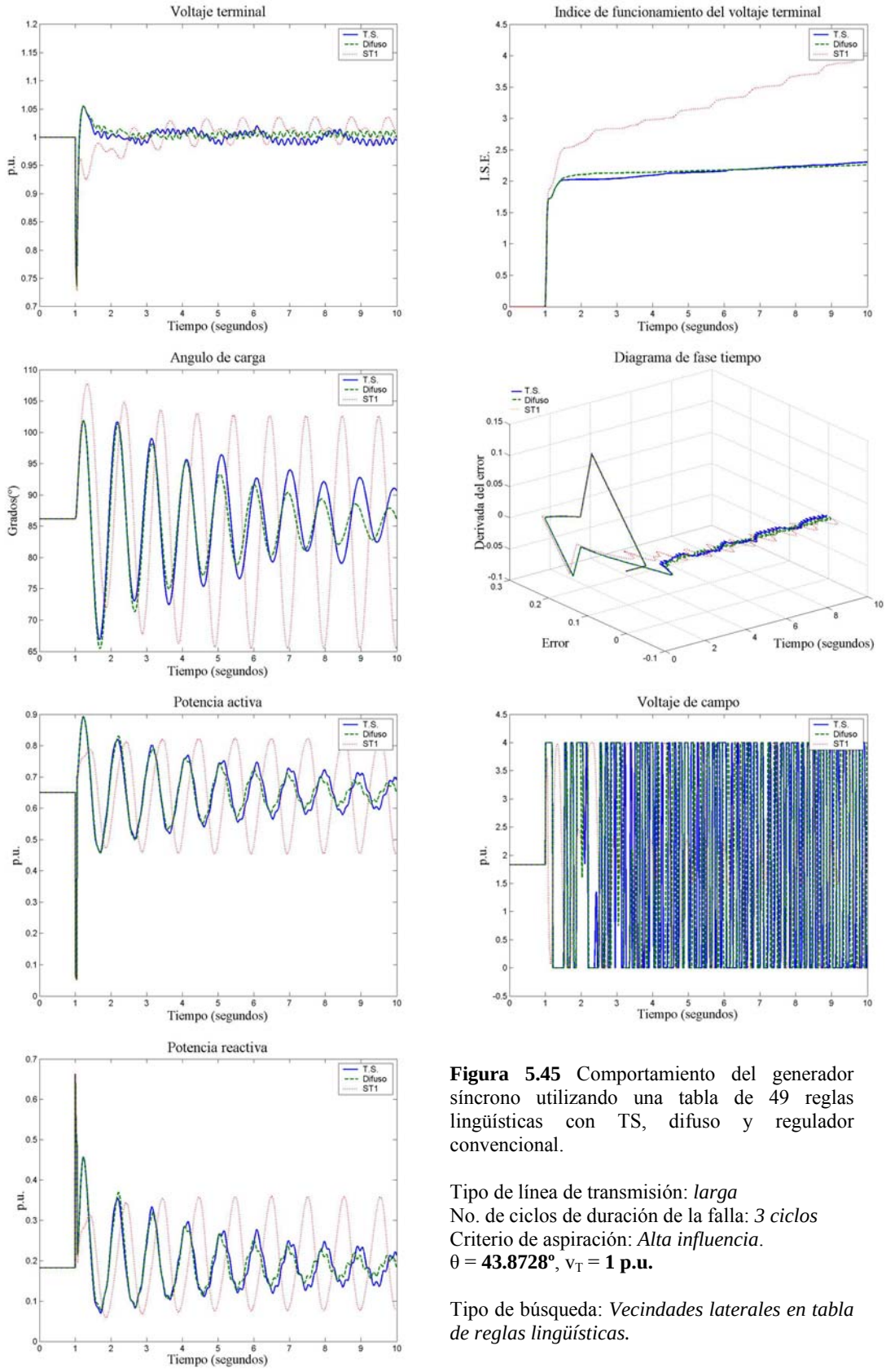



**Figura 5.45** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: *3 ciclos*
Criterio de aspiración: *Alta influencia*.
$\theta$ = **43.8728º**, $v_T$ = **1 p.u.**

Tipo de búsqueda: *Vecindades laterales en tabla de reglas lingüísticas.*

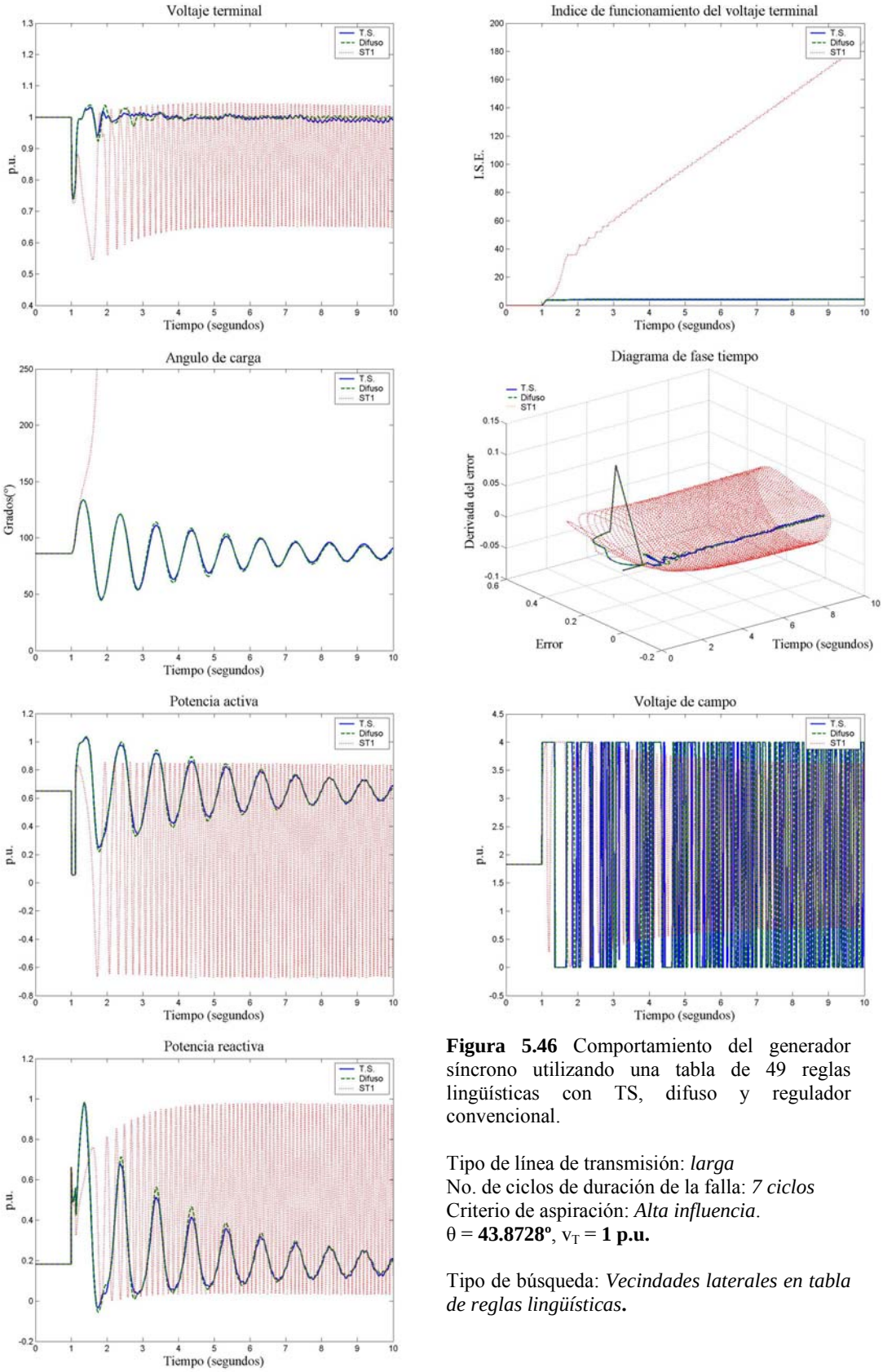



**Figura 5.46** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: *7 ciclos*
Criterio de aspiración: *Alta influencia*.
$\theta$ = **43.8728º**, $v_T$ = **1 p.u.**

Tipo de búsqueda: *Vecindades laterales en tabla de reglas lingüísticas***.**

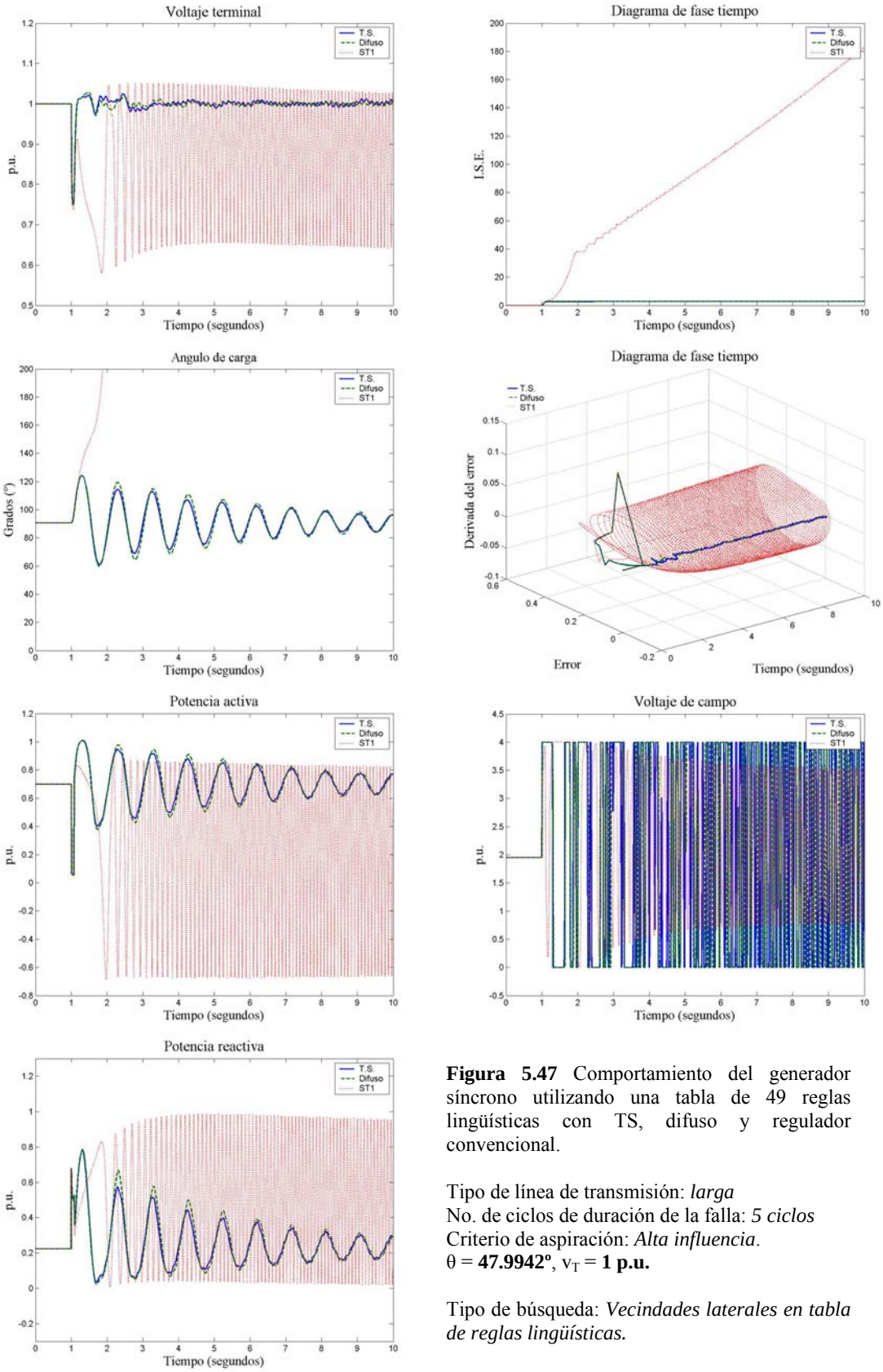



**Figura 5.47** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: *5 ciclos*
Criterio de aspiración: *Alta influencia*.
$\theta$ = **47.9942º**, $v_T$ = **1 p.u.**

Tipo de búsqueda: *Vecindades laterales en tabla de reglas lingüísticas.*

En la figura 5.48 se presentan algunas de las tablas resultantes correspondientes a la figuras 5.47 después de la aplicación de TS por el criterio de alta influencia.

| $\Delta e$ \| $e$ | NGR | NME | NPE | ZE | PPE | PME | PGR |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | BG | BG | BG | BG | BM | BP | **CE** |
| **NME** | BG | BG | BG | BG | BP | **CE** | AM |
| **NPE** | BG | BM | BM | **BM** | **CE** | AP | AM |
| **ZE** | BM | BM | **BM** | **CE** | CE | AM | AM |
| **PPE** | BM | BP | **CE** | **AM** | AM | AM | AG |
| **PME** | BP | **CE** | **AG** | **AG** | AM | AG | AG |
| **PGR** | **BP** | AP | AM | AM | AG | AG | AG |

Figura 5.48 (a) Tabla de reglas lingüísticas resultante

| $\Delta e$ \| $e$ | NGR | NME | NPE | ZE | PPE | PME | PGR |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | BG | BG | BG | BG | BM | BP | **CE** |
| **NME** | BG | BG | BG | BG | BP | **CE** | AM |
| **NPE** | BG | BM | BM | BM | **CE** | AP | AM |
| **ZE** | BM | BM | BM | **CE** | CE | AM | AM |
| **PPE** | BM | BP | **CE** | AM | AM | AM | AG |
| **PME** | BP | **CE** | AG | AG | AM | AG | AG |
| **PGR** | **BP** | AP | AM | AM | AG | AG | AG |

Figura 5.48 (b) Diagrama de fase lingüístico.

| $\Delta e$ \| $e$ | NGR | NME | NPE | ZE | PPE | PME | PGR |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **NME** | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| **NPE** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **ZE** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **PPE** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **PME** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| **PGR** | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |

Figura 5.48 (c) Memoria explícita.

| $\Delta e$ \| $e$ | NGR | NME | NPE | ZE | PPE | PME | PGR |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **NME** | 10 | 0 | 3 | 0 | 2 | 0 | 1 |
| **NPE** | 3 | 3 | 0 | 0 | 0 | 3 | 0 |
| **ZE** | 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11 |
| **PPE** | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 0 | 8 |
| **PME** | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 6 |
| **PGR** | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 4 | 6 |

Figura 5.48 (d) Memoria de frecuencia

**Figura 5.48** Tablas resultantes después de la aplicación de TS por el criterio de aspiración de alta influencia con $\theta = 47.9942º$, $v_T = 1.0$ p.u. y simulando una duración de falla de 5 ciclos correspondientes a la figura 5.53.

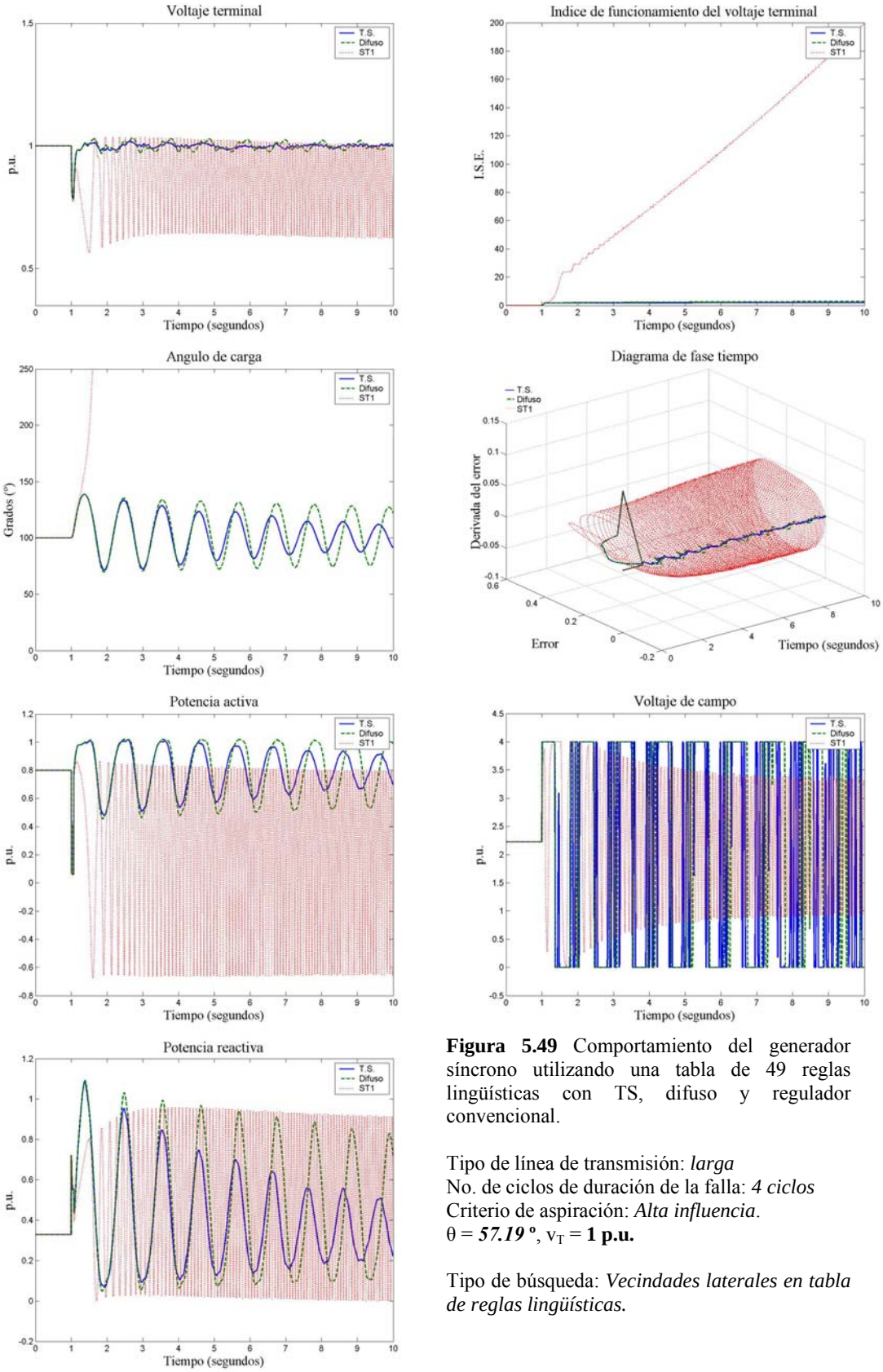



**Figura 5.49** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: *4 ciclos*
Criterio de aspiración: *Alta influencia*.
$\theta$ = ***57.19*** **°**, $v_T$ = **1 p.u.**

Tipo de búsqueda: *Vecindades laterales en tabla de reglas lingüísticas.*

En la figura 5.50 se presentan algunas de las tablas resultantes después de la aplicación de TS por el criterio de Baja influencia correspondientes a la simulación presentada en la figura 5.49.

| $\Delta e$ \| $e$ | NGR | NME | NPE | ZE | PPE | PME | PGR |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | BG | BG | BG | BG | BM | BM | **BM** |
| **NME** | BG | BG | BG | BG | BG | **CE** | AM |
| **NPE** | BG | BM | BG | BG | **AG** | AP | AM |
| **ZE** | BM | BM | BG | **CE** | CE | AG | AM |
| **PPE** | BM | BG | **CE** | AM | AG | AG | AG |
| **PME** | BP | **BM** | AG | AG | AG | AG | AG |
| **PGR** | **BP** | AP | AM | AM | AG | AG | AG |

Figura 5.50 (a) Tabla de reglas lingüísticas resultante.

| $\Delta e$ \| $e$ | NGR | NME | NPE | ZE | PPE | PME | PGR |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | BG | BG | BG | BG | BM | BM | **BM** |
| **NME** | BG | BG | BG | BG | BG | **CE** | AM |
| **NPE** | BG | BM | BG | BG | **AG** | AP | AM |
| **ZE** | BM | BM | BG | **CE** | CE | AG | AM |
| **PPE** | BM | BG | **CE** | AM | AG | AG | AG |
| **PME** | BP | **BM** | AG | AG | AG | AG | AG |
| **PGR** | **BP** | AP | AM | AM | AG | AG | AG |

Figura 5.50 (b) Diagrama de fase lingüístico.

| $\Delta e$ \| $e$ | NGR | NME | NPE | ZE | PPE | PME | PGR |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **NME** | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| **NPE** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **ZE** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **PPE** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **PME** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **PGR** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Figura 5.50 (a) Memoria explícita.

| $\Delta e$ \| $e$ | NGR | NME | NPE | ZE | PPE | PME | PGR |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 7 | 0 |
| **NME** | 10 | 0 | 0 | 4 | 0 | 0 | 1 |
| **NPE** | 2 | 0 | 3 | 4 | 0 | 0 | 1 |
| **ZE** | 5 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **PPE** | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 12 | 11 |
| **PME** | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 2 |
| **PGR** | 2 | 4 | 1 | 0 | 0 | 0 | 10 |

Figura 5.50 (b) Memoria de frecuencia

**Figura 5.50** Tablas resultantes después de la aplicación de TS por el criterio de aspiración de alta influencia con $\theta = 57.19^{\circ}$, $v_T = 1.0$ p.u. y simulando una duración de falla de 5 ciclos.

### *5.3.7 RESULTADOS OBTENIDOS DESPUÉS DE REALIZAR UNA PRUEBA DE AUTOSINTONIZACIÓN SOBRE UNA TABLA DE 49 REGLAS LINGÜÍSTICAS POR EL CRITERIO DE ALTA INFLUENCIA EMPLEANDO UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN CORTA.*

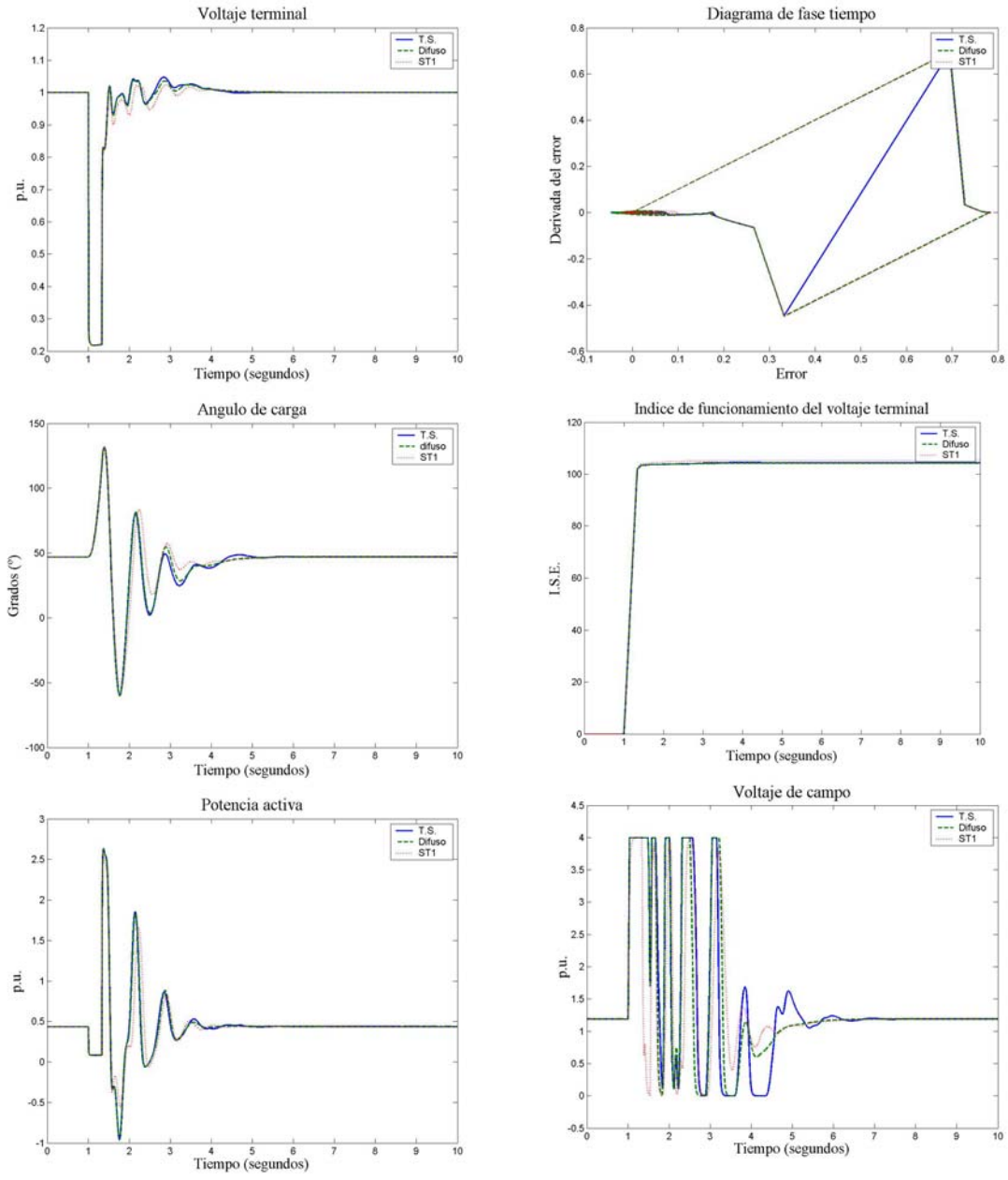



**Figura 5.51** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: corta
No. de ciclos de duración de la falla: *10 ciclos*
Criterio de aspiración: *Alta influencia*.
$\theta$ = **3º**, $v_T$ = **1 p.u.**

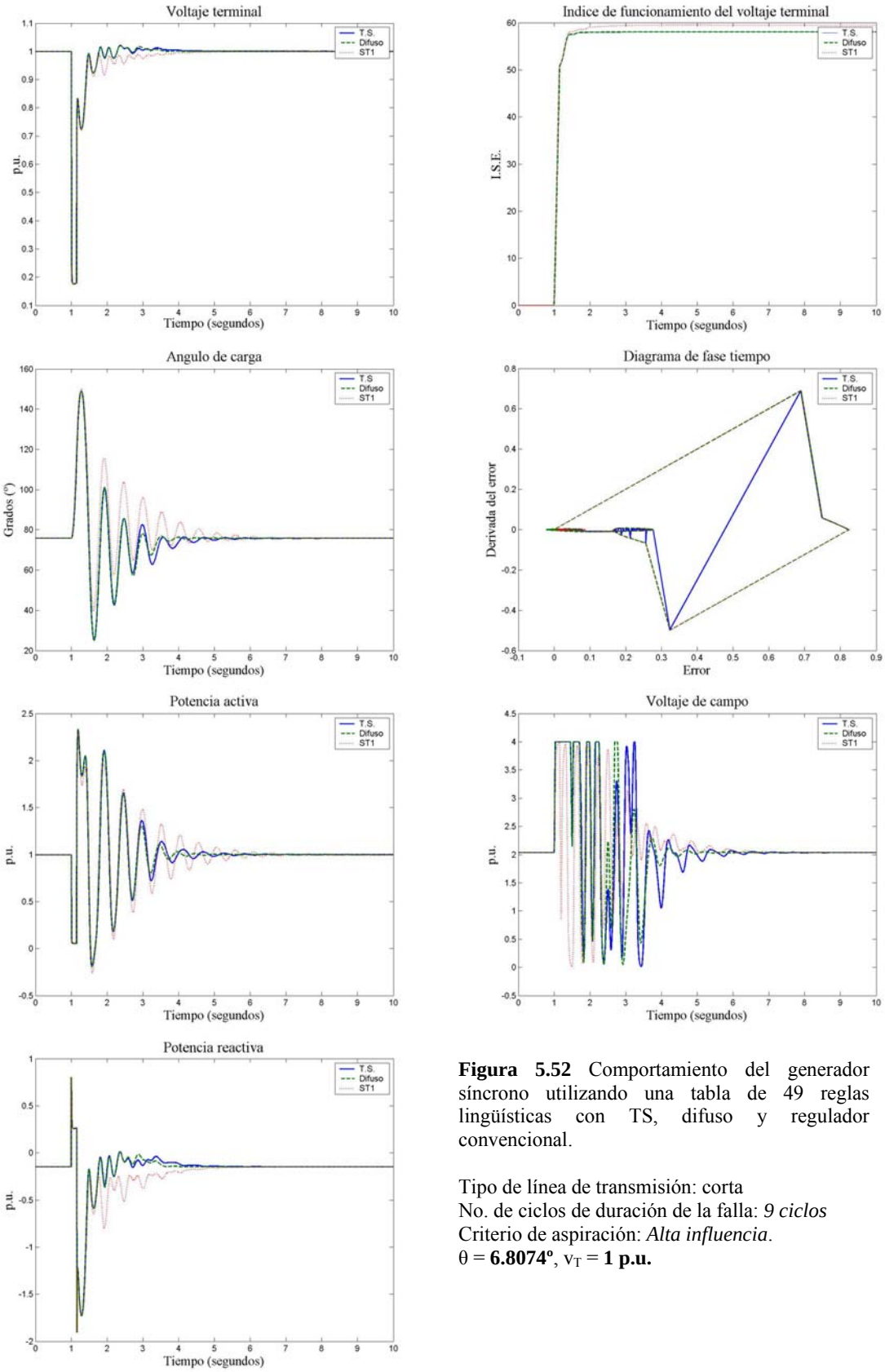



**Figura 5.52** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: corta
No. de ciclos de duración de la falla: *9 ciclos*
Criterio de aspiración: *Alta influencia*.
$\theta$ = **6.8074º**, $v_T$ = **1 p.u.**

### *5.3.8 RESULTADOS OBTENIDOS DESPUÉS DE REALIZAR UNA PRUEBA DE AUTOSINTONIZACIÓN SOBRE UNA TABLA DE 49 REGLAS LINGÜÍSTICAS POR EL CRITERIO DE BAJA INFLUENCIA EMPLEANDO UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN LARGA.*

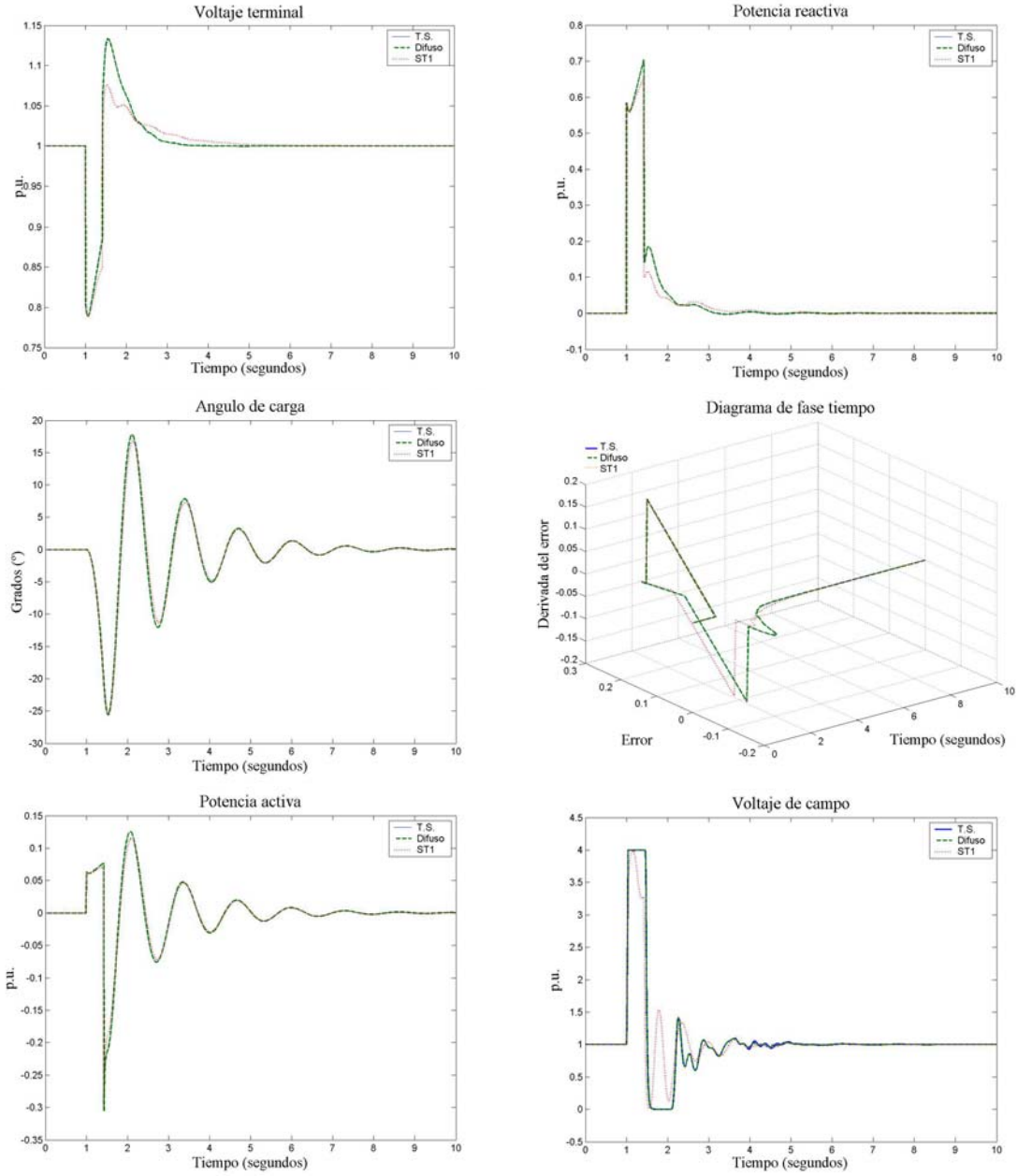



**Figura 5.53** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: ***25 ciclos***
Criterio de aspiración: ***Baja influencia***.
$\theta$ = **0º**, $v_T$ = **1 p.u.**
Tipo de búsqueda: *Vecindades laterales en tabla de reglas lingüísticas.*

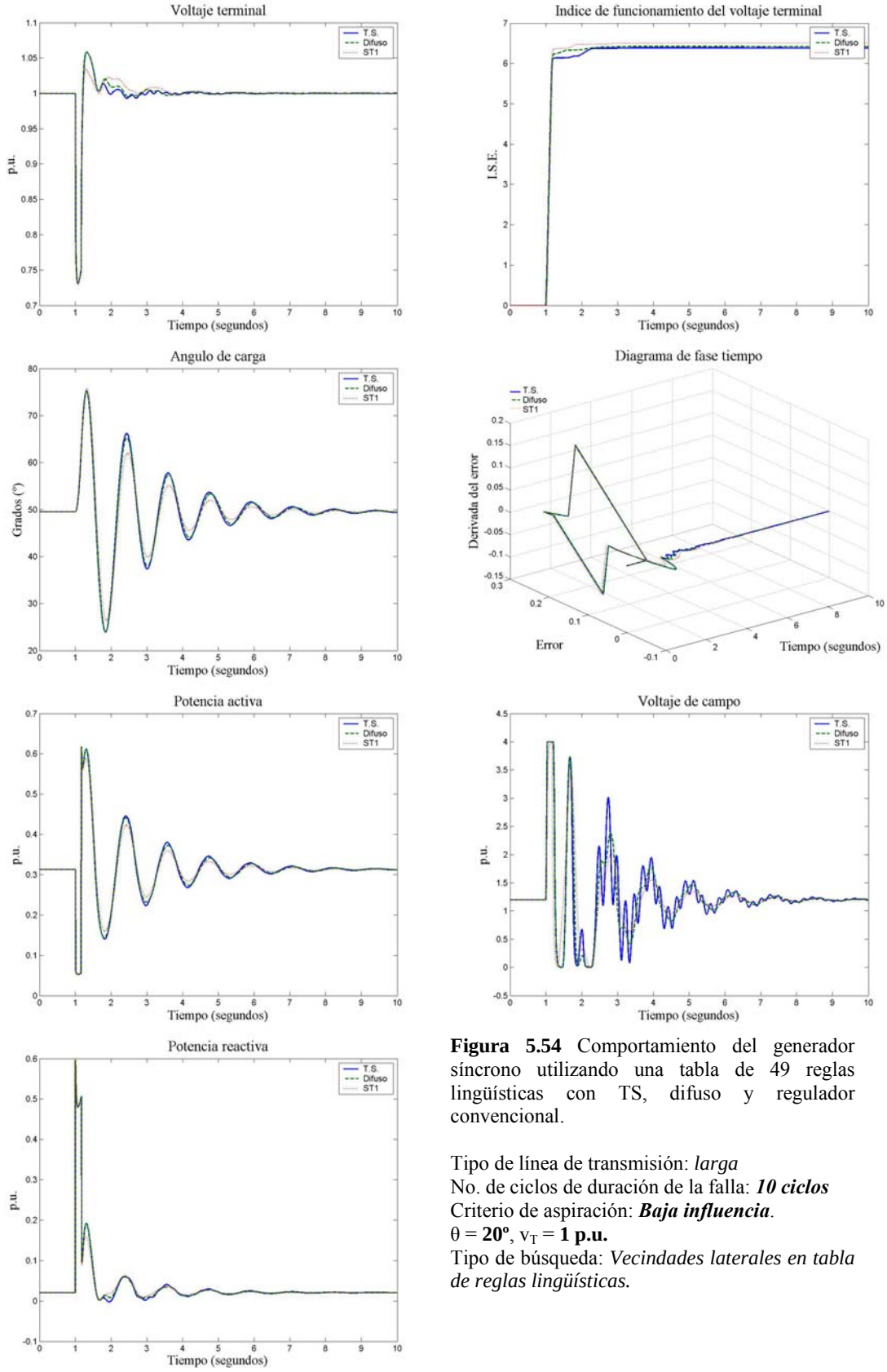



**Figura 5.54** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: ***10 ciclos***
Criterio de aspiración: ***Baja influencia***.
$\theta$ = **20º**, $v_T$ = **1 p.u.**
Tipo de búsqueda: *Vecindades laterales en tabla de reglas lingüísticas.*

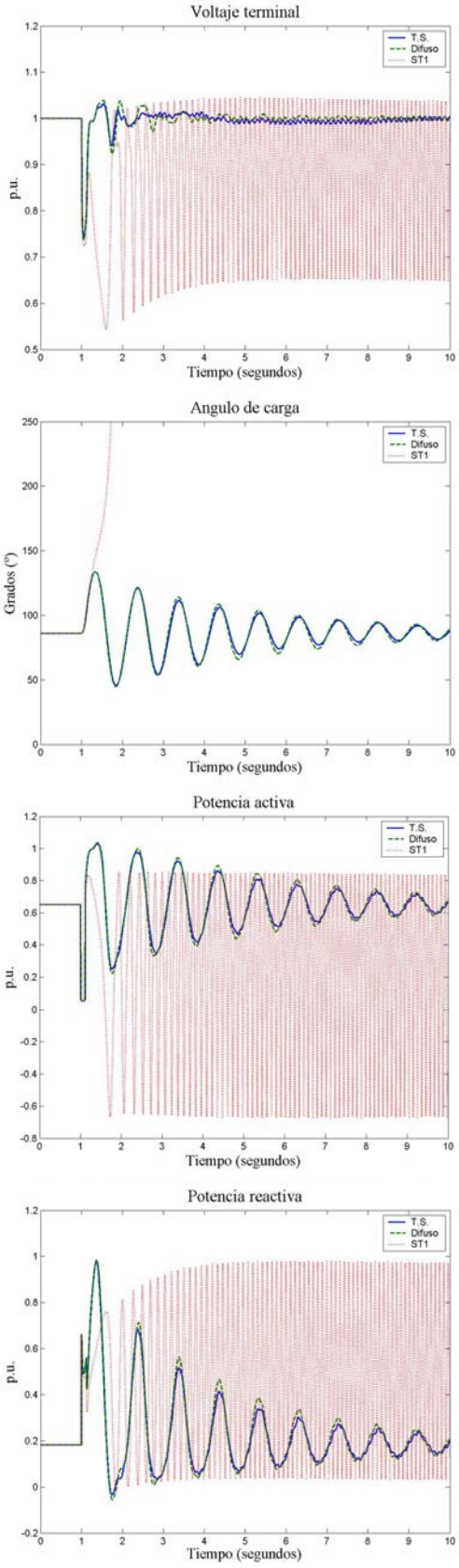



**Figura 5.55** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: ***7 ciclos***
Criterio de aspiración: ***Baja influencia***.
$\theta$ = **43.8728º**, $v_T$ = **1 p.u.**
Tipo de búsqueda: *Vecindades laterales en tabla de reglas lingüísticas***.**

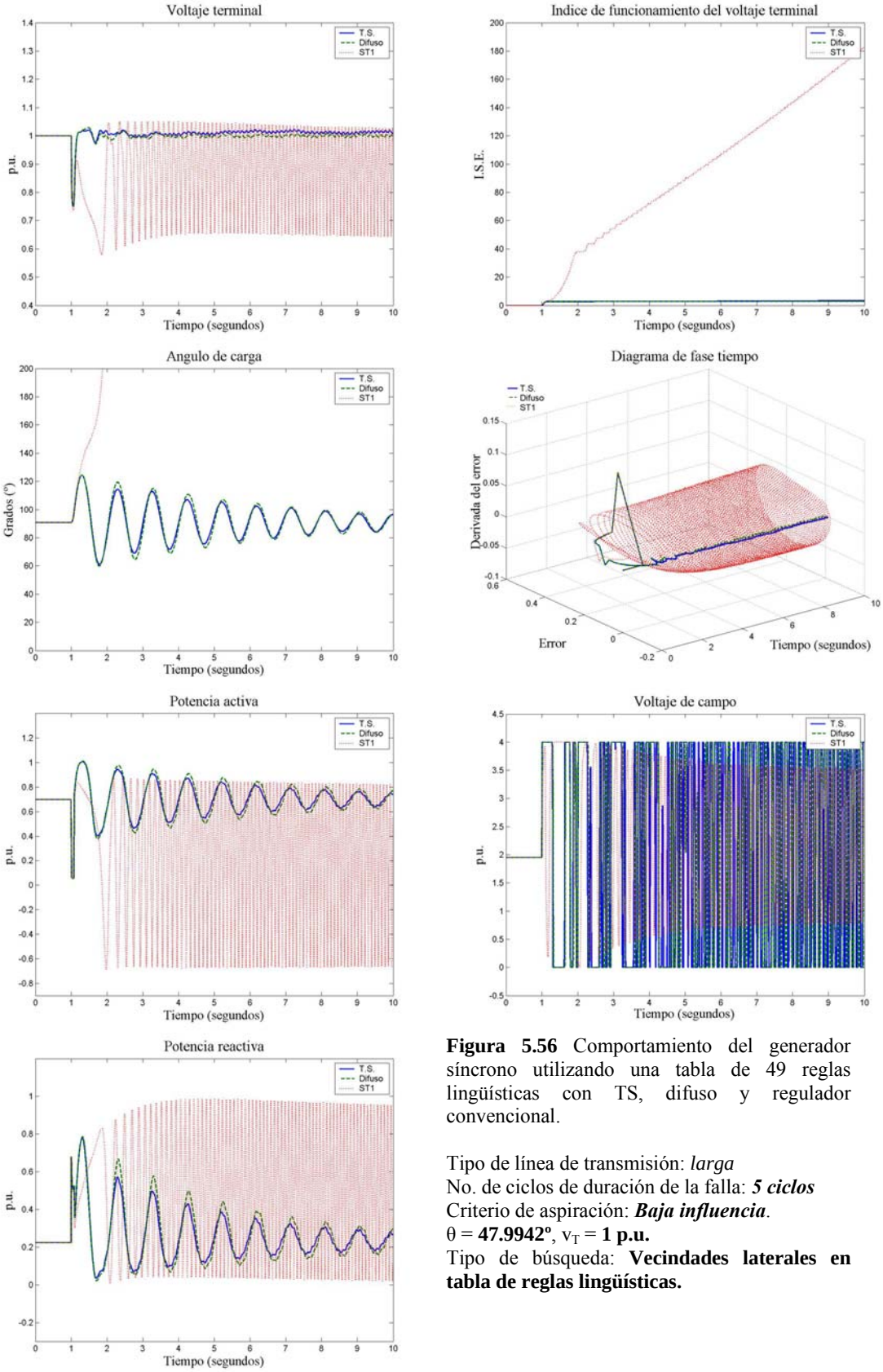



**Figura 5.56** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: ***5 ciclos***
Criterio de aspiración: ***Baja influencia***.
$\theta$ = **47.9942º**, $v_T$ = **1 p.u.**
Tipo de búsqueda: **Vecindades laterales en tabla de reglas lingüísticas.**

En la figura 5.57 se presentan algunas de las tablas resultantes después de la aplicación de TS por el criterio de alta influencia correspondientes a la figura 5.56.

| $\Delta e$ \ $e$ | NGR | NME | NPE | ZE | PPE | PME | PGR |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | BG | BG | BG | BG | BG | **CE** | **CE** |
| **NME** | BG | BG | BG | **BG** | **BG** | **CE** | **AM** |
| **NPE** | BG | BM | BM | **BM** | **AM** | AM | AM |
| **ZE** | BM | BM | **BM** | **CE** | **CE** | AM | AM |
| **PPE** | BM | BP | **AM** | **AM** | AM | AM | AG |
| **PME** | BP | **CE** | **AG** | **AG** | AM | AG | AG |
| **PGR** | **CE** | AP | AM | AM | AG | AG | AG |

Figura 5.57 (a) Tabla de reglas lingüísticas resultante.

| $\Delta e$ \ $e$ | NGR | NME | NPE | ZE | PPE | PME | PGR |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | BG | BG | BG | BG | BG | CE | **CE** |
| **NME** | BG | BG | BG | BG | BG | **CE** | AM |
| **NPE** | BG | BM | BM | BM | **AM** | AM | AM |
| **ZE** | BM | BM | BM | **CE** | CE | AM | AM |
| **PPE** | BM | BP | **AM** | AM | AM | AM | AG |
| **PME** | BP | **CE** | AG | AG | AM | AG | AG |
| **PGR** | **CE** | AP | AM | AM | AG | AG | AG |

Figura 5.57 (b) Diagrama de fase lingüístico.

(a)

| $\Delta e$ \ $e$ | NGR | NME | NPE | ZE | PPE | PME | PGR |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **NME** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **NPE** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **ZE** | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| **PPE** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **PME** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **PGR** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |

Figura 5.57 (c) Memoria explícita

| $\Delta e$ \ $e$ | NGR | NME | NPE | ZE | PPE | PME | PGR |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | 0 | 21 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| **NME** | 0 | 1 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **NPE** | 12 | 3 | 10 | 0 | 0 | 0 | 2 |
| **ZE** | 10 | 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7 |
| **PPE** | 3 | 9 | 1 | 0 | 0 | 3 | 4 |
| **PME** | 3 | 5 | 1 | 0 | 0 | 4 | 17 |
| **PGR** | 0 | 1 | 2 | 0 | 0 | 4 | 15 |

Figura 5.57 (d) Memoria de frecuencia

**Figura 5.57** Tablas resultantes después de la aplicación de TS por el criterio de aspiración de alta influencia con $\theta = 47.9942º$, $v_T = 1.0$ p.u. y simulando una duración de falla de 7 ciclos.

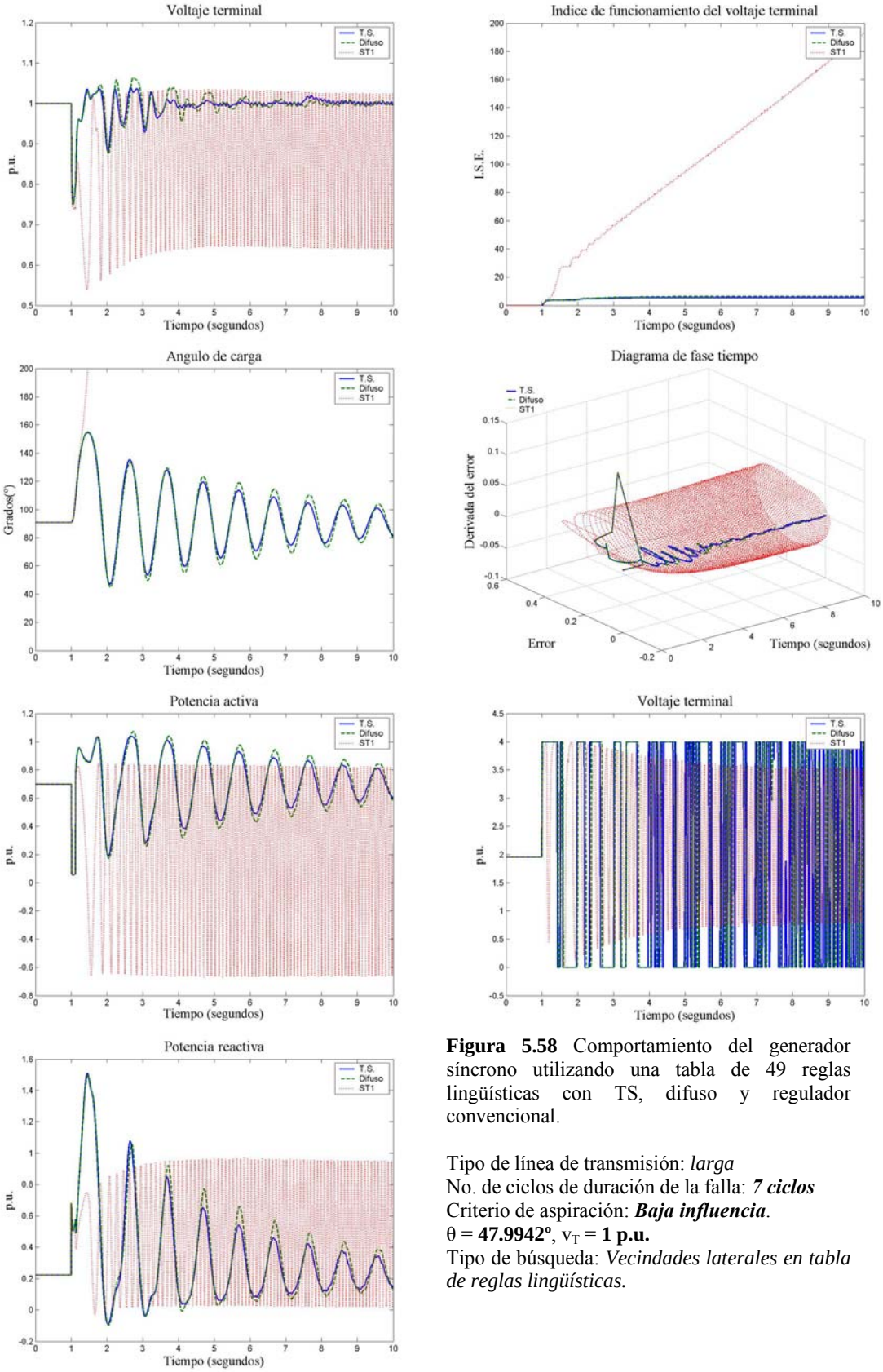



**Figura 5.58** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: ***7 ciclos***
Criterio de aspiración: ***Baja influencia***.
$\theta$ = **47.9942º**, $v_T$ = **1 p.u.**
Tipo de búsqueda: *Vecindades laterales en tabla de reglas lingüísticas.*

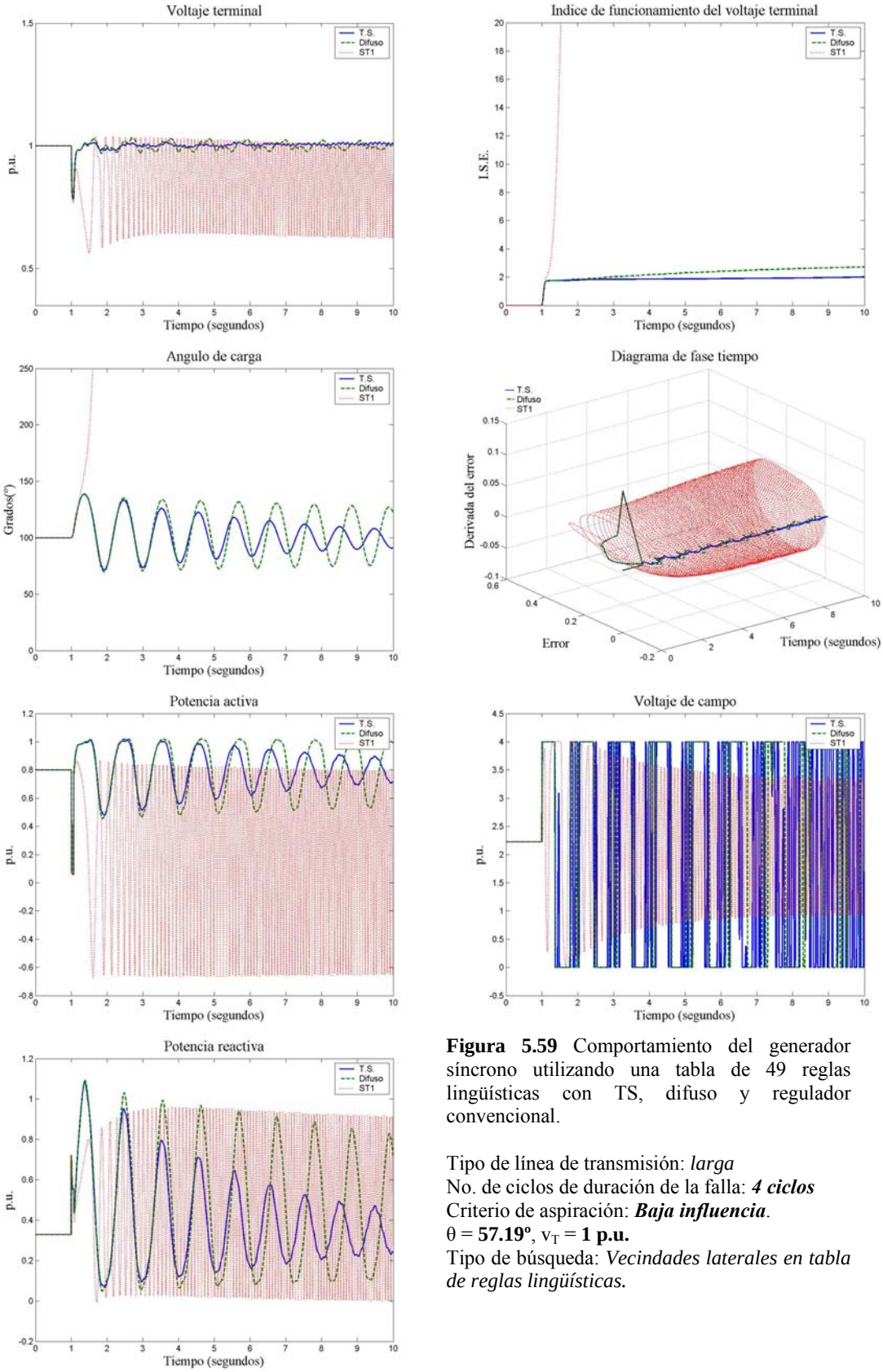



**Figura 5.59** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: ***4 ciclos***
Criterio de aspiración: ***Baja influencia***.
$\theta$ = **57.19º**, $v_T$ = **1 p.u.**
Tipo de búsqueda: *Vecindades laterales en tabla de reglas lingüísticas.*

| $\Delta e$ \ $e$ | NGR | NME | NPE | ZE | PPE | PME | PGR |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | BG | BG | BG | BM | BM | BP | **CE** |
| **NME** | BG | BG | BG | BG | BM | **CE** | AM |
| **NPE** | BG | BM | BM | BM | **CE** | AP | AM |
| **ZE** | BM | BM | BM | **CE** | CE | AM | AM |
| **PPE** | BM | BP | **CE** | AM | AM | AM | AG |
| **PME** | BP | **CE** | AP | AM | AM | AG | AG |
| **PGR** | **BP** | AP | AM | AM | AG | AG | AG |

Figura 5.60 (a) Diagrama de fase lingüístico.

| $\Delta e$ \ $e$ | NGR | NME | NPE | ZE | PPE | PME | PGR |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | BG | BG | BG | BM | BM | BP | **CE** |
| **NME** | BG | BG | **BG** | **BG** | **BM** | **CE** | **AM** |
| **NPE** | BG | BM | BM | **BM** | **CE** | AP | AM |
| **ZE** | BM | BM | **BM** | **CE** | **CE** | AM | AM |
| **PPE** | BM | BP | **CE** | **AM** | AM | AM | AG |
| **PME** | BP | **CE** | AP | AM | AM | AG | AG |
| **PGR** | **BP** | AP | AM | AM | AG | AG | AG |

Figura 5.60 (b) Tabla de reglas lingüísticas resultante.

| $\Delta e$ \ $e$ | NGR | NME | NPE | ZE | PPE | PME | PGR |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **NME** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **NPE** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **ZE** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **PPE** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **PME** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **PGR** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Figura 5.60 (c) Memoria explícita

| $\Delta e$ \ $e$ | NGR | NME | NPE | ZE | PPE | PME | PGR |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | 10 | 5 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| **NME** | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 7 | 4 |
| **NPE** | 3 | 4 | 0 | 0 | 0 | 15 | 4 |
| **ZE** | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 12 | 10 |
| **PPE** | 2 | 1 | 0 | 4 | 0 | 10 | 4 |
| **PME** | 1 | 3 | 2 | 6 | 6 | 19 | 4 |
| **PGR** | 0 | 0 | 0 | 0 | 5 | 5 | 6 |

Figura 5.60 (d) Memoria de frecuencia.

**Figura 5.60** Tabla de reglas lingüísticas resultante después de la aplicación de TS por el criterio de aspiración de alta influencia con $\theta = 57.19º$, $v_T = 1.0$ p.u. y simulando una duración de falla de 4 ciclos .

### *5.3.9 RESULTADOS OBTENIDOS DESPUÉS DE REALIZAR UNA PRUEBA DE AUTOSINTONIZACIÓN SOBRE UNA TABLA DE 49 REGLAS LINGÜÍSTICAS POR EL CRITERIO DE BAJA INFLUENCIA EMPLEANDO UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN CORTA.*

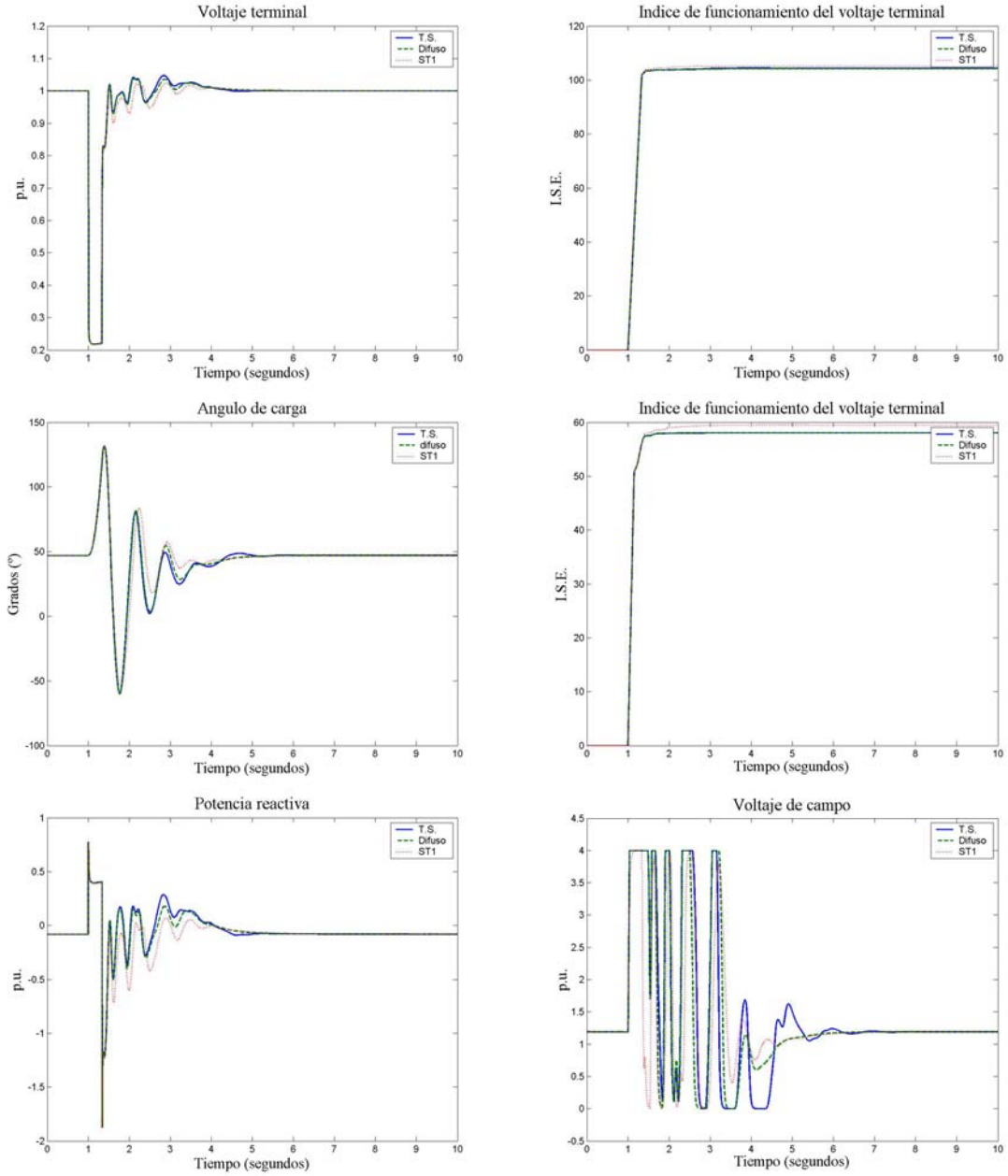



**Figura 5.61** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: corta
No. de ciclos de duración de la falla: *10 ciclos*
Criterio de aspiración: *Baja influencia*.
$\theta = \mathbf{3^o}$, $v_T = \mathbf{1\ p.u.}$
Tipo de búsqueda: *Vecindades laterales sobre una tabla de 49 reglas lingüísticas*

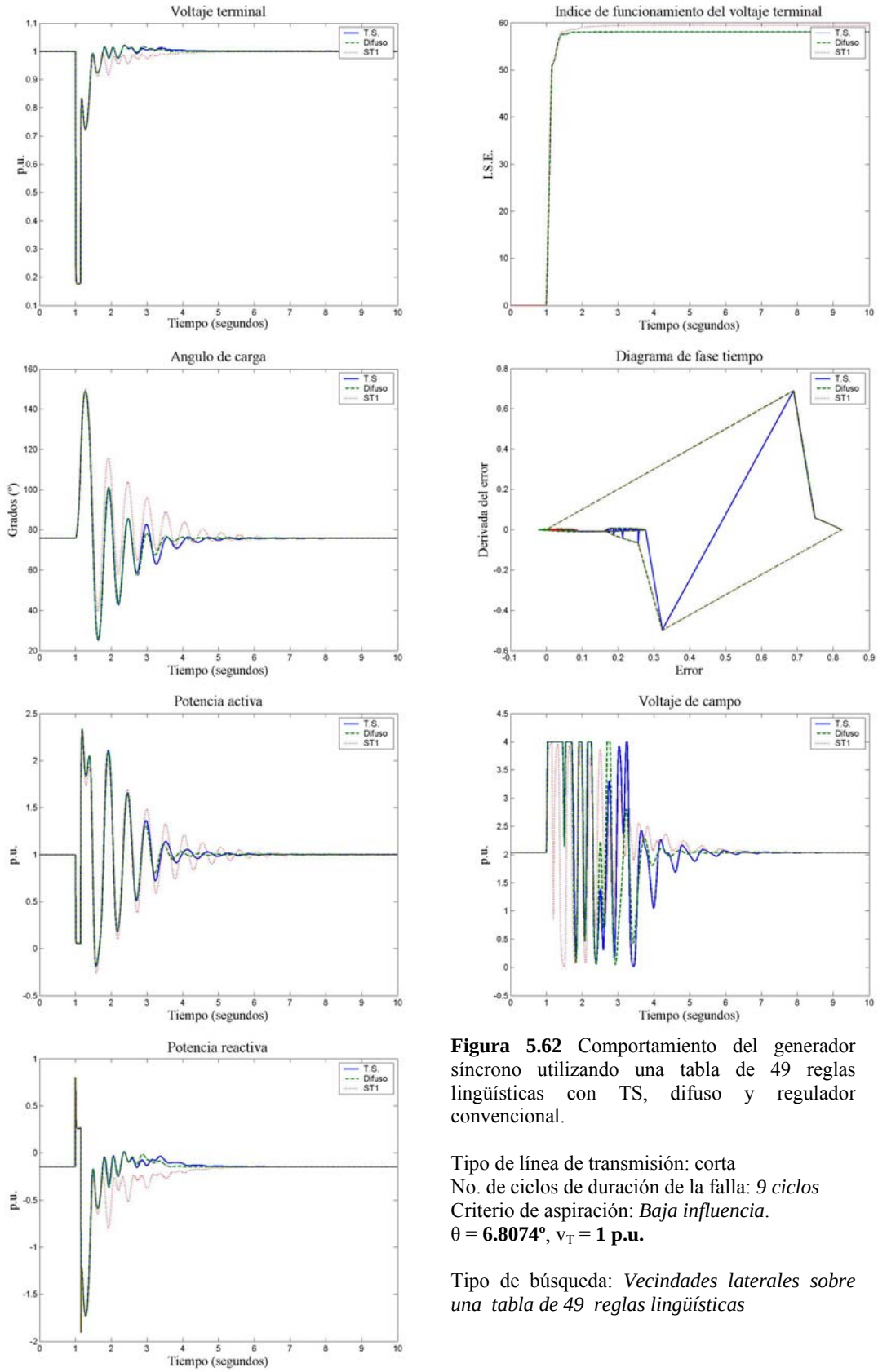



**Figura 5.62** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional.

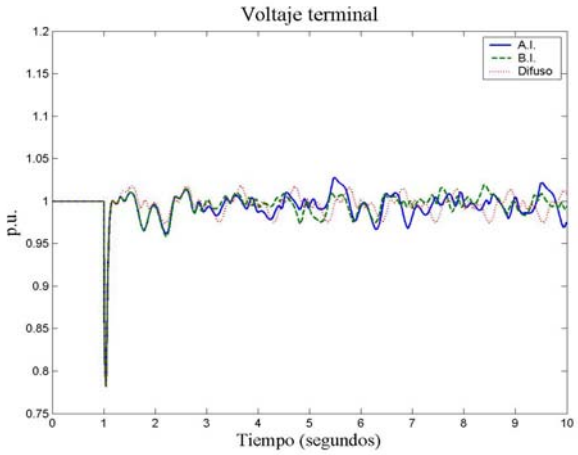
Tipo de línea de transmisión: corta
No. de ciclos de duración de la falla: *9 ciclos*
Criterio de aspiración: *Baja influencia*.
$\theta$ = **6.8074º**, $v_T$ = **1 p.u.**

Tipo de búsqueda: *Vecindades laterales sobre una tabla de 49 reglas lingüísticas*

### *5.3.10 ANÁLISIS DEL CRITERIO DE ALTA INFLUENCIA Y EL CRITERIO DE BAJA INFLUENCIA SOBRE UNA BÚSQUEDA TABÚ EMPLEANDO VECINDADES LATERALES.*

Los resultados hasta el momento presentados son obtenidos después de simular el regulador de voltaje convencional, controlador difuso y la técnica de inteligencia búsqueda por tabú, la mayoría de esta pruebas reflejan comportamientos muy similares en diversos puntos de operación debido a que se trata de un modelo en por unidad la diferencia entre un criterio y otro resultan muy semejantes a continuación se retoman las figuras 5.49 y 5.59 como punto de análisis para el criterio de alta y baja influencia con las siguientes características:

Tipo de línea de transmisión: **larga**
No. de ciclos de duración de la falla: ***4 ciclos***
Criterio de aspiración: ***Baja vs alta influencia***.
$\theta$ = **57.19º**, $v_T$ = **1 p.u.**




5.63 (a) Comparación entre el criterio de baja influencia y el criterio de alta influencia

Al comienzo de todas las simulaciones presentadas en este trabajo todas las estructuras relacionadas con la memoria a corto plazo y largo plazo parten con un valor de cero, por ejemplo la memoria de frecuencia para una tabla de 5x5 acciones lingüísticas comienza con valores de cero (0), tal como se muestra en la estructura de la figura 5.63 (b):

| ***Δe*** \| ***e*** | **NGR** | **NME** | **ZE** | **PME** | **PGR** |
|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **NME** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **ZE** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **PME** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **PGR** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

5.63 emoria de frecuencia

- *Donde las estructuras restantes comienzan con los siguientes valores:*

Tabú-sumado

| **NGR** | **NME** | **ZE** | **PME** | **PGR** |
|---|---|---|---|---|
| 0.125s | 0.125s | 0.125s | 0.125s | 0.125s |

Tabú-eliminado

| **NGR** | **NME** | **ZE** | **PME** | **PGR** |
|---|---|---|---|---|
| 1s | 1s | 1s | 1s | 1s |

5.63 (c) Estructuras asociadas.

**Figura 5.63** Estructuras finales de la búsqueda

En la figura 5.63 se comparan el criterio de A.I. (alta influencia, TS) y el criterio de B.I. (baja influencia). La figura 5.63 muestra la trayectoria descrita por el criterio de alta influencia es igual para el criterio de baja influencia antes del segundo 3, esta característica se debe a que las estructuras asociadas (memoria explícita, memoria de frecuencia, base tabú sumado-eliminado) son muy semejantes antes del segundo 3, después de este punto cada criterio ha establecido que solución debe permanecer en la solución élite y esta cualidad resulta en el movimiento del umbral de calidad sea diferente cuando se evalúa cada solución provocando los resultados mostrados en la figura 5.63. No es posible establecer con claridad cual criterio es el mejor, por ejemplo se tiene la siguiente tabla de reglas (t = 3 segundos):

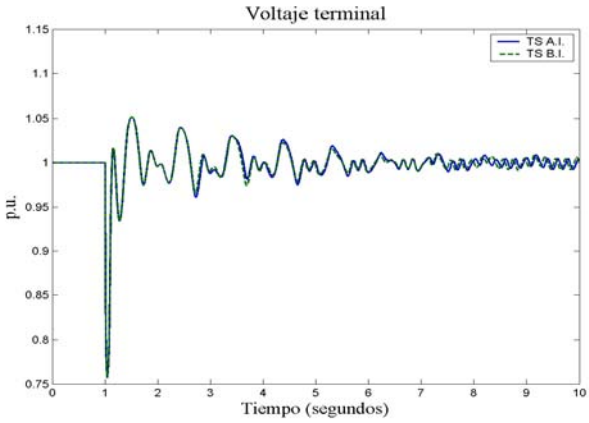
| ***Δe*** \| ***e*** | **NGR** | **NME** | **ZE** | **PME** | **PGR** |
|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | NG | NG | NG | NM | CE |
| **NME** | NG | NM | NM | CE | AM |
| **ZE** | NG | **NG** | CE | **PM** | AG |
| **PME** | NM | CE | AM | AM | AG |
| **PGR** | CE | PM | AG | AG | AG |

La solución actual es PM con una función objetivo fo(PM)= 0.0123 y tenemos las soluciones $x_1$' y $x_2$' denotadas por las acciones lingüísticas vecinas AG y CE donde fo(AG) = 0.0112 y fo(CE) = 0.0134, la mejor opción es AG pero su atributo tabú es 1 segundo y no puede ser incluida en la tabla de reglas por su estado tabú activo, por lo tanto la trayectoria que proporciona el criterio de baja influencia no es el mismo que el criterio de alta influencia. En algunas ocasiones el criterio de alta influencia proporciona más soluciones de lo esperado por TS y perjudica el comportamiento establecido por la lógica difusa pero en algunas otras ocasiones resulta ser mucho mejor de lo esperado, un ejemplo claro se muestra en la figura 5.63 donde el criterio de baja influencia resulta ser la mejor opción.

Las multas y los incentivos establecidos aquí son diseñados de tal forma que nunca arrojen valores negativos o muy grandes, de lo contrario perjudica enormemente el funcionar de ambos criterios y principalmente la diversificación necesaria para TS, esta última es de gran importancia en la búsqueda debido a que se puede tratar con elementos jamás visitados, el espacio de búsqueda planteado en la tabla de reglas se limita solo a la lista de candidatos denotados por cada acción y reduce la posibilidad de recurrir a un número considerable de opciones, se debe tener cuidado en establecer de forma correcta la relación de numeradores y denominadores.

En las figuras correspondientes para TS empleando un criterio de alta influencia las tablas de reglas lingüísticas resultantes son muy parecidas, esto se debe a que las tablas convergen a un punto cercano al óptimo global.

El criterio hasta ahora manejado es referido bajo dos influencias teniendo en cuenta la mención hecha en el capitulo 2, la elección de un criterio de influencia con respecto a otro es denotado sobre el umbral, la calidad de una solución permite definir dicho umbral, la principal diferencia referida en este trabajo con respecto a el criterio de baja influencia contra el criterio de alta influencia es obtener una vecindad de puntos considerados buenos donde las mejores soluciones son catalogadas; sometiendo tales soluciones a una evaluación por ambos criterios.




5.64 (a) Criterio de alta influencia vs criterio de baja influencia, para un punto donde $v_T$ = 1.0 p.u., θ = 47.994, ciclos de falla 5.

Como se observa en la figura 5.64 la diferencia es mínima, el criterio de alta influencia esta basado sobre la selección del mejor candidato sobrepasando el estado tabú de la solución actual encontrada como mejor, por otro lado el criterio de baja influencia denota las características de residencia de una solución encontrada como la mejor, estas características mueven el umbral de su marco original de referencia, los denominadores y numeradores forman parte de una elección adecuada para el criterio de baja influencia debido a que representan la cantidad de veces que un elemento permanece dentro o fuera de la solución elite. El espacio de búsqueda tratado en la tabla de reglas lingüísticas es pequeño por lo tanto los numeradores deben ser relacionados por un factor que proporciona tales indicadores. En la figura 5.65 (b) se presentan las tablas de reglas lingüísticas finales obtenidas por ambos criterios.

Alta influencia

| ***Δe*** \ ***e*** | **NGR** | **NME** | **ZE** | **PME** | **PGR** |
|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | NG | NG | NG | NM | CE |
| **NME** | NG | NM | NM | CE | AM |
| **ZE** | NG | **NG** | CE | **AG** | AG |
| **PME** | NM | CE | AM | AM | AG |
| **PGR** | CE | PM | AG | AG | AG |

Baja influencia

| ***Δe*** \ ***e*** | **NGR** | **NME** | **ZE** | **PME** | **PGR** |
|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | NG | NG | NG | NM | CE |
| **NME** | NG | NM | NM | CE | AM |
| **ZE** | NG | **NG** | CE | AM | AG |
| **PME** | NM | CE | AM | AM | AG |
| **PGR** | CE | PM | AG | AG | AG |

5.65 (b). Tablas de reglas lingüísticas finales empleando el criterio de alta influencia y el criterio de baja influencia.

**Figura 5.65** Resultados obtenidos después de simular el generador con $v_T$ = 1.0 p.u., θ = 47.994, ciclos de falla 5 utilizando TS por el criterio de alta y baja influencia.

Las tablas mostradas en la figura 5.65 (b) no son las tablas que manejaron el comportamiento del voltaje terminal durante la simulación mostrada en la figura 5.64 (a), como se menciono en el capítulo 2 se esta construyendo una solución elite durante la aplicación de la búsqueda por tabú tales tablas son aquellas en t = 10 segundos.

## *5.4 RESULTADOS OBTENIDOS DESPUÉS DE REALIZAR UNA AUTOSINTONIZACIÓN SOBRE UNA TABLA DE 49 Y 81 REGLAS LINGÜÍSTICAS EMPLEANDO LA BÚSQUEDA POR TABÚ POR ENTORNO.*

### *5.4.1 INTRODUCCIÓN*

En esta sección se presentan los resultados obtenidos después de realizar una prueba de sintonización sobre una tabla de 49 y 81 reglas lingüísticas utilizando una búsqueda por entorno por el criterio de alta influencia simulando el generador síncrono con la una línea de transmisión larga y corta sobre diversos puntos de operación e incremento de carga.

### *5.4.2 RESULTADOS OBTENIDOS DESPUÉS DE REALIZAR UNA AUTOSINTONIZACIÓN SOBRE UNA TABLA DE 81 REGLAS LINGÜÍSTICAS EMPLEANDO LA BÚSQUEDA POR ENTORNO.*

El objetivo de mostrar el comportamiento del voltaje en terminales en diversos puntos de operación es conocer el comportamiento con los diversos reguladores planteados en esta tesis del generador síncrono conforme la carga aumenta (incremento en la potencia activa y reactiva). En esta sección se presenta los resultados correspondientes a la sintonización realizada por medio de la búsqueda por tabú a una tabla de 81 reglas lingüísticas empleando un vecindario de entorno; la ***primera prueba*** muestra el comportamiento del generador síncrono partiendo desde vacío hasta alcanzar un punto de operación donde la potencia activa esta próxima a 0.842 p.u. y el ángulo de carga cercano a los 105 grados, tal prueba sirve como referencia comparativa entre los resultados obtenidos por una técnica convencional y una técnica inteligente de control. Los datos correspondientes a la prueba son los siguientes:

- Tipo de línea de transmisión: larga; $Z = (0.12 + j1.1)\ \Omega$
- Tipo de búsqueda: Tabú alta influencia.
- Tipo de tabla de reglas inicial: Sintonizada manualmente.
- Tabla de reglas empleada inicial: indicada en apéndice A.

Los parámetros utilizados para la búsqueda por tabú por vecindario de entorno son los siguientes:

- Tabú-elemento eliminado : 1 segundos
- Tabú-elemento sumado: 0.124 segundos.
- Término a corto plazo: 0.125 segundos.
- Término a largo plazo: 0.24 segundos.
- Criterio de aspiración: alta influencia.

Con respecto a la tabla de reglas lingüísticas inicial es la referida en el apéndice A.

A continuación se presentan los resultados obtenidos después de simular el generador ante un incremento en la Potencia activa desde un valor inicial de 0 p.u.

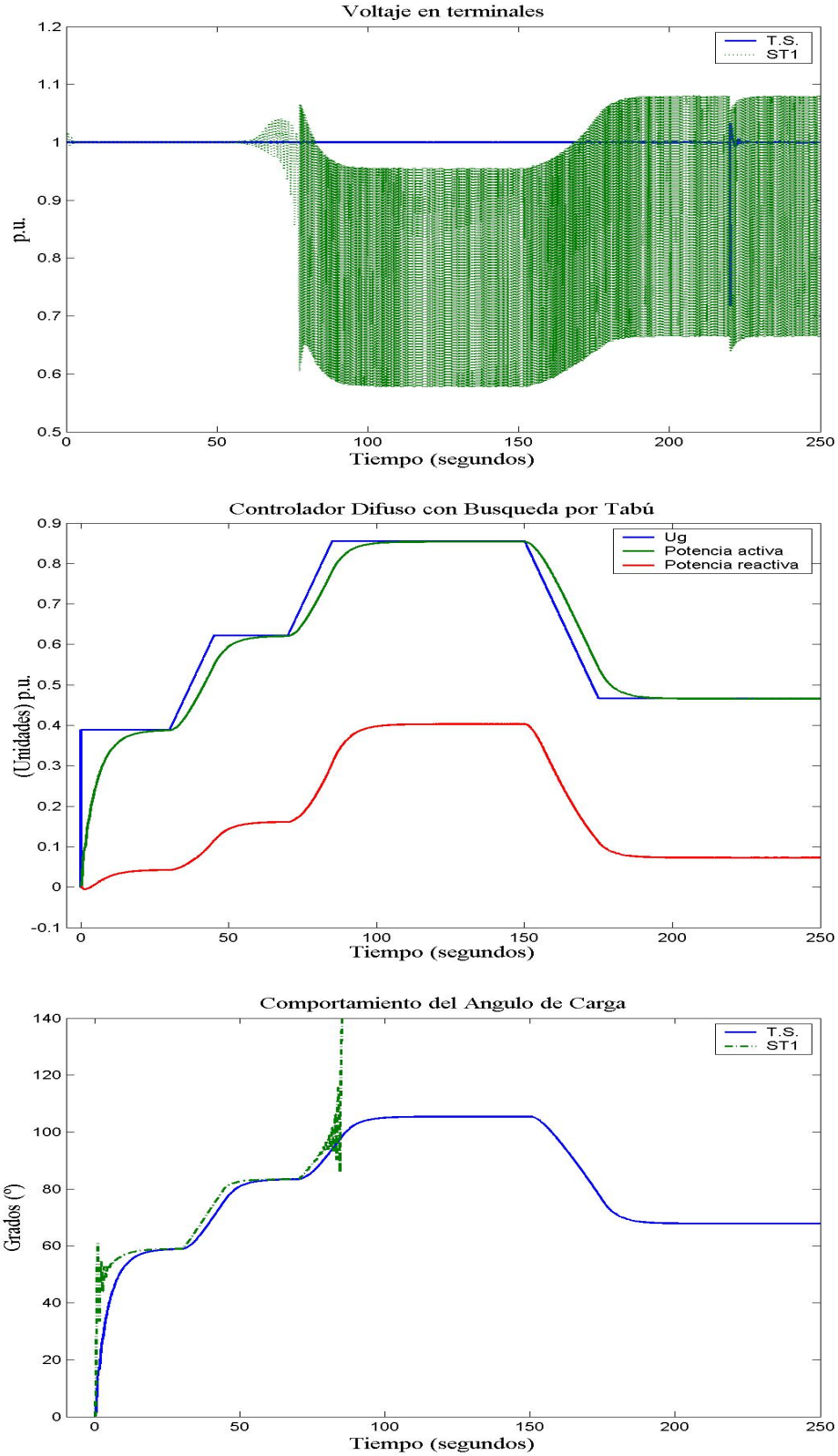



**Figura 5.66** Comportamiento del generador síncrono empleando 9 funciones de membresía con la búsqueda por tabú.

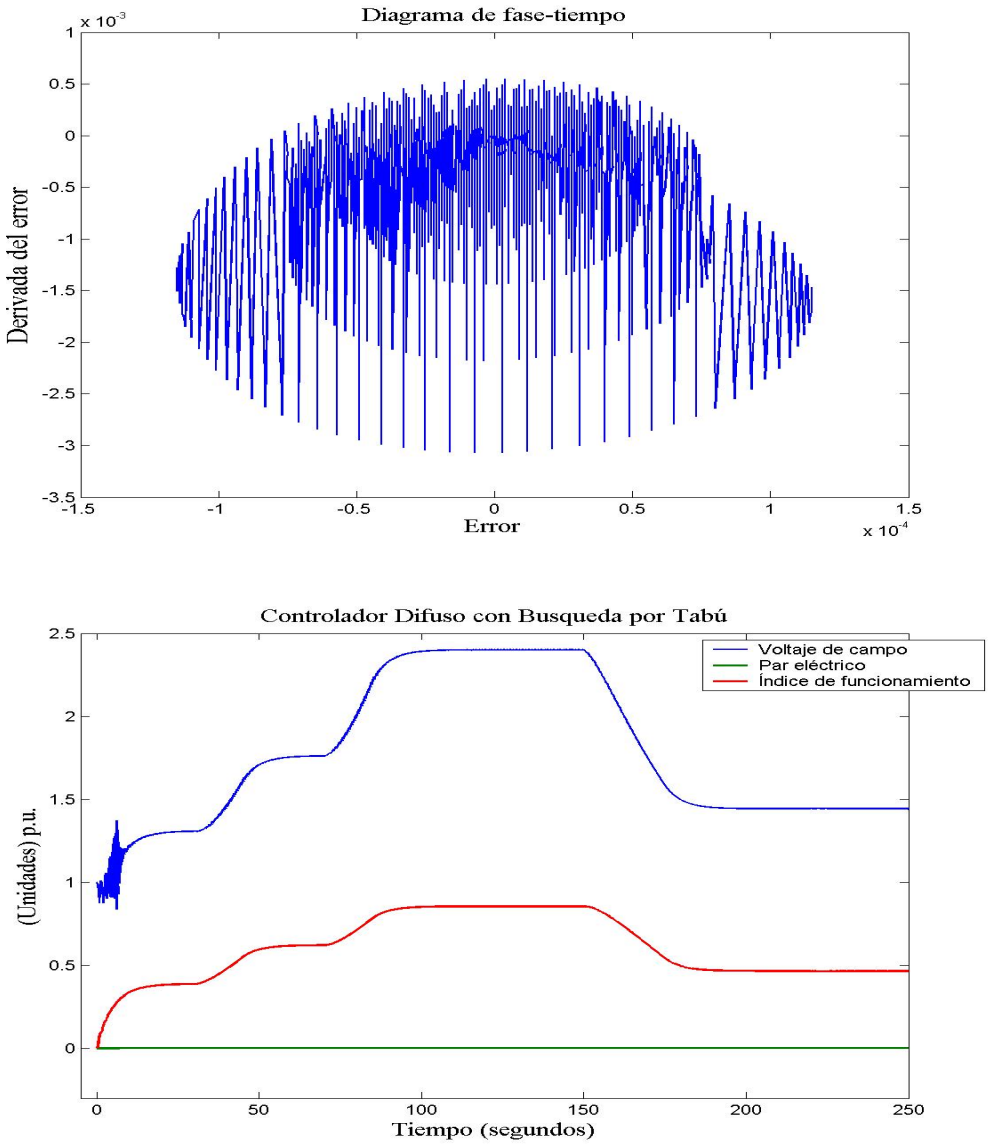



**Figura 5.67** Comportamiento del generador difuso empleando la búsqueda por tabú con una tabla de 81 reglas lingüísticas.

| $\Delta e$ \| $e$ | **NGR** | **NME** | **NPM** | **NPE** | **ZE** | **APE** | **APM** | **AM** | **AG** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | NG | NG | NG | NG | NM | NM | NPM | NPP | **CE** |
| **NME** | NG | NG | NG | NM | NM | NPM | NPP | **CE** | APP |
| **NPM** | NG | NG | NM | NM | NPM | NPP | **CE** | APP | APM |
| **NPE** | NG | NM | NM | NPM | NPP | **CE** | APP | APM | AG |
| **ZE** | NM | NM | NPM | NPP | **CE** | AM | APM | AM | AM |
| **APE** | NM | NPM | NPP | **CE** | APP | APP | AM | AM | AG |
| **APM** | NPM | NPP | **CE** | APM | APM | AM | AM | AG | AG |
| **AM** | NPP | **CE** | APP | AM | AM | AM | AG | AG | AG |
| **AGR** | **CE** | APP | APM | AM | AM | AG | AG | AG | AG |

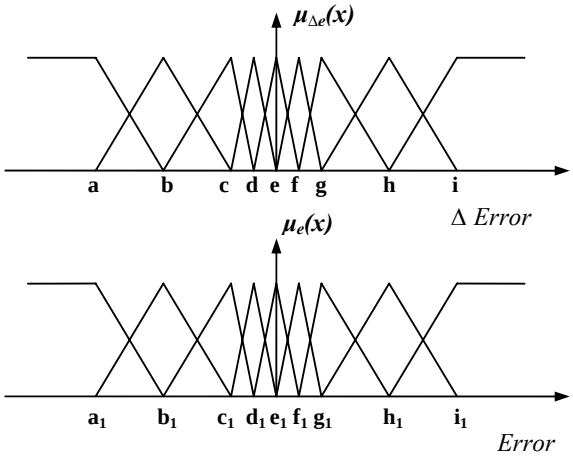
**Figura 5.68** Tabla resultante después de simular el controlador empleando la búsqueda por tabú.

El Comportamiento del controlador difuso empleando una tabla de 81 reglas lingüísticas fue el control más robusto presentado hasta el momento para la regulación de voltaje en terminales y puede soportar un incremento mayor de carga empleando la búsqueda por tabú en un tiempo relativamente más corto a comparación del resto de las simulaciones presentadas en este trabajo. La tabla inicial propuesta para la simulación de la figura 5.66 y 5.67 no son las tablas encontradas por TS sintonizando el controlador difuso en vacío tal como se plantea en los diversos puntos de operación de la máquina para 25 y 49 reglas lingüísticas sin incremento de carga, el resultado obtenido empleando más cantidad de reglas lingüísticas proporciona generalmente una ventaja en contra de tablas con menor número de reglas lingüísticas y además proporciona un espacio de búsqueda mas grande del proporcionado con la tabla de 25 y 49 reglas lingüísticas permitiendo tener a la búsqueda por tabú un recuento más amplio de rutas de exploración en diversas zonas de la tabla y permite proporcionar al proceso de obtención de la salida real un universo más amplio de barras singletons; la estabilidad absoluta del generador puede ser relacionada con el diagrama de fase tiempo de la figura 5.67, tal como se muestra la figura no denota un contorno cerrado pero es tan pequeño que se puede notar que el error y la derivada del error son próximas a cero reflejando la estabilidad del sistema.

A continuación se presenta una comparación gráfica entre el controlador difuso convencional y el optimizado, la diferencia que existe en la prueba de la figura 5.66 y 5.68 es el empleo de la tabla obtenida en la simulación de la figura 5.68 la cuál es utilizada en la simulación de la tabla 5.69 como tabla inicial.

En la figura 5.69 (a), (b) se presentan los resultados correspondientes a la simulación del generador síncrono comenzando desde vacío hasta un valor de la potencia activa igual a 0.78 p.u. empleando una tabla de 81 reglas lingüísticas utilizada en la figura 5.67.

Los intervalos establecidos para las funciones de membresía necesarias en el control difuso en los diferentes puntos de operación son los mostrados en la figura 5.69 (a).



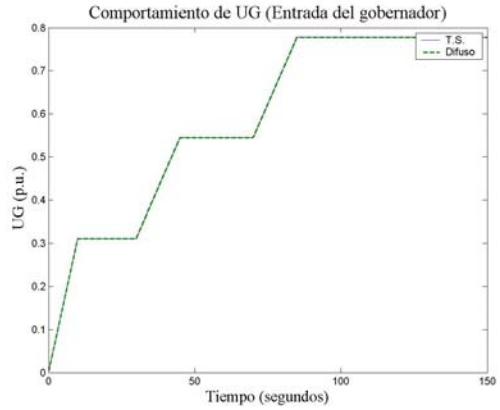

5.75 (a) Funciones de membresía.

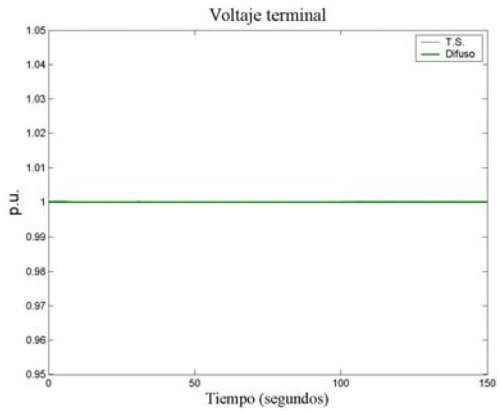
Donde para el:

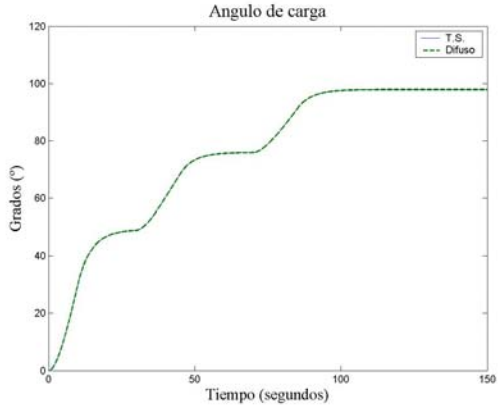
Error:
a = -0.14; b = -0.07; c = -0.005; d = -0.04; e = 0; f =0.04;g = 0.05; h = 0.7; i = 0.14

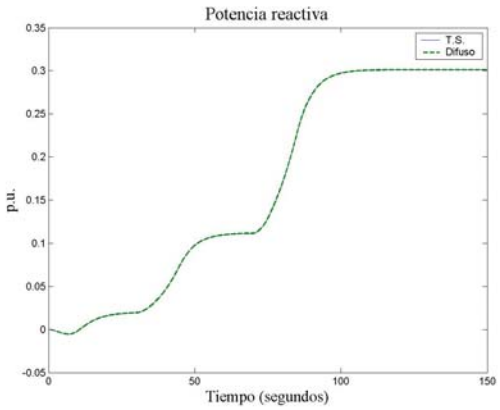
Y para la Derivada del error:

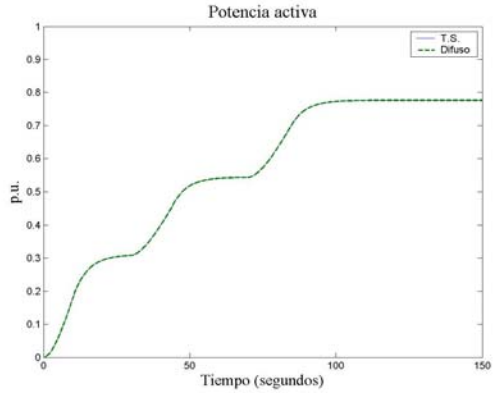
$a_1$=-0.002; $b_1$=-0.00045$c_1$=-0.0003; $d_1$=-0.0002; $e_1$=0; $f_1$=0.0002; $g_1$=0.0003; $h_1$=0.00045; $i_1$=0.002

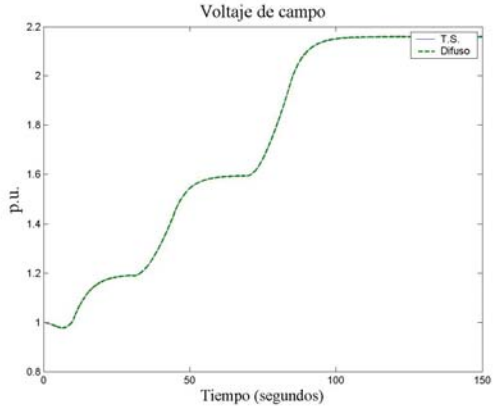


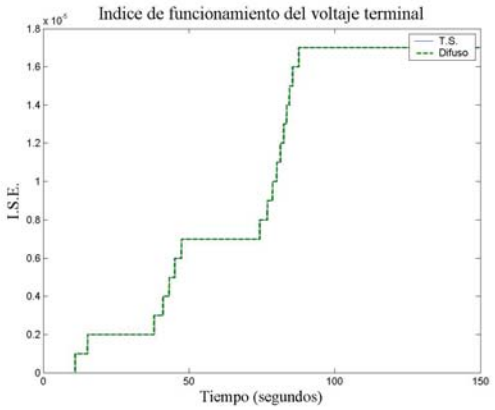




5.69 (c) Comportamiento del generador ante un incremento de la potencia activa de 0 a 0.78 p.u. utilizando un control difuso de 9 funciones de membresía y 81 reglas lingüísticas.

Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: *0 ciclos*
Criterio de aspiración: *Alta influencia.*
$\theta$ = **0º a 98º**, $v_T$ = **1 p.u.**
Tipo de búsqueda: *Por entorno sobre una tabla de 81 reglas lingüísticas.*

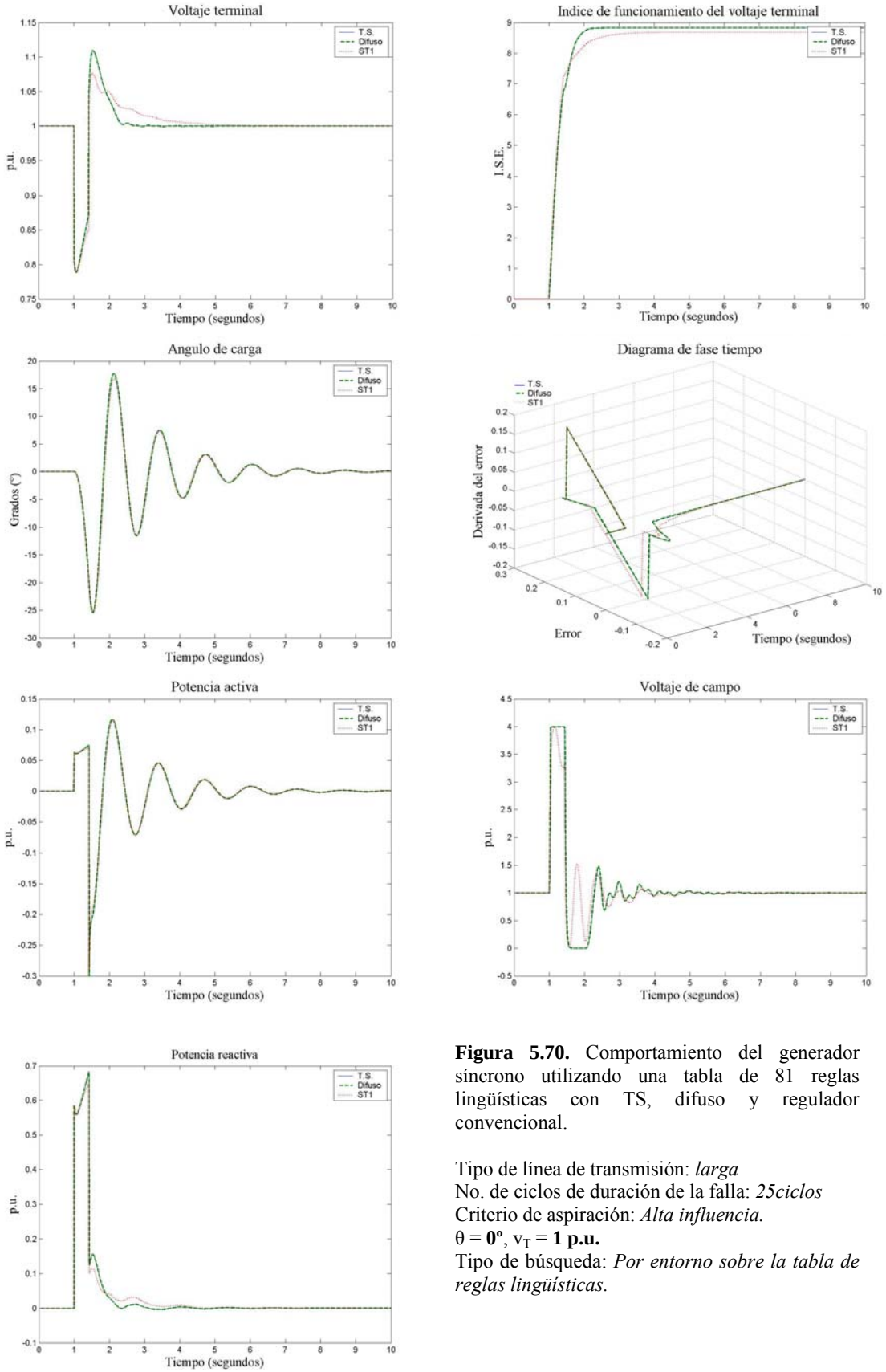



**Figura 5.70.** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 81 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: *25ciclos*
Criterio de aspiración: *Alta influencia.*
$\theta$ = **0º**, $v_T$ = **1 p.u.**
Tipo de búsqueda: *Por entorno sobre la tabla de reglas lingüísticas.*

A continuación se presenta en la figura 5.71 las estructuras relacionadas con la prueba realizada en la figura 5.69.

| $\Delta e$ \| $e$ | **NGR** | **NME** | **NPM** | **NPE** | **ZE** | **APE** | **APM** | **AM** | **AG** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | NG | NG | NG | NG | NM | NM | NPM | NPP | **CE** |
| **NME** | NG | NG | NG | NM | NM | NPM | NPP | **CE** | APP |
| **NPM** | NG | NG | NM | NM | NPM | NPP | **CE** | APP | APM |
| **NPE** | NG | NM | NM | NPM | NPP | **CE** | APP | APM | AM |
| **ZE** | NM | NPM | NPM | NPP | **CE** | APP | APM | AM | AM |
| **APE** | NM | NPM | NPP | **CE** | APP | APM | AM | AM | AG |
| **APM** | NPM | NPP | **CE** | APP | APM | AM | AM | AG | AG |
| **AM** | NPP | **CE** | APP | APM | AM | AM | AG | AG | AG |
| **AGR** | **CE** | APP | APM | AM | AM | AG | AG | AG | AG |

5.71. (a) Tabla resultante de reglas lingüísticas después de la aplicación de TS por el criterio de alta influencia sobre una búsqueda de entorno en vacío con una simulación de falla de duración de 25 ciclos.

| $\Delta e$ \| $e$ | **NGR** | **NME** | **NPM** | **NPE** | **ZE** | **APE** | **APM** | **AM** | **AG** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | **0** |
| **NME** | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **NPM** | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **NPE** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **ZE** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **APE** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **APM** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **AM** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **AGR** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |

5.71. (b) Memoria explícita.

| $\Delta e$ \| $e$ | **NGR** | **NME** | **NPM** | **NPE** | **ZE** | **APE** | **APM** | **AM** | **AG** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | NG | NG | NG | NG | NM | NM | NPM | NPP | **CE** |
| **NME** | NG | NG | NG | NM | NM | NPM | NPP | **CE** | APP |
| **NPM** | NG | NG | NM | NM | NPM | NPP | **CE** | APP | APM |
| **NPE** | NG | NM | NM | NPM | NPP | **CE** | APP | APM | AM |
| **ZE** | NM | NPM | NPM | NPP | **CE** | APP | APM | AM | AM |
| **APE** | NM | NPM | NPP | **CE** | **APM** | APM | AM | AM | AG |
| **APM** | NPM | NPP | **CE** | APP | APM | AM | AM | AG | AG |
| **AM** | NPP | **CE** | APP | APM | AM | AM | AG | AG | AG |
| **AGR** | **CE** | APP | APM | AM | AM | AG | AG | AG | AG |

5.71. (c) Diagrama de fase lingüístico.

**Figura 5.71.** Estructuras correspondientes a la figura 5.70 después de realizar una prueba empleando una búsqueda por tabú por el criterio de alta influencia sobre entorno.

Las estructuras mostradas en la figura 5.71 son las correspondientes a la simulación presentada en la figura 5.70, la cuál muestra que el sobretiro en el voltaje después de la liberación de la falla es no mayor al 15-20 % según la IEEE y [9], [14], [30], tal como se muestra el comportamiento del voltaje de campo el voltaje limite producido en el sistema de excitación es directamente proporcional al voltaje difuso del regulador y al voltaje terminal [29] lo que indica que los valores de las constantes proporcional e integral del controlador difuso fuesen variables es posible eliminar tal sobretiro cuando el generador trabaja con poca carga reflejado en el índice de funcionamiento del voltaje en terminales.

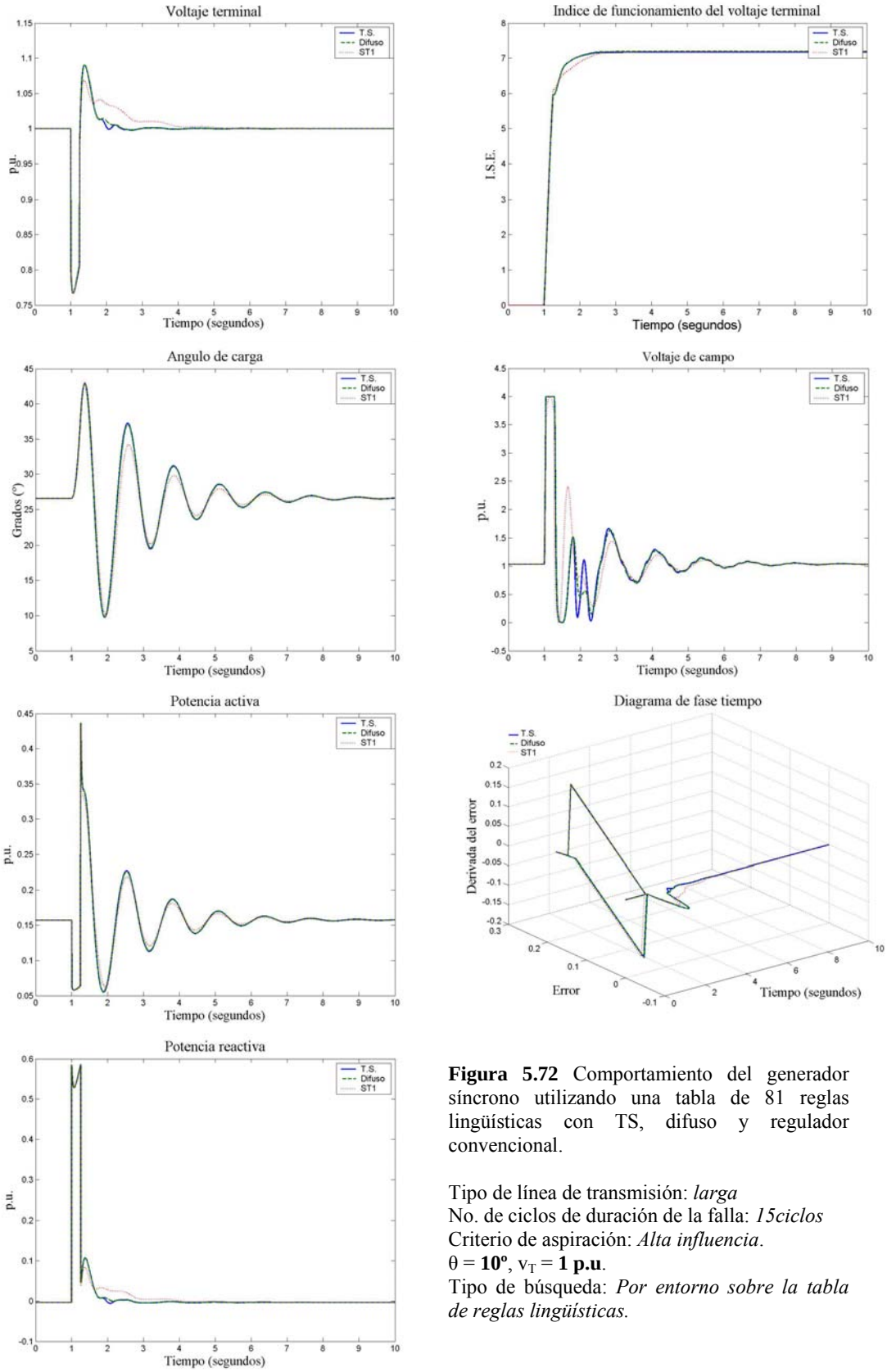



**Figura 5.72** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 81 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: *15ciclos*
Criterio de aspiración: *Alta influencia*.
$\theta$ = **10º**, $v_T$ = **1 p.u**.
Tipo de búsqueda: *Por entorno sobre la tabla de reglas lingüísticas.*

A continuación se presenta en la figura 5.73 las estructuras relacionadas con la prueba realizada en la figura 5.72.

| $\Delta e$ \ $e$ | **NGR** | **NME** | **NPM** | **NPE** | **ZE** | **APE** | **APM** | **AM** | **AG** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | NG | NG | NG | NG | NM | NM | NPM | NPP | **CE** |
| **NME** | NG | NG | NG | NM | NM | NPM | NPP | **CE** | APP |
| **NPM** | NG | NG | NM | NM | NPM | NPP | **CE** | APP | APM |
| **NPE** | NG | NM | NM | NPM | NPP | **CE** | APP | APM | AM |
| **ZE** | NM | NPM | NPM | NPP | **CE** | **AM** | APM | AM | AM |
| **APE** | NM | NPM | NPP | **CE** | APP | APM | AM | AM | AG |
| **APM** | NPM | NPP | **CE** | APP | **AM** | AM | AM | AG | AG |
| **AM** | NPP | **CE** | APP | **CE** | AM | AM | AG | AG | AG |
| **AGR** | **CE** | APP | APM | AM | AM | AG | AG | AG | AG |

5.73 (a) Tabla resultante de reglas lingüísticas.

| $\Delta e$ \ $e$ | **NGR** | **NME** | **NPM** | **NPE** | **ZE** | **APE** | **APM** | **AM** | **AG** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| **NME** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **NPM** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **NPE** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **ZE** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **APE** | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **APM** | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **AM** | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **AGR** | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

5.73 (b) Memoria explícita.

| $\Delta e$ \ $e$ | **NGR** | **NME** | **NPM** | **NPE** | **ZE** | **APE** | **APM** | **AM** | **AG** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | NG | NG | NG | NG | NM | NM | NPM | NPP | **CE** |
| **NME** | NG | NG | NG | NM | NM | NPM | NPP | **CE** | APP |
| **NPM** | NG | NG | NM | NM | NPM | NPP | **CE** | APP | APM |
| **NPE** | NG | NM | NM | NPM | NPP | **CE** | APP | APM | AM |
| **ZE** | NM | NPM | NPM | NPP | **CE** | **AM** | APM | AM | AM |
| **APE** | NM | NPM | NPP | **CE** | APP | APM | AM | AM | AG |
| **APM** | NPM | NPP | **CE** | APP | **AM** | AM | AM | AG | AG |
| **AM** | NPP | **CE** | APP | **CE** | AM | AM | AG | AG | AG |
| **AGR** | **CE** | APP | APM | AM | AM | AG | AG | AG | AG |

5.73 (c) Diagrama de fase-lingüístico.

**Figura 5.73.** Estructuras correspondientes a la figura 5.72 después de la aplicación de TS por el criterio de alta influencia sobre una búsqueda de entorno con un vt = 1.0 p.u. y θ = 10º con una simulación de falla de duración de 15 ciclos.

Tal como se indico en la figura 5.71 conforme el generador regula voltaje con más carga la regulación en terminales del voltaje es mejorada mediante la sintonización de la tabla de reglas lingüísticas a través de la búsqueda por tabú como se presenta en la figura 5.72.

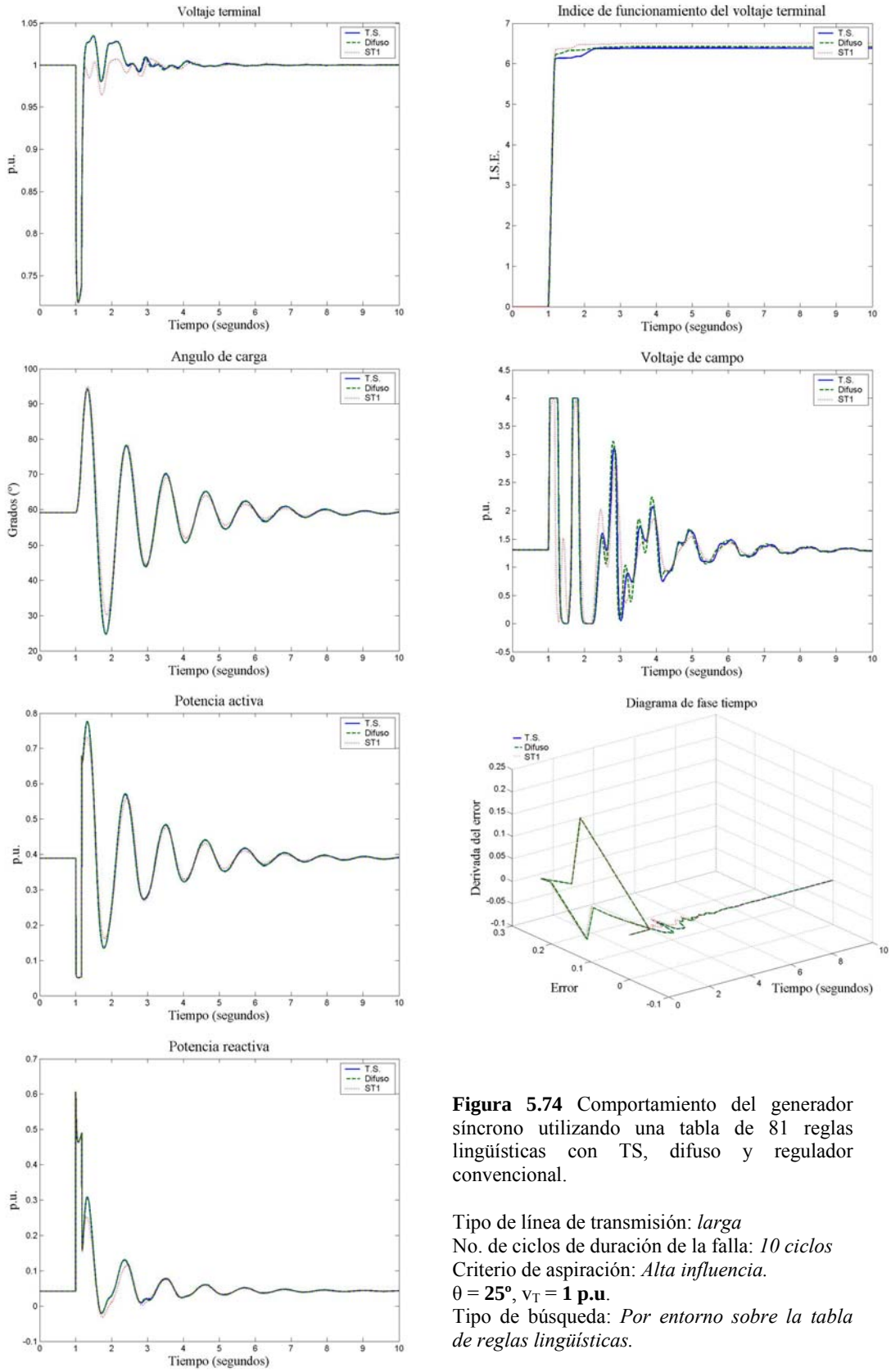



**Figura 5.74** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 81 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: *10 ciclos*
Criterio de aspiración: *Alta influencia.*
$\theta$ = **25º**, $v_T$ = **1 p.u**.
Tipo de búsqueda: *Por entorno sobre la tabla de reglas lingüísticas.*

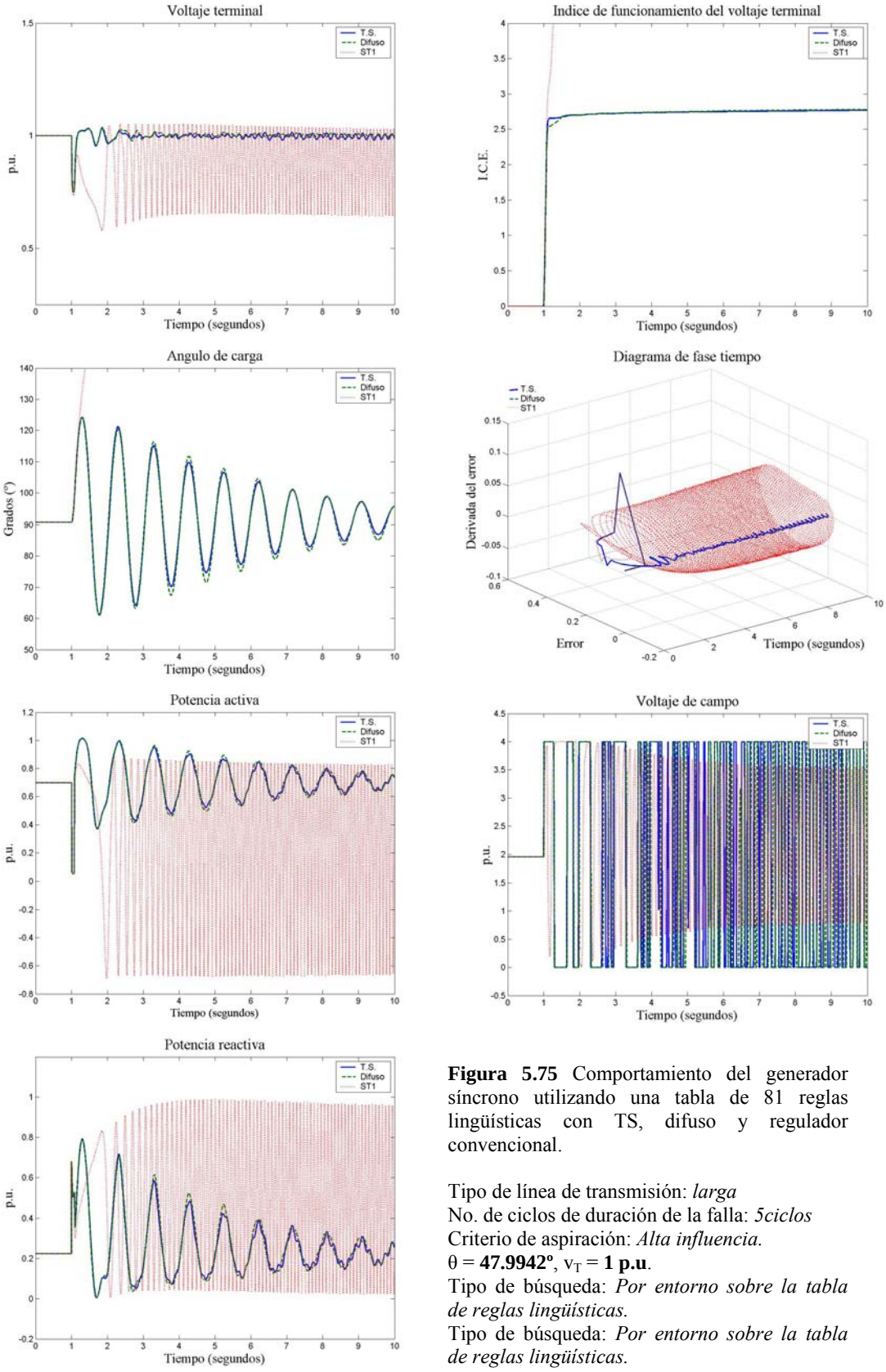



**Figura 5.75** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 81 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: *5ciclos*
Criterio de aspiración: *Alta influencia.*
$\theta$ = **47.9942º**, $v_T$ = **1 p.u**.
Tipo de búsqueda: *Por entorno sobre la tabla de reglas lingüísticas.*
Tipo de búsqueda: *Por entorno sobre la tabla de reglas lingüísticas.*

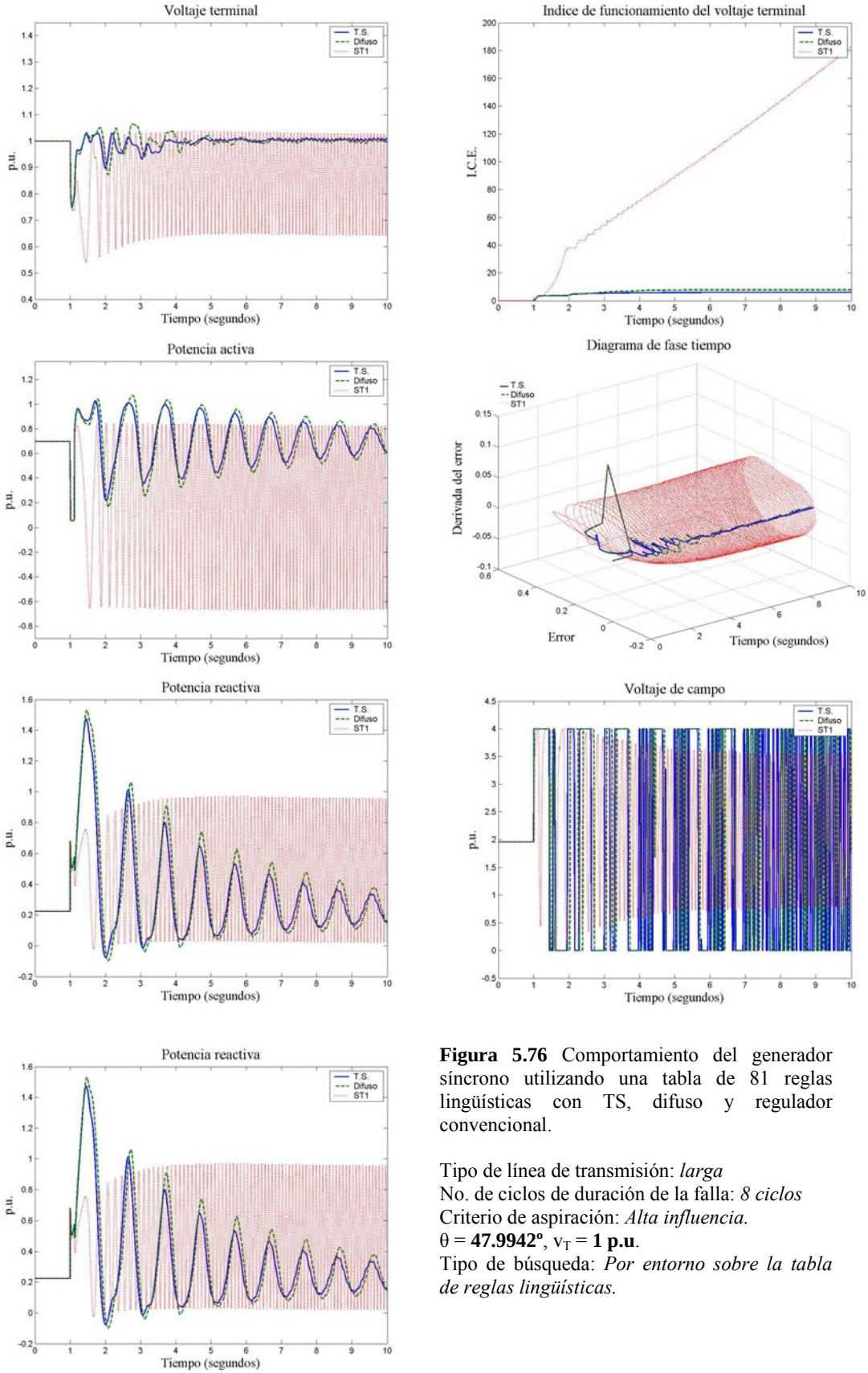



**Figura 5.76** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 81 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: *8 ciclos*
Criterio de aspiración: *Alta influencia.*
$\theta$ = **47.9942º**, $v_T$ = **1 p.u**.
Tipo de búsqueda: *Por entorno sobre la tabla de reglas lingüísticas.*

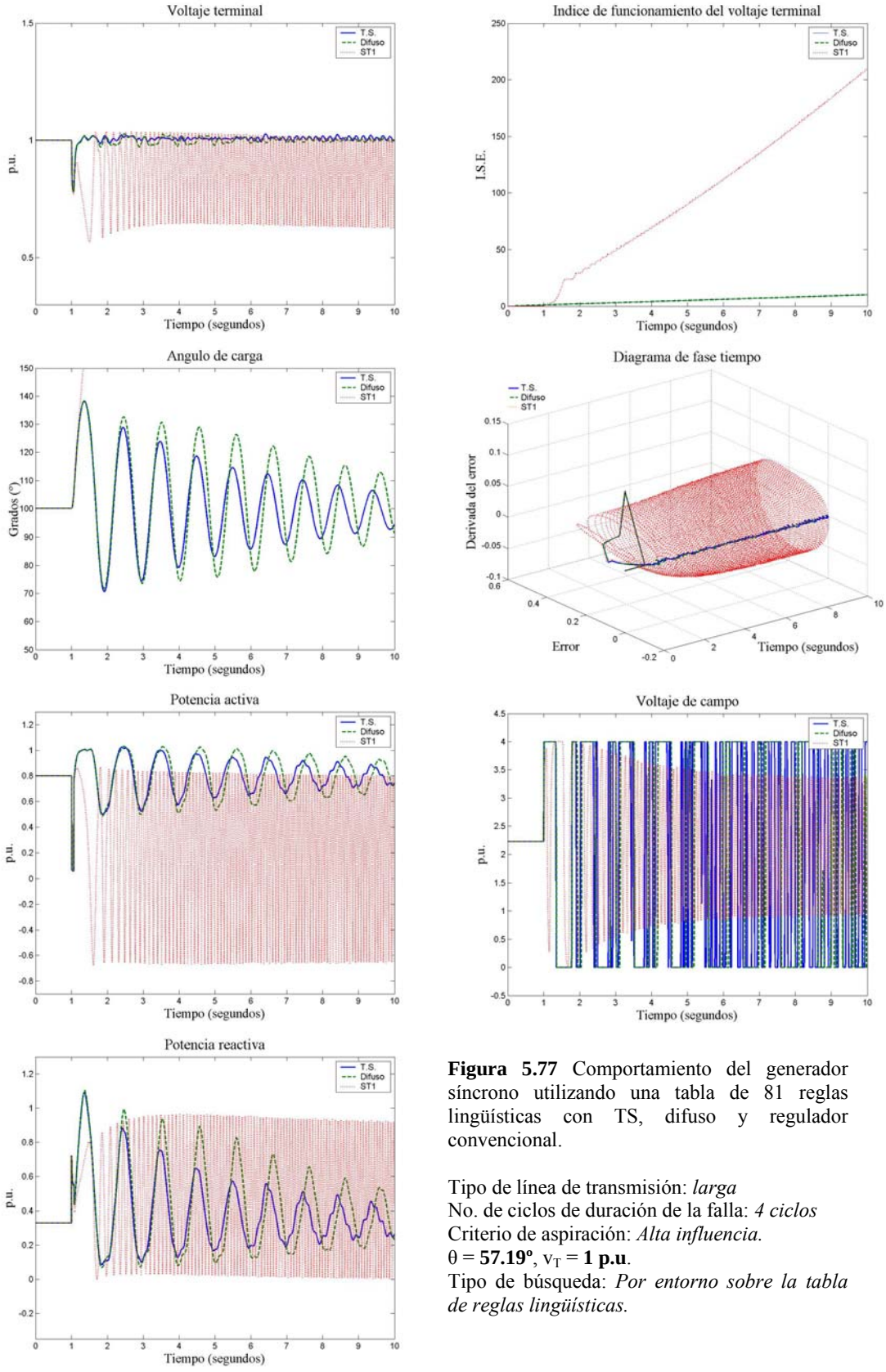



**Figura 5.77** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 81 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: *4 ciclos*
Criterio de aspiración: *Alta influencia.*
$\theta$ = **57.19º**, $v_T$ = **1 p.u**.
Tipo de búsqueda: *Por entorno sobre la tabla de reglas lingüísticas.*

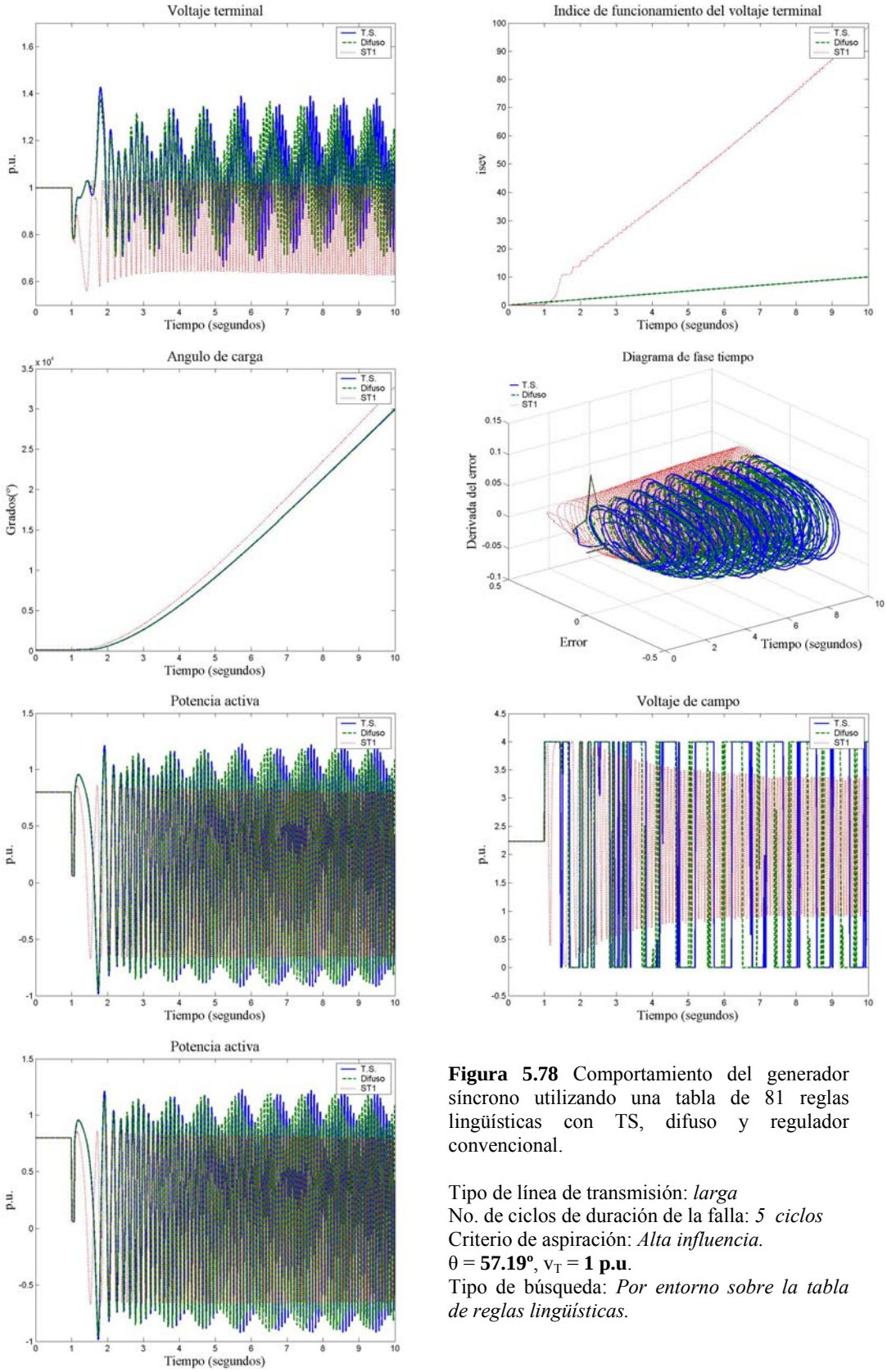



**Figura 5.78** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 81 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: *5 ciclos*
Criterio de aspiración: *Alta influencia.*
$\theta$ = **57.19º**, $v_T$ = **1 p.u**.
Tipo de búsqueda: *Por entorno sobre la tabla de reglas lingüísticas.*

A continuación se presenta en la figura 5.78 las estructuras relacionadas con la prueba realizada en la figura 5.79

| $\Delta e$ \ $e$ | **NGR** | **NME** | **NPM** | **NPE** | **ZE** | **APE** | **APM** | **AM** | **AG** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | NG | NM | NG | NM | NM | NPM | NPM | NPP | **NPP** |
| **NME** | NG | NG | NM | NM | NPM | NPM | NPP | **CE** | APP |
| **NPM** | NG | NM | NG | NM | NPM | NPP | **CE** | APP | AM |
| **NPE** | NG | NM | NG | NPM | NPP | **NM** | APP | APM | AM |
| **ZE** | NM | NPM | NPM | NPM | **CE** | APP | APP | APP | AM |
| **APE** | NPM | NPM | NM | **CE** | APP | AM | APM | AM | AG |
| **APM** | NPM | NPP | **NPM** | APP | APM | AG | AG | AM | AG |
| **AM** | NPM | **NPP** | NPM | APP | APM | APM | AM | AM | AG |
| **AGR** | **APM** | APP | AG | AG | AG | AG | AG | AG | AG |

5.79 (a) Tabla resultante de reglas lingüísticas

| $\Delta e$ \ $e$ | **NGR** | **NME** | **NPM** | **NPE** | **ZE** | **APE** | **APM** | **AM** | **AG** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | 10 | 2 | 2 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 7 |
| **NME** | 2 | 4 | 3 | 0 | 4 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| **NPM** | 5 | 11 | 3 | 2 | 3 | 2 | 0 | 4 | 3 |
| **NPE** | 12 | 7 | 7 | 0 | 1 | 0 | 1 | 4 | 3 |
| **ZE** | 1 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 2 | 11 | 8 |
| **APE** | 3 | 1 | 1 | 0 | 0 | 3 | 3 | 10 | 6 |
| **APM** | 3 | 0 | 0 | 1 | 1 | 7 | 7 | 9 | 17 |
| **AM** | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 9 | 8 | 10 | 8 |
| **AGR** | 17 | 0 | 1 | 0 | 5 | 7 | 10 | 16 | 7 |

5.79 (b) Memoria de frecuencia.

| $\Delta e$ \ $e$ | **NGR** | **NME** | **NPM** | **NPE** | **ZE** | **APE** | **APM** | **AM** | **AG** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | NG | NM | NG | NM | NM | NPM | NPM | NPP | **NPP** |
| **NME** | NG | NG | NM | NM | NPM | NPM | NPP | **CE** | APP |
| **NPM** | NG | NM | NG | NM | NPM | NPP | **CE** | APP | AM |
| **NPE** | NG | NM | NG | NPM | NPP | **NM** | APP | APM | AM |
| **ZE** | NM | NPM | NPM | NPM | **CE** | APP | APP | APP | AM |
| **APE** | NPM | NPM | NM | **CE** | APP | APM | APM | AM | AG |
| **APM** | NPM | NPP | **NPM** | APP | APM | AM | AM | AM | AG |
| **AM** | NPM | **NPP** | NPM | APP | APM | AG | AG | AM | AG |
| **AGR** | **APM** | APP | AG | AG | AG | AG | AG | AG | AG |

5.79 (c) Diagrama de fase-lingüístico.

**Figura 5.79.** Estructuras correspondientes a la figura 5.78 después de realizar una prueba empleando una búsqueda por tabú por el criterio de alta influencia sobre entorno con un vt = 1.0 p.u. y θ = 57.19º con una simulación de falla de duración de 5 ciclos.

Durante la prueba realizada en la figura 5.78 se puede observar que el comportamiento del generador es inestable y aún con las técnicas inteligentes la máquina pierde síncronismo reflejado en el ángulo del rotor del generador y en el centro de la tabla de reglas lingüísticas finales (figura 5.79 a) donde se ve claramente que las acciones más grandes comienzan a ordenarse en la zona sombreada esta característica indica que la exploración abandono la zona de acciones medianas para probar con acciones de un valor más considerable en el voltaje de campo tratando de encontrar rutas que lleven a la regulación de voltaje.

### *5.4.3 RESULTADOS OBTENIDOS DESPUÉS DE REALIZAR UNA AUTOSINTONIZACIÓN SOBRE UNA TABLA DE 49 REGLAS LINGÜÍSTICAS EMPLEANDO LA BÚSQUEDA POR TABÚ POR ENTORNO.*

A continuación se muestran las características de la prueba realizada:

- Se simulará el generador en varios puntos de operación considerando:

  a). Control difuso

  b). Control difuso sintonizado por medio de la búsqueda por tabú sobre una vecindad de entorno por el criterio de alta influencia en una tabla de 49 reglas lingüísticas.

  c).Regulador convencional tipo ST1.

- La prueba consiste de:

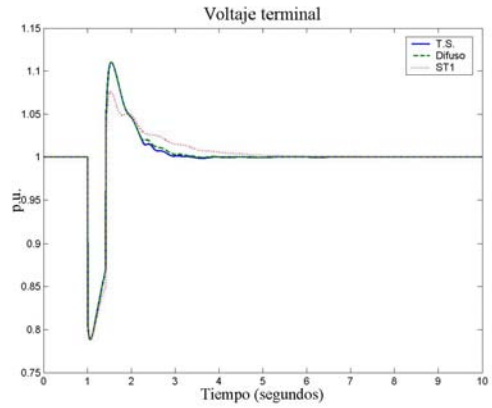
  a). Simular una falla indicando el número de ciclos de duración de dicha falla en la correspondiente figura y correspondiente punto de operación.

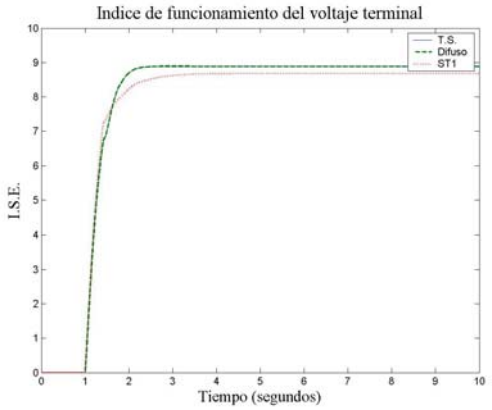
- Los resultados abarcan las gráficas correspondientes a las ***figuras 5.80 a 5.92*** indicando también los diagramas de fase-lingüístico, incluyendo las memorias asociadas a la búsqueda tales como memoria de frecuencia y memoria explicita sobre algunos puntos de operación relevantes.

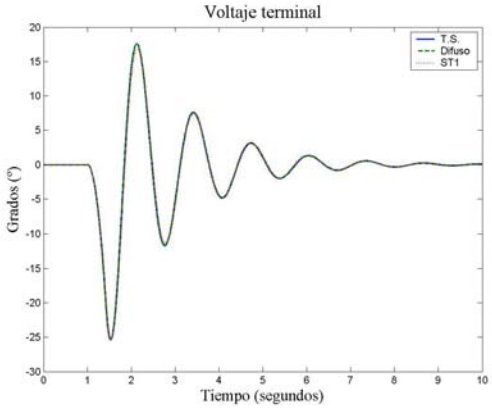
- Tipo de línea de transmisión: larga.

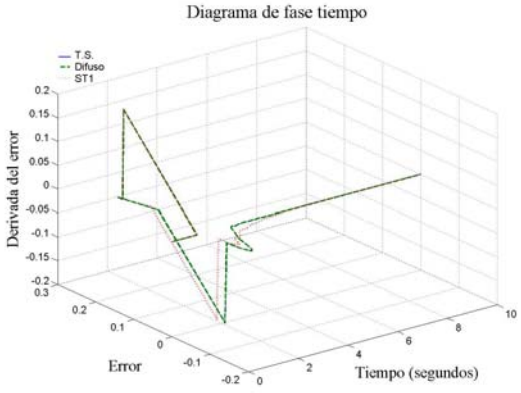
Los intervalos establecidos para las funciones de membresía necesarias en el control difuso en los diferentes puntos de operación son mostrados en el apéndice A.

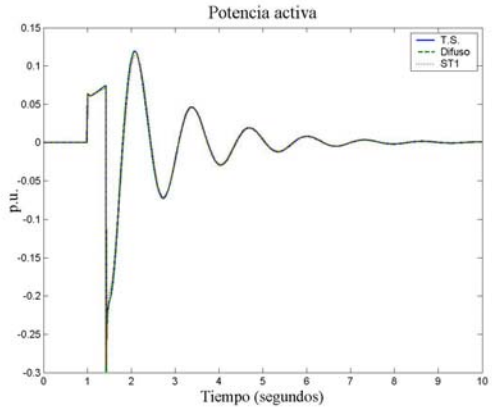
En las figuras 5.80 a 5.82 el regulador convencional se comporta mejor (en base al índice de funcionamiento y solo en puntos de operación cercanos a vacío) se debe a que el control difuso con y sin TS tienen un sobretiro que acumula rápidamente números en el índice de funcionamiento después de liberar la falla esta característica que puede notarse también en el control difuso de 9 funciones de membresía se debe a la composición de los intervalos de la base de las funciones de membresía, cuando las funciones de membresía del centro están más compactadas que las exteriores vuelven al control difuso más sensible alrededor de puntos cercanos al cero, esta característica permite que TS no alcance a optimizar al control difuso de 7 y 9 funciones de membresía cuando la condición de trabajo es ante un incremento de carga partiendo desde un punto de vacío hasta plena carga (ver figura 5.69 el generador trabaja en vacío inicialmente hasta llegar a un punto donde Pa = 0.788 p.u.) y en un tiempo más reducido que el alcanzado por el control difuso establecido en este trabajo para 5 funciones de membresía, esto no hubiera sido posible si los intervalos mantuvieran una distancia proporcional en cada función de membresía.

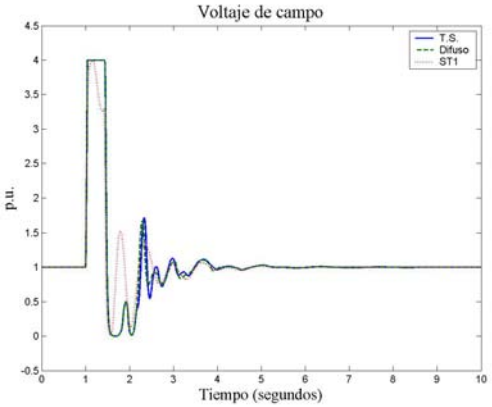


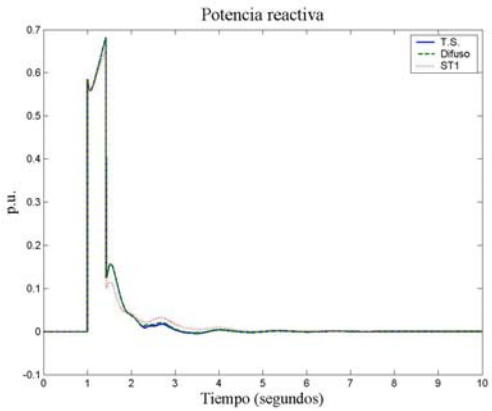




**Figura 5.80** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: *25 ciclos*
Criterio de aspiración: *Alta influencia.*
$\theta$ = **0º**, $v_T$ = **1 p.u**.
Tipo de búsqueda: *Por entorno sobre la tabla de reglas lingüísticas.*

A continuación se presenta en la figura 5.80 las estructuras relacionadas con la prueba realizada en la figura 5.81

| $\Delta e$ \| $e$ | NGR | NME | NPE | ZE | PPE | PME | PGR |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | BG | BG | BG | BM | BP | BP | **CE** |
| **NME** | BG | BG | BM | BM | BP | **CE** | AP |
| **NPE** | BG | BM | BM | BP | **CE** | AP | AP |
| **ZE** | BM | BM | **BM** | **CE** | AP | AM | AM |
| **PPE** | BP | BP | **CE** | **AM** | AM | AM | AG |
| **PME** | BP | **CE** | AP | AP | AM | AG | AG |
| **PGR** | **CE** | AP | AP | AM | AG | AG | AG |

5.81 (a) tabla de reglas lingüísticas resultante

| $\Delta e$ \| $e$ | NGR | NME | NPE | ZE | PPE | PME | PGR |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | BG | BG | BG | BM | BP | BP | **CE** |
| **NME** | BG | BG | BM | BM | BP | **CE** | AP |
| **NPE** | BG | BM | BM | BP | **CE** | AP | AP |
| **ZE** | BM | BM | **BM** | **CE** | AP | AM | AM |
| **PPE** | BP | BP | **CE** | **AM** | AM | AM | AG |
| **PME** | BP | **CE** | AP | AP | AM | AG | AG |
| **PGR** | **CE** | AP | AP | AM | AG | AG | AG |

5.81 (b) Diagrama de fase lingüístico.

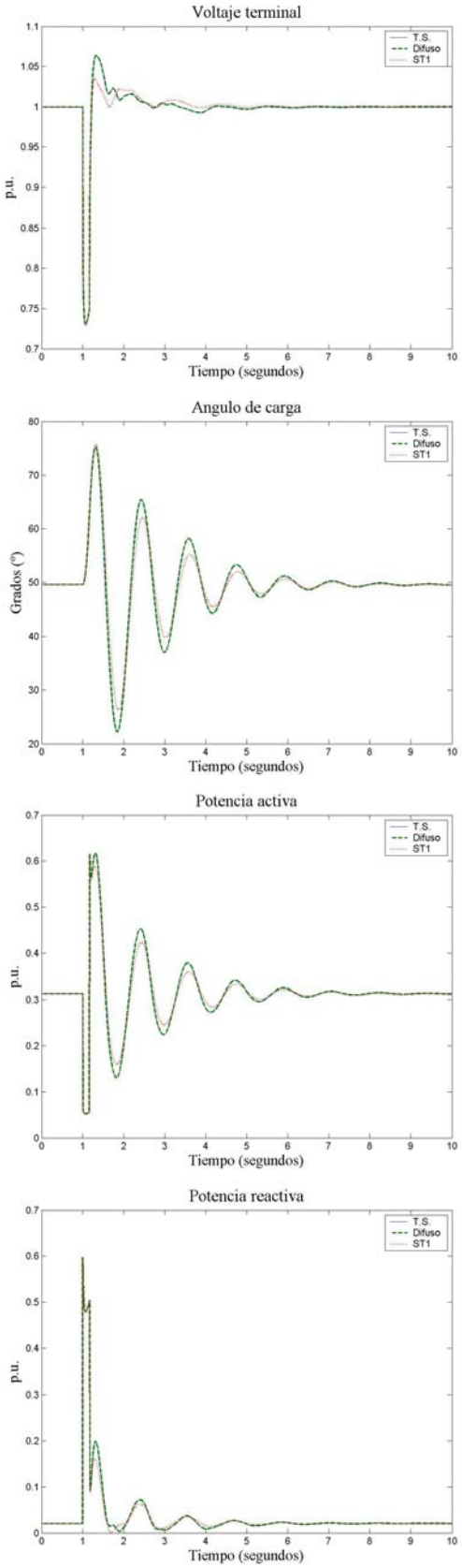
| $\Delta e$ \| $e$ | NGR | NME | NPE | ZE | PPE | PME | PGR |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | **1** | **1** | **1** | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **NME** | 0 | **1** | **1** | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **NPE** | 0 | **1** | **1** | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **ZE** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **PPE** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **PME** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **PGR** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

5.81 (c) memoria explicita

| $\Delta e$ \| $e$ | NGR | NME | NPE | ZE | PPE | PME | PGR |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 |
| **NME** | 0 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **NPE** | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **ZE** | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 5 | 0 |
| **PPE** | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 | 0 | 0 |
| **PME** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **PGR** | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 3 | 0 |

5.81 (d) memoria de frecuencia

**Figura 5.81** Tablas resultantes correspondientes a la figura 5.80 después de la aplicación de TS por entorno por el criterio de aspiración de alta influencia con $\theta = 0^{o}$, $v_T = 1.0$ p.u. y simulando una falla de 25 ciclos de duración



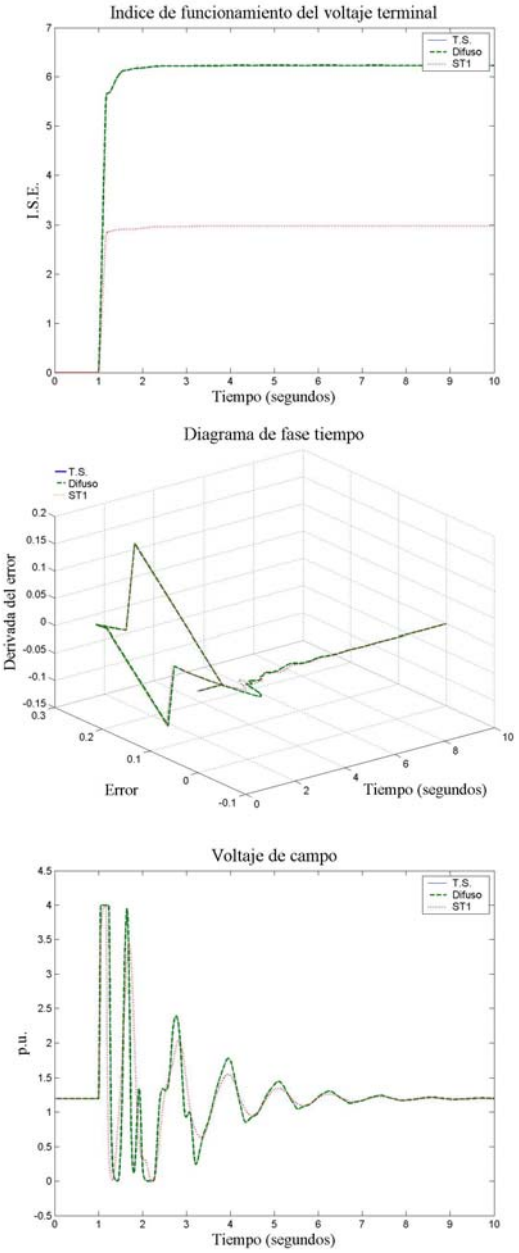




**Figura 5.82** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: *15 ciclos*
Criterio de aspiración: *Alta influencia.*
$\theta$ = **20º**, $v_T$ = **1 p.u**.
Tipo de búsqueda: *Por entorno sobre la tabla de reglas lingüísticas.*

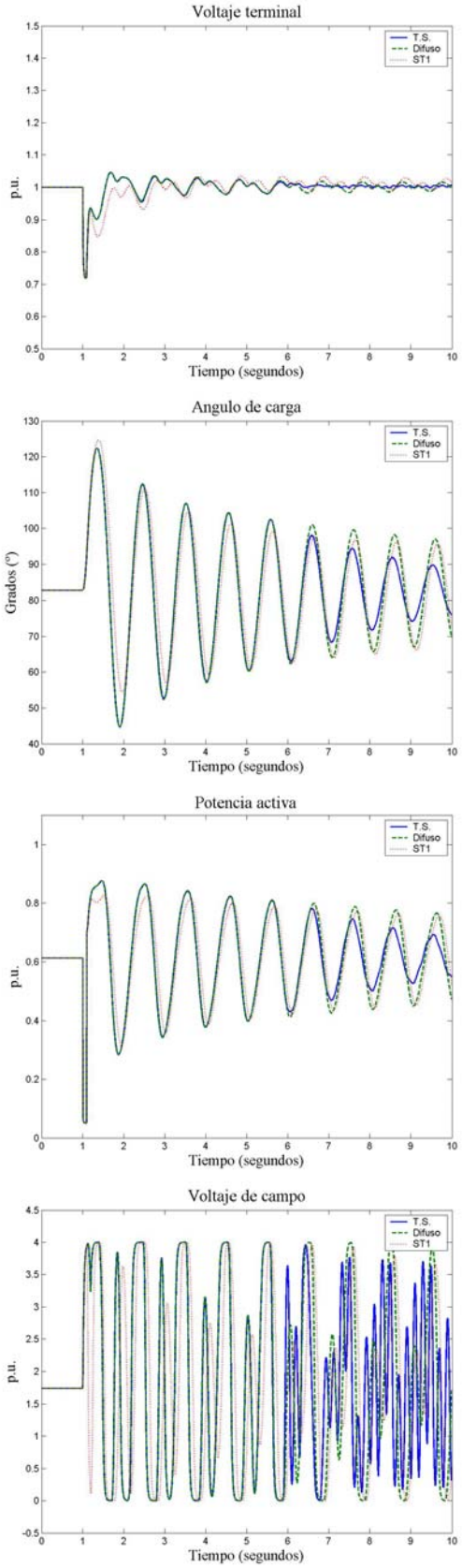
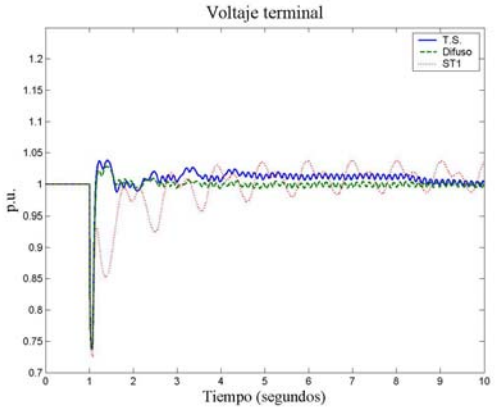
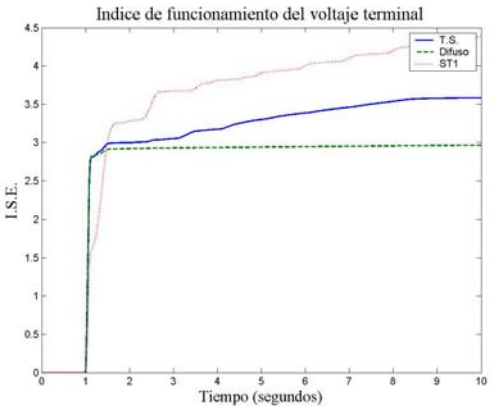
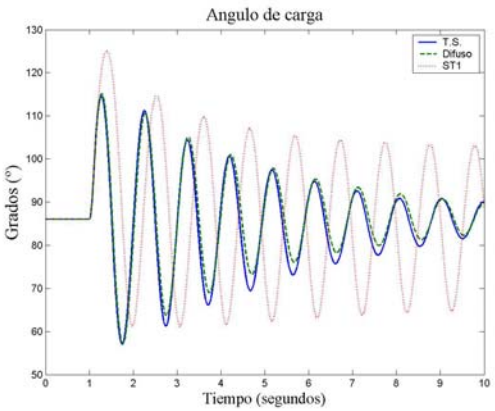


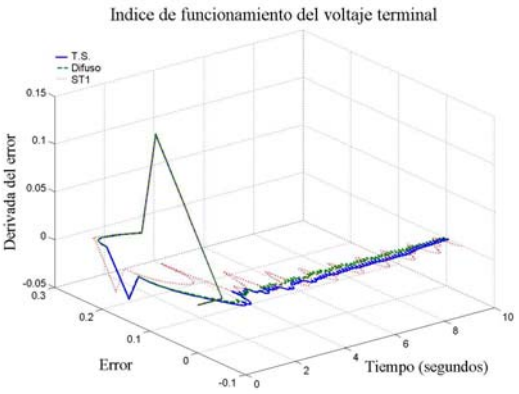

**Figura 5.83** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional.

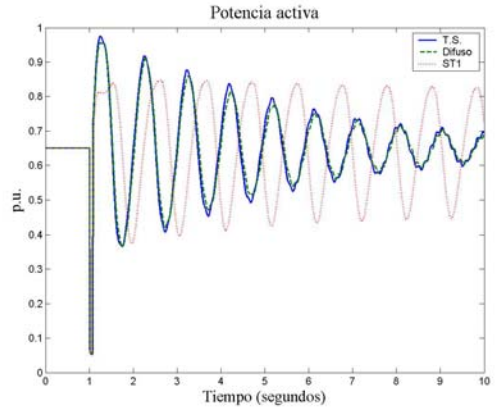
Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: *7 ciclos*
Criterio de aspiración: Alta influencia.
$\theta$ = **41°**, $v_T$ = **1 p.u**.
Tipo de búsqueda: *Por entorno sobre la tabla de reglas lingüísticas.*

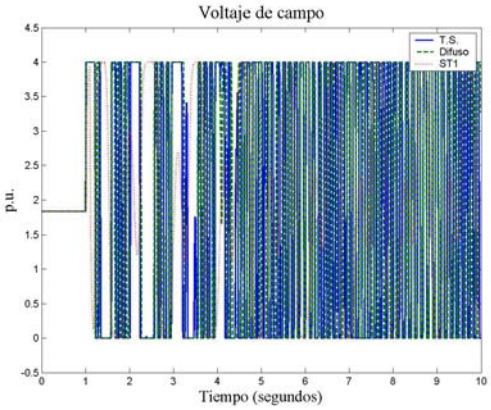


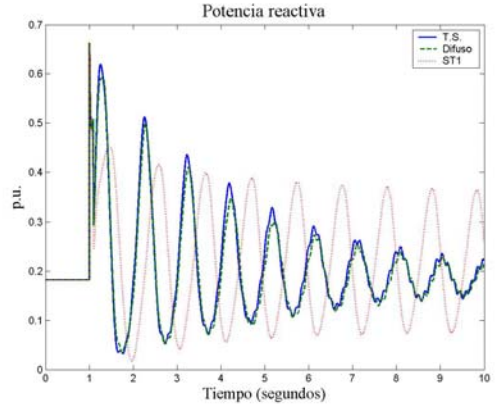




**Figura 5.84** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: *5 ciclos*
Criterio de aspiración: *Alta influencia.*
$\theta$ = **43.8728º**, $v_T$ = **1 p.u**.
Tipo de búsqueda: *Por entorno sobre la tabla de reglas lingüísticas.*

A continuación se presenta en la figura 5.85 las estructuras relacionadas con la prueba realizada en la figura 5.84

| $\Delta e$ \ $e$ | NGR | NME | NPE | ZE | PPE | PME | PGR |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | BG | BG | BG | BG | BM | BP | **CE** |
| **NME** | BG | BG | BG | BG | BG | **CE** | AP |
| **NPE** | BG | BM | BM | AP | **AM** | AP | AP |
| **ZE** | BM | BM | CE | **CE** | AP | AM | AP |
| **PPE** | BG | BG | **CE** | AG | AM | AM | AG |
| **PME** | BP | **BP** | AG | CE | AM | AM | AG |
| **PGR** | **BP** | CE | AG | AG | AM | AG | AG |

5.85 (a) tabla de reglas lingüísticas resultante.

| $\Delta e$ \ $e$ | NGR | NME | NPE | ZE | PPE | PME | PGR |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | BG | BG | BG | BG | BM | BP | **CE** |
| **NME** | BG | BG | BG | BG | BG | **CE** | AP |
| **NPE** | BG | BM | BM | AP | **AM** | AP | AP |
| **ZE** | BM | BM | CE | **CE** | AP | AM | AP |
| **PPE** | BG | BG | **CE** | AG | AM | AM | AG |
| **PME** | BP | **BP** | AG | CE | AM | AM | AG |
| **PGR** | **BP** | CE | AG | AG | AM | AG | AG |

5.85 (b) Diagrama de fase lingüístico..

| $\Delta e$ \ $e$ | NGR | NME | NPE | ZE | PPE | PME | PGR |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **NME** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **NPE** | 0 | **1** | **1** | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **ZE** | 0 | **1** | **1** | **1** | 0 | 0 | 0 |
| **PPE** | 0 | **1** | **1** | **1** | 0 | 0 | 0 |
| **PME** | 0 | 0 | **1** | **1** | **1** | **1** | 0 |
| **PGR** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

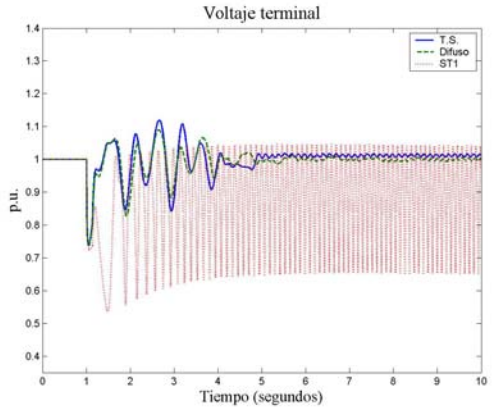
5.85 (c) memoria explicita.

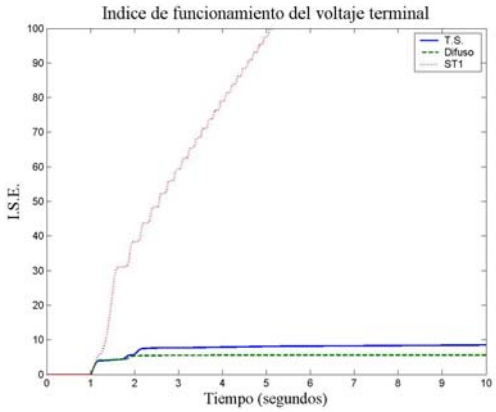
| $\Delta e$ \ $e$ | NGR | NME | NPE | ZE | PPE | PME | PGR |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | 0 | 0 | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **NME** | 10 | 0 | 5 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **NPE** | 10 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| **ZE** | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 |
| **PPE** | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 4 | 9 |
| **PME** | 5 | 6 | 0 | 0 | 1 | 4 | 11 |
| **PGR** | 9 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 18 |

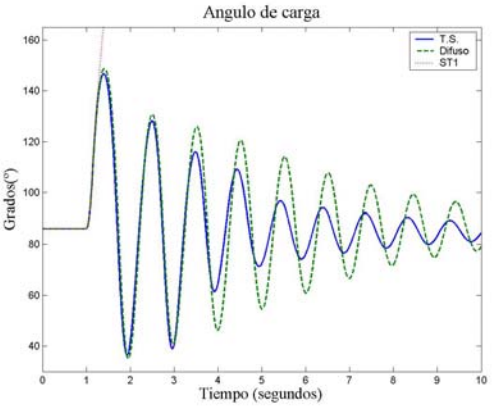
5.85 (d) Memoria de frecuencia.

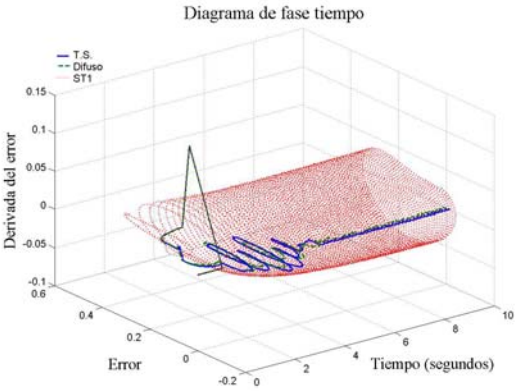
**Figura 5.85** Tablas resultantes de reglas lingüísticas después de la aplicación de TS por entorno por el criterio de aspiración de alta influencia con $\theta = 43.8728º$, $v_T = 1.0$ p.u. y simulando una duración de falla de 7 ciclos.

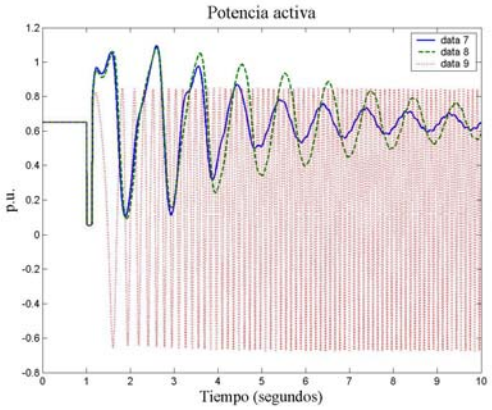
La prueba de la figura 5.84 muestra una cualidad de la funcionalidad de la búsqueda por tabú, la exploración y explotación de zonas cualidad muy importante en cualquier técnica de optimización; se puede observar que TS no mejoro la regulación de voltaje debido a que existen pequeñas oscilaciones (figura 5.84 Voltaje en terminales), esto se debe a que TS induce la búsqueda por nuevas zonas tratando de alcanzar una mejor regulación en el voltaje en terminales, al final de la simulación TS retorna la lista maestra a una tabla de reglas muy parecida a la manejada por el controlador difuso estático.

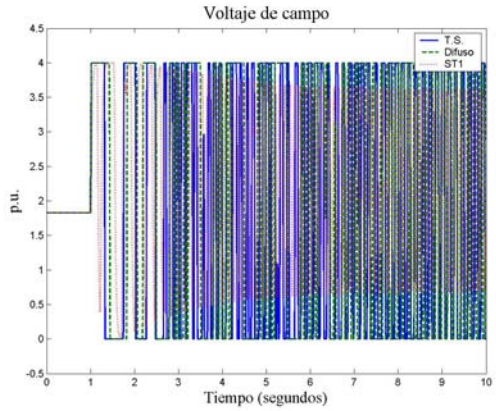


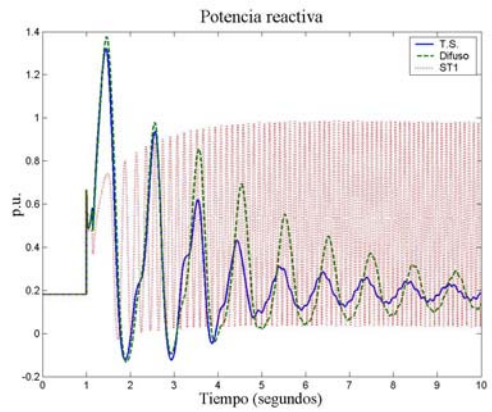




**Figura 5.86** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: *8 ciclos*
Criterio de aspiración: *Alta influencia.*
$\theta$ = **43.8728º**, $v_T$ = **1 p.u**.
Tipo de búsqueda: *Por entorno sobre la tabla de reglas lingüísticas.*

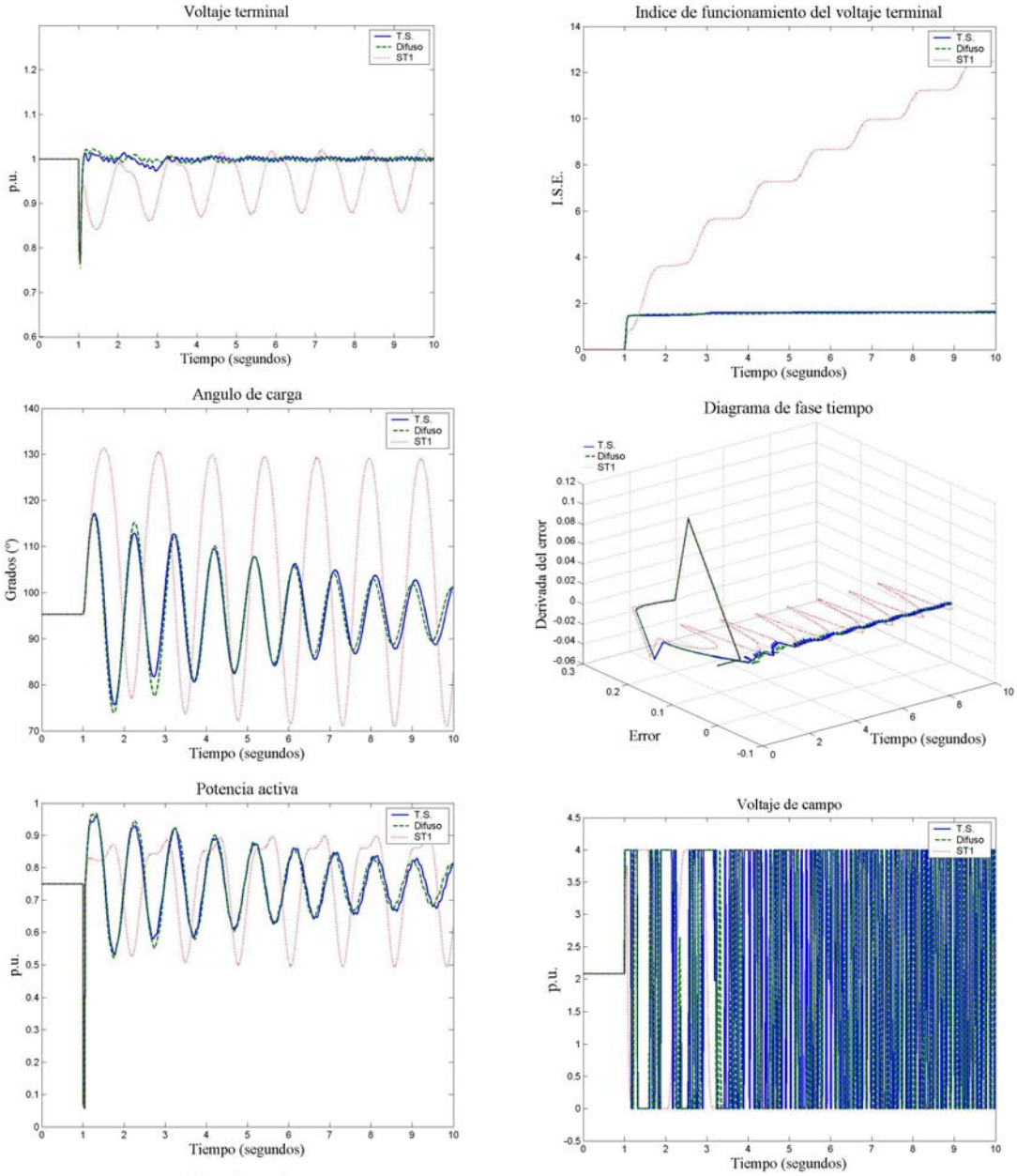



**Figura 5.87** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla*: 3 ciclos*
Criterio de aspiración: *Alta influencia.*
$\theta$ = **52.3999º**, $v_T$ = **1 p.u**.
Tipo de búsqueda: *Por entorno sobre la tabla de reglas lingüísticas.*

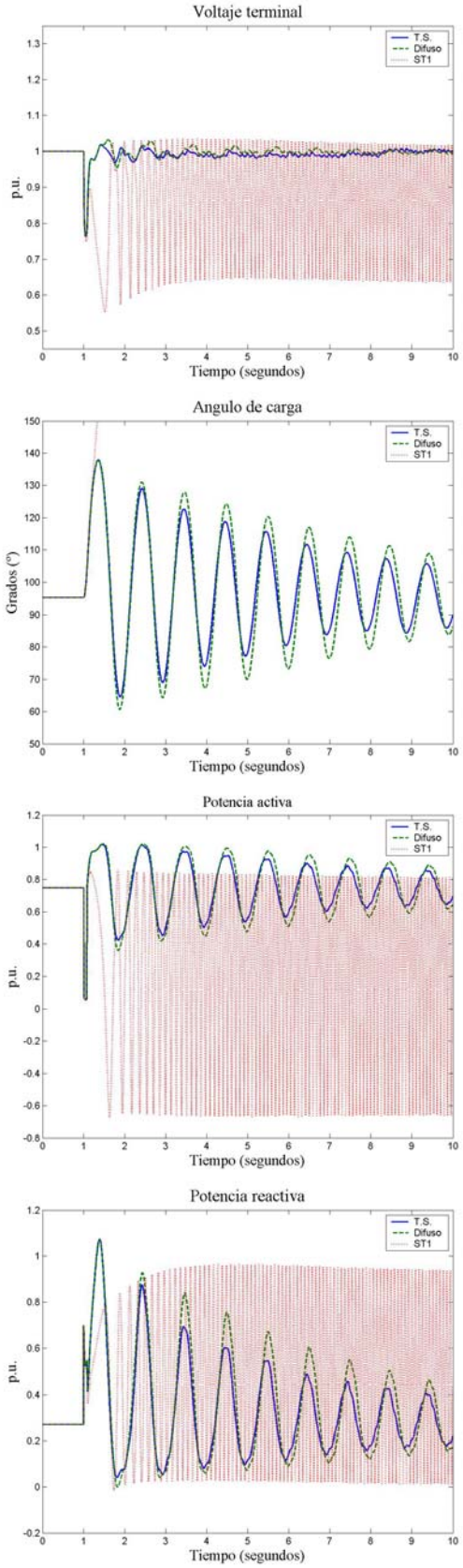



**Figura 5.88** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: *5 ciclos*
Criterio de aspiración: *Alta influencia*.
$\theta$ = **52.3999º**, $v_T$ = **1 p.u**.
Tipo de búsqueda: *Por entorno sobre la tabla de reglas lingüísticas.*

A continuación se presenta en la figura 5.88 las estructuras relacionadas con la prueba realizada en la figura 5.89

| $\Delta e$ \ $e$ | **NGR** | **NME** | **NPE** | **ZE** | **PPE** | **PME** | **PGR** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | BG | BG | BG | BG | BP | BP | **CE** |
| **NME** | BG | BG | BG | BG | BP | **CE** | AP |
| **NPE** | BG | BM | BM | BG | **AM** | AP | AP |
| **ZE** | BM | BM | BM | **CE** | AM | AM | AP |
| **PPE** | BP | BP | **CE** | AG | AM | AM | AG |
| **PME** | BP | **BP** | AP | AG | AG | AG | AG |
| **PGR** | **BP** | AP | AM | AM | AG | AG | AG |

5.89 (a) Tabla de reglas lingüísticas resultante.

| $\Delta e$ \ $e$ | **NGR** | **NME** | **NPE** | **ZE** | **PPE** | **PME** | **PGR** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | BG | BG | BG | BG | BP | BP | **CE** |
| **NME** | BG | BG | BG | BG | BP | **CE** | AP |
| **NPE** | BG | BM | BM | BG | **AM** | AP | AP |
| **ZE** | BM | BM | BM | **CE** | AM | AM | AP |
| **PPE** | BP | BP | **CE** | AG | AM | AM | AG |
| **PME** | BP | **BP** | AP | AG | AG | AG | AG |
| **PGR** | **BP** | AP | AM | AM | AG | AG | AG |

5.89 (b) Diagrama de fase lingüístico

| $\Delta e$ \ $e$ | **NGR** | **NME** | **NPE** | **ZE** | **PPE** | **PME** | **PGR** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **NME** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **NPE** | 0 | **1** | **1** | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **ZE** | 0 | **1** | **1** | **1** | 0 | 0 | 0 |
| **PPE** | 0 | **1** | **1** | **1** | 0 | 0 | 0 |
| **PME** | 0 | 0 | **1** | **1** | **1** | **1** | 0 |
| **PGR** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

5.89 (c) memoria explícita

| $\Delta e$ \ $e$ | **NGR** | **NME** | **NPE** | **ZE** | **PPE** | **PME** | **PGR** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **NME** | 11 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **NPE** | 5 | 4 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 |
| **ZE** | 12 | 2 | 0 | 0 | 0 | 4 | 19 |
| **PPE** | 6 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 |
| **PME** | 2 | 0 | 0 | 2 | 2 | 7 | 8 |
| **PGR** | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 10 |

5.89 (d) Memoria de frecuencia.

**Figura 5.89** Tabla resultantes correspondientes a la figura 5.88 después de la aplicación de TS por entorno por el criterio de aspiración de alta influencia con $\theta = 52.3999º$, $v_T = 1.0$ p.u. y simulando una duración de falla de 5 ciclos.

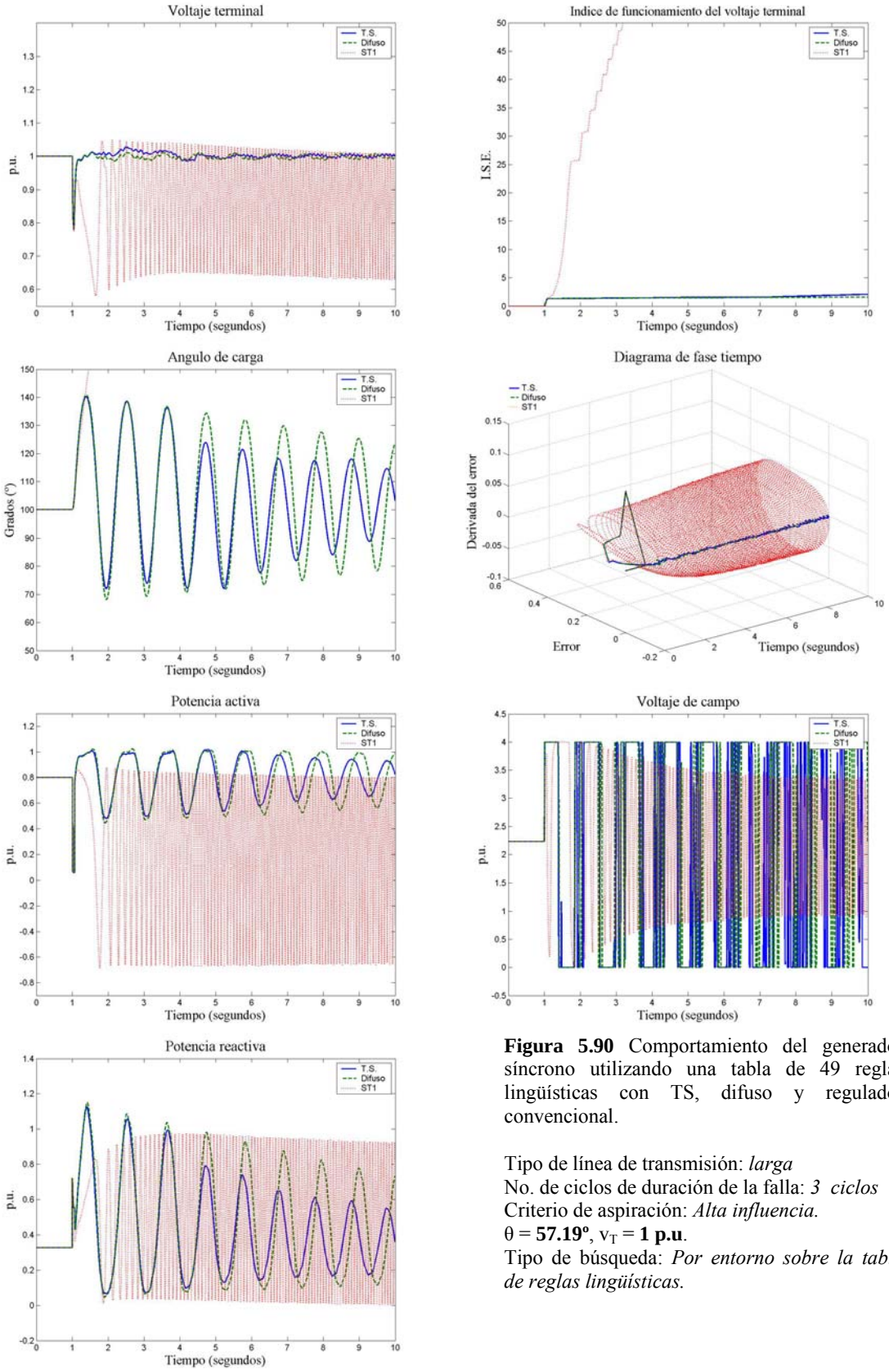



**Figura 5.90** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: *3 ciclos*
Criterio de aspiración: *Alta influencia.*
$\theta$ = **57.19º**, $v_T$ = **1 p.u**.
Tipo de búsqueda: *Por entorno sobre la tabla de reglas lingüísticas.*

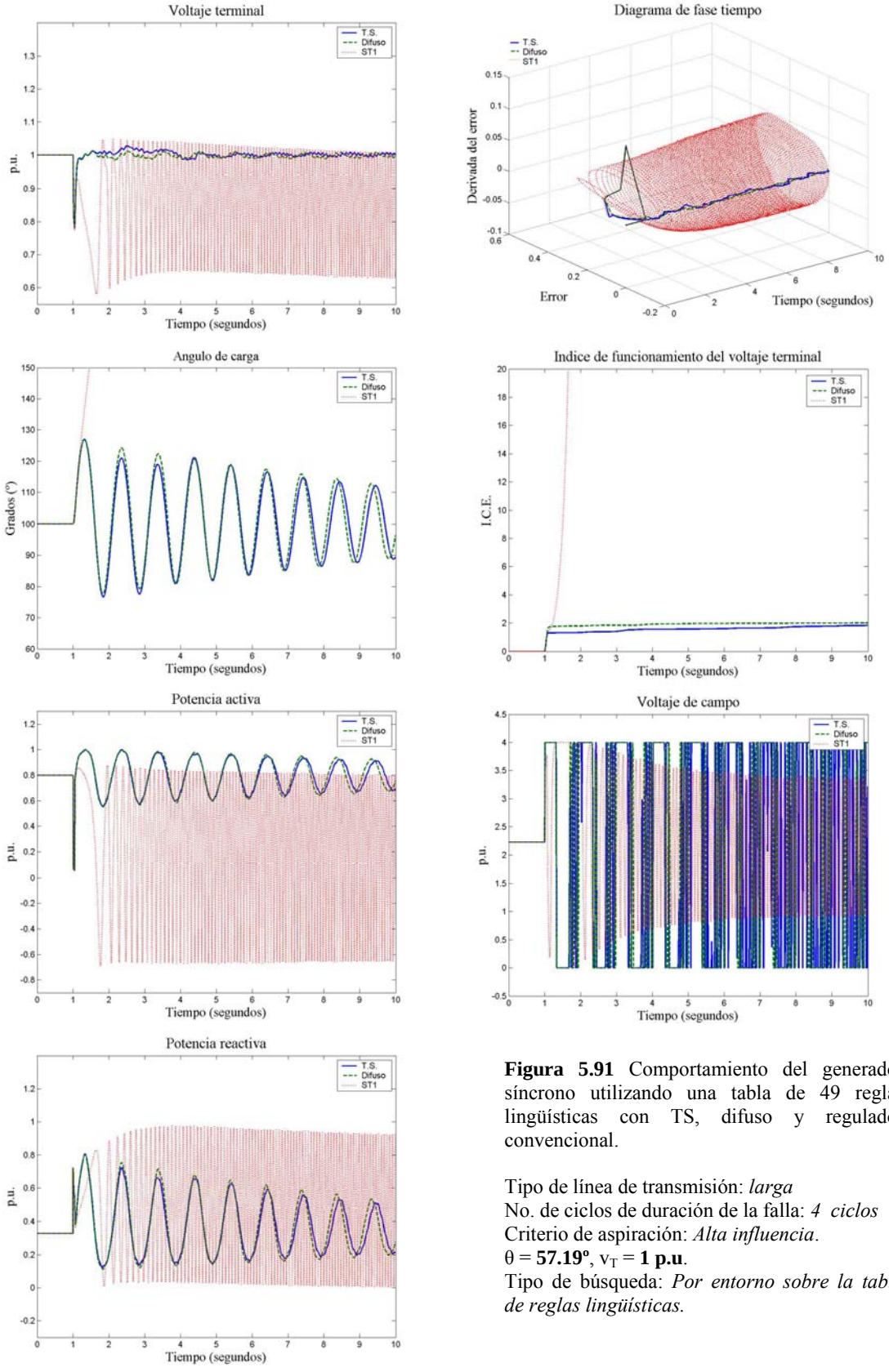



**Figura 5.91** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: *4 ciclos*
Criterio de aspiración: *Alta influencia*.
$\theta$ = **57.19º**, $v_T$ = **1 p.u**.
Tipo de búsqueda: *Por entorno sobre la tabla de reglas lingüísticas.*

### *5.4.4 ANÁLISIS DE LA BÚSQUEDA POR ENTORNO.*

La búsqueda por entorno resulta más diversa que la búsqueda por vecindades laterales debido a que permite explorar vecindades sobre el dominio del error y de la derivada del error, el espacio pequeño de búsqueda que contiene las dimensiones de la tabla de reglas lingüísticas complica la diversificación y explotación de rutas alternas a la solución actual. La búsqueda por entorno permite alcanzar puntos de búsqueda que están limitados para una búsqueda por vecindades laterales sobre acciones ubicadas en el horizonte de la derivada del error, esto permite fortalecer la diversificación (exploración) de TS sobre elementos no analizados. En la figura 5.92 se muestra las tablas de reglas lingüísticas resultantes proporcionadas por TS enfocada a vecindades laterales y TS enfocada a vecindades de entorno para el punto:

$\theta = 47.9942^{o}$, $v_T = 1.0$ p.u. y simulando una duración de falla de 7 ciclos y criterio de aspiración de alta influencia.

Acción BG (1,5)

| $\Delta e$ \| $e$ | NGR | NME | NPE | ZE | PPE | PME | PGR |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | BG | BG | BG | BG | BM | BP | **CE** |
| **NME** | BG | BG | **BG** | **BG** | **BG** | **CE** | AP |
| **NPE** | BG | BM | BM | AP | **AM** | AP | AP |
| **ZE** | BM | BM | **CE** | **CE** | AP | AM | AP |
| **PPE** | BG | **BG** | **CE** | **AG** | AM | AM | AG |
| **PME** | BP | **BP** | **AG** | **CE** | AM | **AM** | AG |
| **PGR** | **BP** | CE | AG | AG | AM | AG | AG |

5.92 (a) Tabla de reglas lingüísticas resultante (Búsqueda por entorno circular)

| $\Delta e$ \| $e$ | NGR | NME | NPE | ZE | PPE | PME | PGR |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | BG | BG | BG | BG | BG | **CE** | **CE** |
| **NME** | BG | BG | BG | **BG** | **BG** | **CE** | **AM** |
| **NPE** | BG | BM | BM | **BM** | **AM** | AM | AM |
| **ZE** | BM | BM | **BM** | **CE** | **CE** | AM | AM |
| **PPE** | BM | BP | **AM** | **AM** | AM | AM | AG |
| **PME** | BP | **CE** | **AG** | **AG** | AM | AG | AG |
| **PGR** | **CE** | AP | AM | AM | AG | AG | AG |

5.92 (b) Tabla de reglas lingüísticas resultante (búsqueda por vecindades laterales).

**Figura 5.92** Tablas resultantes después de la búsqueda por entorno.

Como se observa en las tablas de reglas mostradas en la figura 5.92 la búsqueda por vecindades laterales muestra solo el trabajo realizado sobre acciones que pueden ser alcanzadas por una búsqueda lateral, por ejemplo en la casilla BG(1,5) perteneciente a la tabla de TS por entorno, la acción BG no hubiera sido alcanzada por una exploración lateral debido a su lejanía y la búsqueda establecida, esta característica fortalece la explotación de zonas localizadas en los extremos de X y permite evitar ciclos sobre acciones que limitarían capacidad de TS. La principal diferencia entre TS por entorno y TS por vecindades laterales radica en la diversificación explotada por cada vecindad durante cada búsqueda enfocando TS sobre rutas que mejorarían el trabajo realizado por el control difuso. Esta característica convierte a TS en cualquier área de la ingeniería como una heurística maestra que modificara y fortalecerá zonas exclusivas de trabajo frecuente sobre X descrita por la tabla de reglas por las 49 reglas lingüísticas.

## *5.5 RESULTADOS OBTENIDOS DESPUÉS DE REALIZAR UNA PRUEBA SOBRE LA SINTONIZACIÓN DE 5 Y 7 FUNCIONES DE MEMBRESÍA POR MEDIO DE LA BÚSQUEDA POR TABÚ.*

### *5.5.1 INTRODUCCIÓN.*

En esta sección se presentan los resultados obtenidos después de aplicar TS por el criterio de alta y baja influencia sintonizando durante la simulación los intervalos de la base de las funciones de membresía para el error y la derivada del error, se considera un incremento $\Delta e$ un $\Delta ce$ (e-error y ce-cambio del error) para 5 y 7 funciones de membresía tal como se indica en cada prueba.

### *5.5.2 RESULTADOS OBTENIDOS DESPUÉS DE REALIZAR UNA PRUEBA DE AUTOSINTONIZACIÓN SOBRE 5 FUNCIONES DE MEMBRESÍA UTILIZANDO LA BÚSQUEDA POR TABÚ POR EL CRITERIO DE ALTA INFLUENCIA CON UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN LARGA Y CORTA.*

En esta sección se muestran los resultados obtenidos después de aplicar TS por el criterio de alta influencia para la sintonización de las funciones de membresía utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas en diversos puntos de operación. Los resultados mostrados en esta sección permitirán establecer los intervalos de las funciones de membresía más óptimos sin necesidad de simular diferentes valores para dichos intervalos sobre un controlador difuso estático.

- Se comparan gráficamente:

    1. Aplicación del control difuso estático con una tabla de 25 reglas lingüísticas.

    2. Aplicación del control difuso con una tabla de 25 reglas lingüísticas sintonizando las funciones de membresía por medio de la búsqueda por tabú utilizando el criterio de alta influencia.

    3. Aplicación del regulador convencional tipo ST1.

- Tipo de línea de transmisión: Larga.

- Número de ciclos de falla simulados: Indicados en cada figura.

Los resultados pertenecientes a la sintonización de 5 funciones de membresía comprenden las figuras 5.93 a 5.105 las cuales abarcan el criterio de alta influencia para una línea larga y línea corta de transmisión.

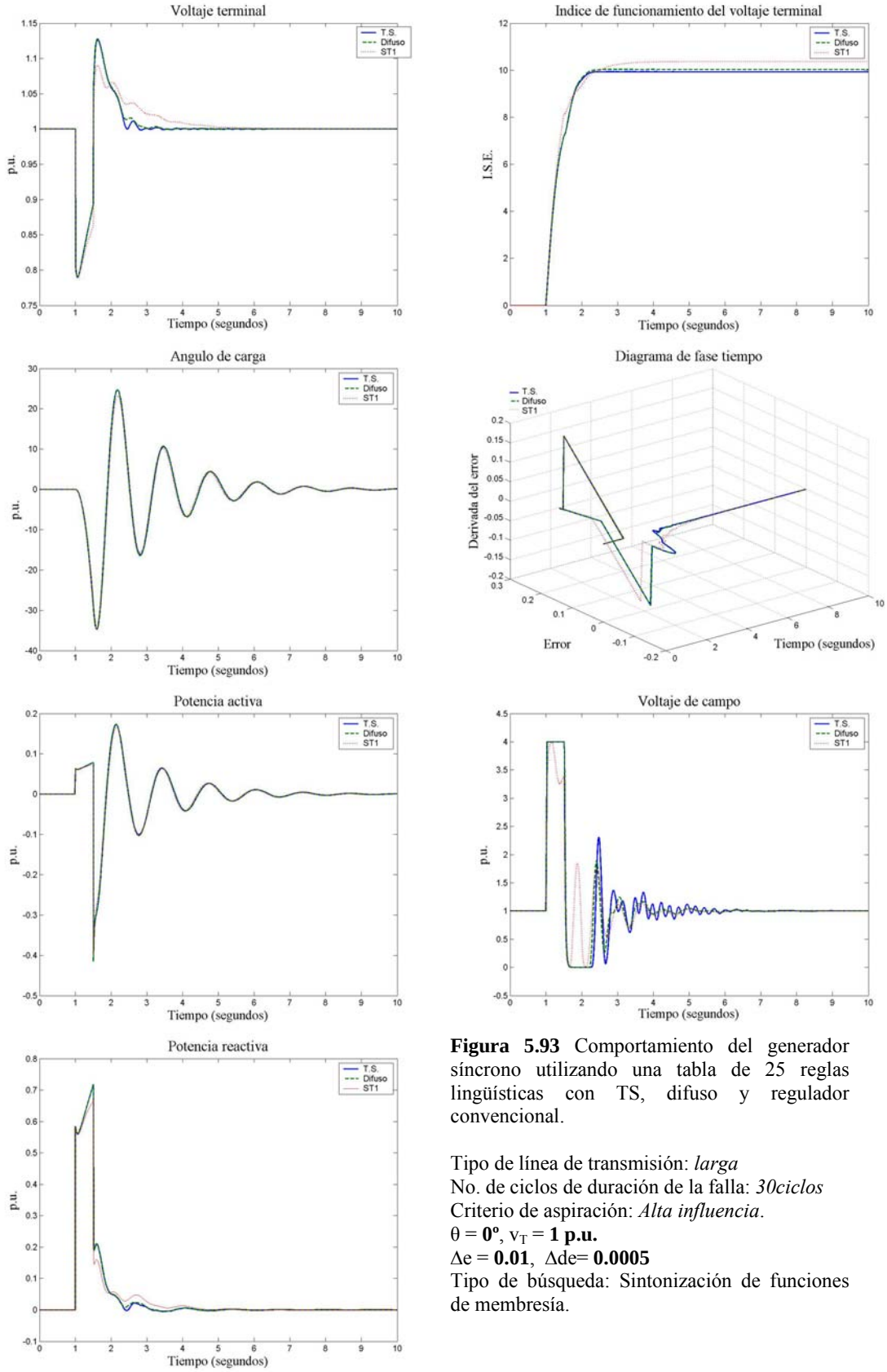
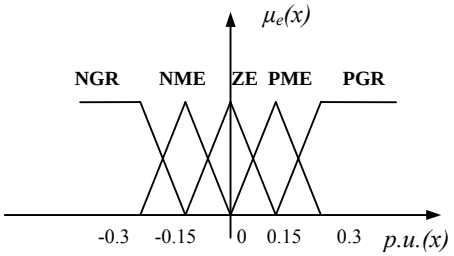


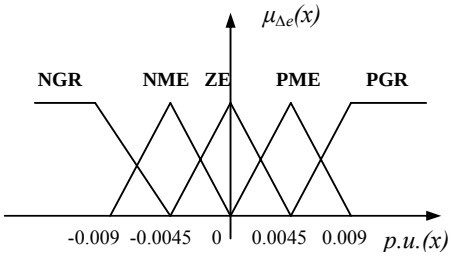

**Figura 5.93** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: *30ciclos*
Criterio de aspiración: *Alta influencia*.
$\theta$ = **0º**, $v_T$ = **1 p.u.**
$\Delta e$ = **0.01**, $\Delta de$= **0.0005**
Tipo de búsqueda: Sintonización de funciones de membresía.

A continuación se muestran en la figura 5.94 las funciones de membresía resultantes y las estructuras asociadas a la búsqueda de la figura 5.93:




5.94 (a) Funciones de membresía del error.




5.94 (b) Funciones de membresía de la derivada del error.

| **de** \| **e** | $x_a$ | $x_b$ | $x_c$ | $x_d$ | $x_e$ | $x_f$ | $x_g$ | $x_h$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $y_a$ | 24 | 25 | 10 | 2 | 16 | 1 | 1 | 2 |
| $y_b$ | 21 | 11 | 9 | 3 | 12 | 2 | 3 | 0 |
| $y_c$ | 22 | 8 | 9 | 10 | 15 | 0 | 1 | 0 |
| $y_d$ | 22 | 5 | 0 | 10 | 14 | 5 | 0 | 0 |
| $y_e$ | 22 | 4 | 0 | 15 | 15 | 5 | 2 | 2 |
| $y_f$ | 21 | 10 | 12 | 11 | 5 | 0 | 1 | 1 |
| $y_g$ | 19 | 17 | 3 | 5 | 8 | 1 | 0 | 3 |
| $y_h$ | 15 | 11 | 7 | 5 | 7 | 1 | 2 | 0 |

5.94 (c) Memoria de frecuencia después de aplicar TS.

| **de** \| **e** | $x_a$ | $x_b$ | $x_c$ | $x_d$ | $x_e$ | $x_f$ | $x_g$ | $x_h$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $y_a$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $y_b$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $y_c$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $y_d$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $y_e$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $y_f$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $y_g$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $y_h$ | 0 | 0 | 0. | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

5.94 (d) Memoria explicita después de aplicar TS

**Figura 5.94** Funciones de membresía resultantes correspondientes a la figura 5.93 después de aplicar TS por el criterio de alta influencia, donde $\theta = 0^o$, $v_T = 1$ p.u. empleando una línea de transmisión larga simulando una falla con una duración de 30 ciclos.

En la figura 5.94 (c) se muestra el recorrido de la búsqueda por el espacio de trabajo durante la simulación completa referente a la figura 5.93, donde la primer casilla superior izquierda es la combinación de intervalos de funciones de membresía que produce el valor mas pequeño en la función objetivo, en la mayoría de los casos esto indica que se trata de los intervalos mas estrechos encontrados sobre la base de las funciones de membresía.

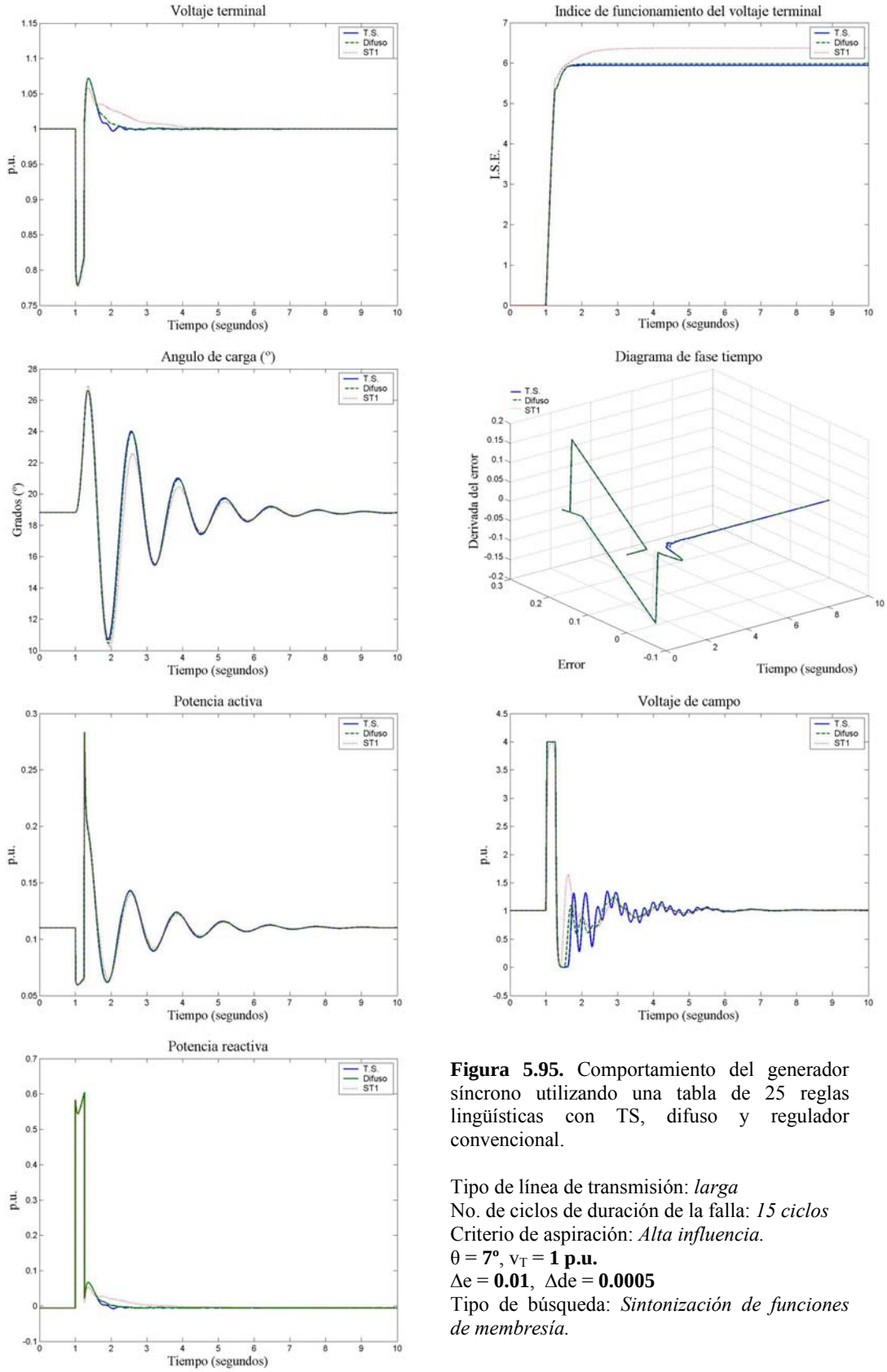



**Figura 5.95.** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: *15 ciclos*
Criterio de aspiración: *Alta influencia.*
$\theta$ = **7º**, $v_T$ = **1 p.u.**
$\Delta e$ = **0.01**, $\Delta de$ = **0.0005**
Tipo de búsqueda: *Sintonización de funciones de membresía.*

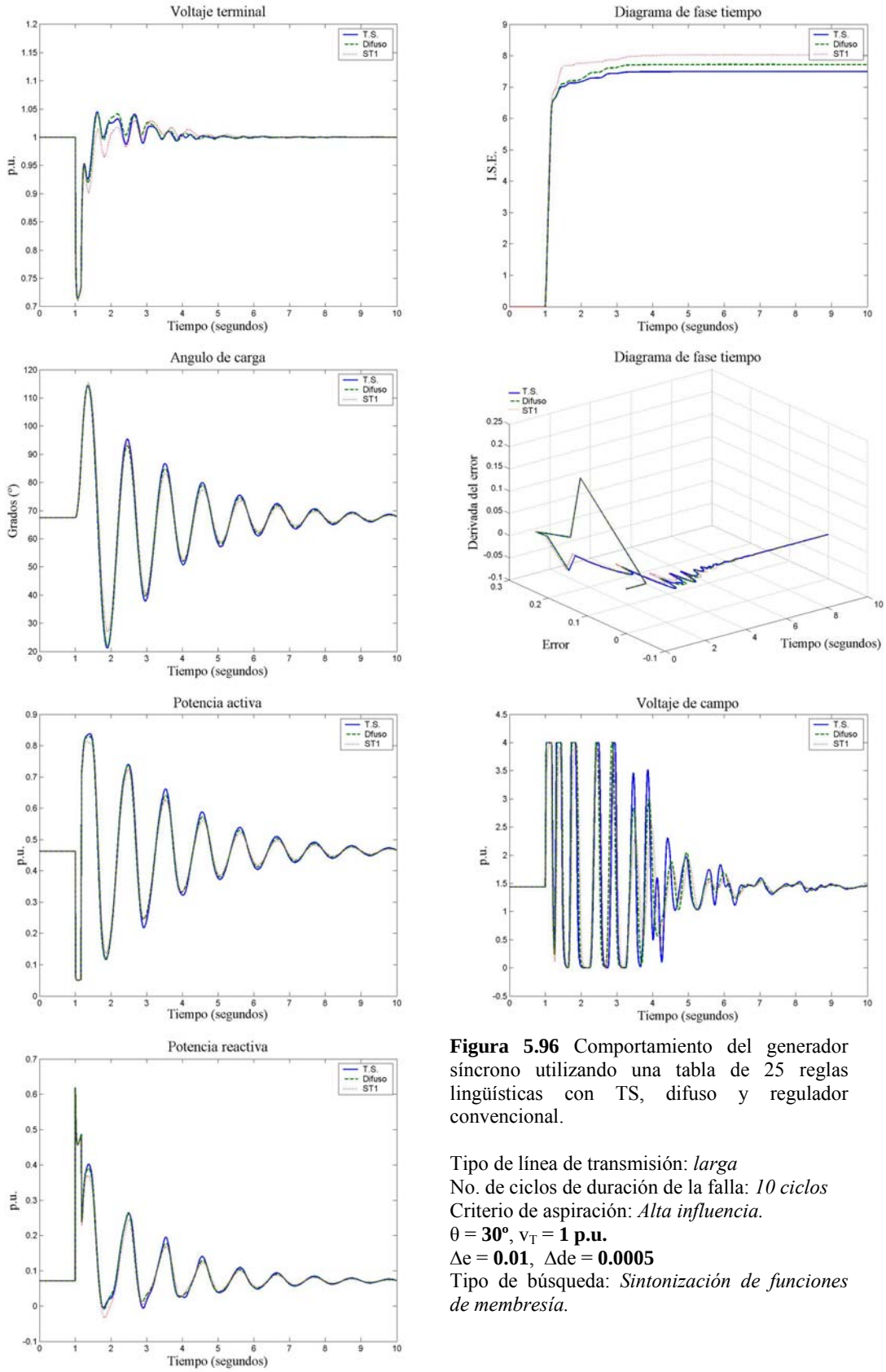
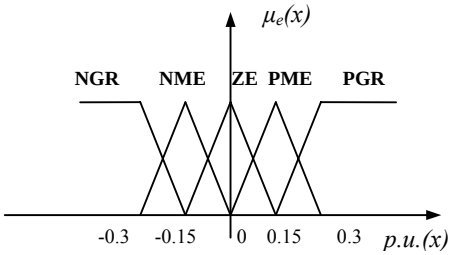


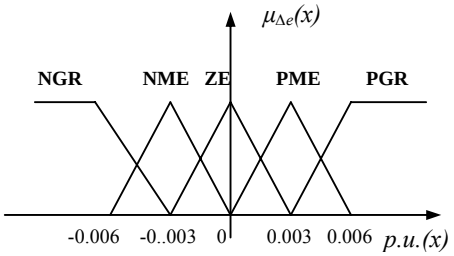

**Figura 5.96** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: *10 ciclos*
Criterio de aspiración: *Alta influencia.*
$\theta$ = **30º**, $v_T$ = **1 p.u.**
$\Delta e$ = **0.01**, $\Delta de$ = **0.0005**
Tipo de búsqueda: *Sintonización de funciones de membresía.*

A continuación se muestran en la figura 5.97 las funciones de membresía resultantes y las estructuras asociadas a la búsqueda de la figura 5.96:




5.97 (a) Funciones de membresía del error.




5.97 (b) Funciones de membresía de la derivada del error.

| **de** \ **e** | $x_a$ | $x_b$ | $x_c$ | $x_d$ | $x_e$ | $x_f$ | $x_g$ | $x_h$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $y_a$ | 25 | 7 | 5 | 3 | 3 | 10 | 4 | 1 |
| $y_b$ | 20 | 8 | 4 | 11 | 4 | 2 | 2 | 2 |
| $y_c$ | 18 | 12 | 6 | 10 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| $y_d$ | 18 | 9 | 3 | 5 | 1 | 3 | 0 | 0 |
| $y_e$ | 10 | 8 | 2 | 3 | 1 | 4 | 0 | 0 |
| $y_f$ | 11 | 3 | 2 | 3 | 5 | 2 | 3 | 0 |
| $y_g$ | 7 | 2 | 4 | 2 | 6 | 1 | 1 | 0 |
| $y_h$ | 4 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |

5.97 (c) Memoria de frecuencia después de aplicar TS.

| **de** \ **e** | $x_a$ | $x_b$ | $x_c$ | $x_d$ | $x_e$ | $x_f$ | $x_g$ | $x_h$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $y_a$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $y_b$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $y_c$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $y_d$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $y_e$ | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| $y_f$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $y_g$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $y_h$ | 0 | 0 | 0. | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

5.97 (d) Memoria explicita después de aplicar TS

**Figura 5.97.** Funciones de membresía resultantes correspondientes a la figura 5.96 después de aplicar TS por el criterio de alta influencia con:

$\Delta e$ = **0.01**, $\Delta de$=**0.0005**
Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: *10 ciclos*
$\theta$ = **25º**, $v_T$ = **1 p.u**.

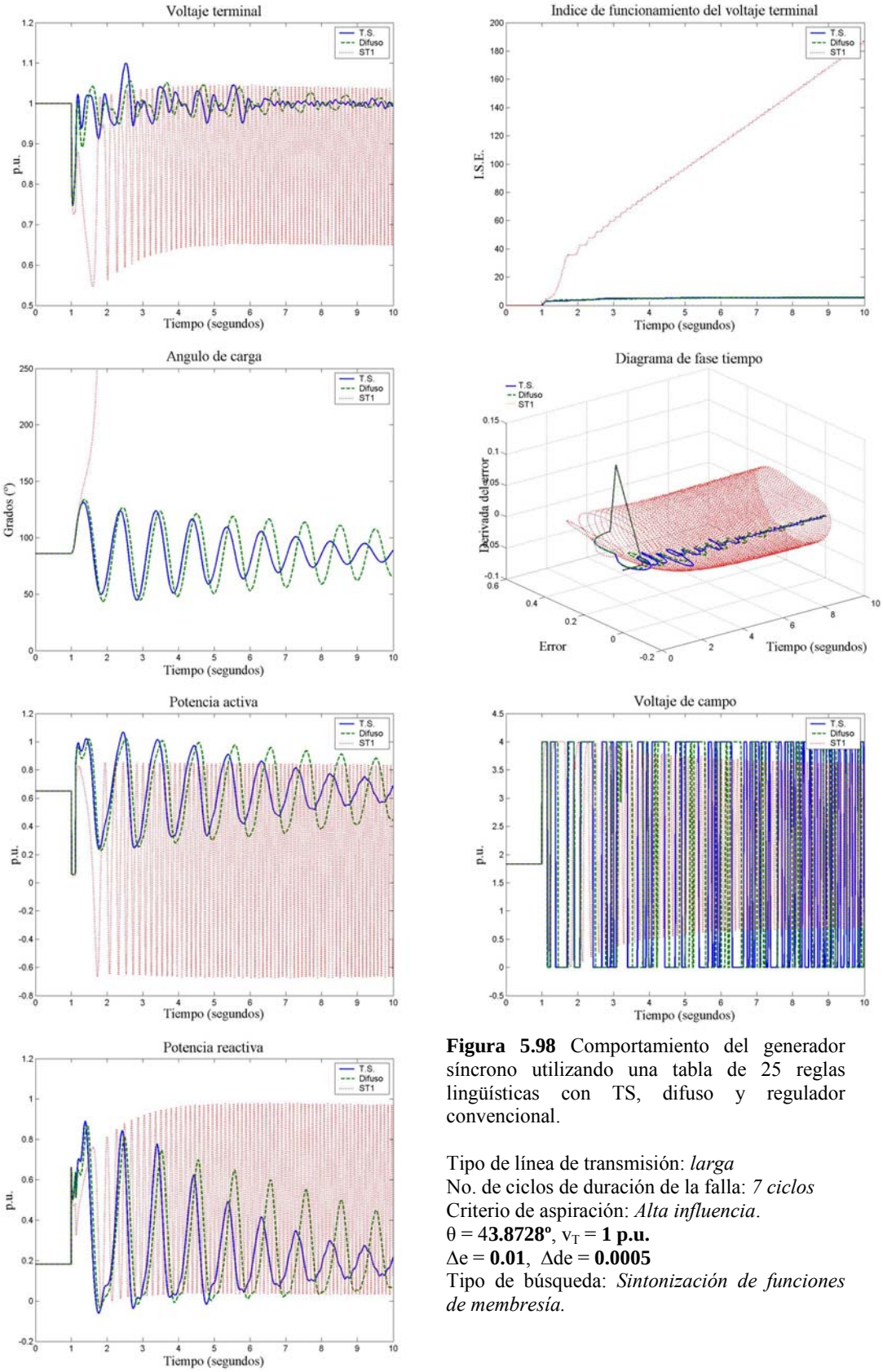
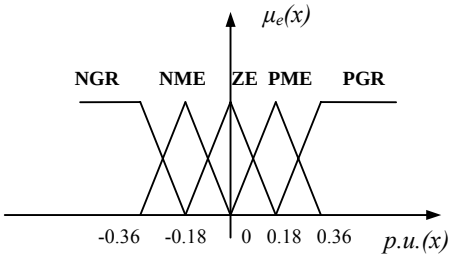


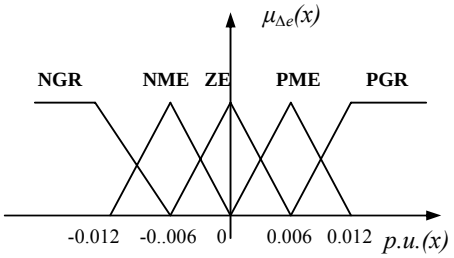

**Figura 5.98** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: *7 ciclos*
Criterio de aspiración: *Alta influencia*.
$\theta = 43.8728^{o}$, $v_T = \mathbf{1\ p.u.}$
$\Delta e = \mathbf{0.01}$, $\Delta de = \mathbf{0.0005}$
Tipo de búsqueda: *Sintonización de funciones de membresía.*

A continuación se muestran en la figura 5.99 las funciones de membresía resultantes y las estructuras asociadas a la búsqueda de la figura 5.98:




5.99 (a) Funciones de membresía del error.




5.99 (b) Funciones de membresía de la derivada del error

| **de** \ **e** | $x_a$ | $x_b$ | $x_c$ | $x_d$ | $x_e$ | $x_f$ | $x_g$ | $x_h$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $y_a$ | 16 | 7 | 3 | 5 | 2 | 3 | 0 | 1 |
| $y_b$ | 15 | 8 | 4 | 4 | 3 | 1 | 0 | 1 |
| $y_c$ | 12 | 12 | 3 | 4 | 2 | 0 | 0 | 0 |
| $y_d$ | 14 | 11 | 2 | 5 | 1 | 2 | 0 | 0 |
| $y_e$ | 16 | 13 | 15 | 6 | 1 | 2 | 1 | 0 |
| $y_f$ | 17 | 15 | 1 | 3 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| $y_g$ | 11 | 15 | 12 | 2 | 0 | 0 | 2 | 1 |
| $y_h$ | 10 | 8 | 2 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 |

5.99 (c) Memoria de frecuencia después de aplicar TS.

| **de** \ **e** | $x_a$ | $x_b$ | $x_c$ | $x_d$ | $x_e$ | $x_f$ | $x_g$ | $x_h$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $y_a$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $y_b$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $y_c$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $y_d$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $y_e$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $y_f$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $y_g$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $y_h$ | 0 | 0 | 0. | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

5.99 (d) Memoria explicita después de aplicar cuando t = 10 segundos.

.

**Figura 5.99.** Funciones de membresía resultantes correspondientes a la figura 5.98 después de aplicar TS por el criterio de alta influencia con:

$\Delta e$ = **0.01**, $\Delta de$=**0.0005**

Tipo de línea de transmisión: *larga*

No. de ciclos de duración de la falla: *7 ciclos*

$\theta$ = **43.8728º**, $v_T$ = **1 p.u**.

La figura 5.98 muestra que la autosintonización de las funciones de membresía mostró mejor desempeño que el regulador convencional ST1 sin embargo el voltaje de campo oscila entre 0-4 p.u. sin poder establecer un valor proporcional estable al voltaje producido.

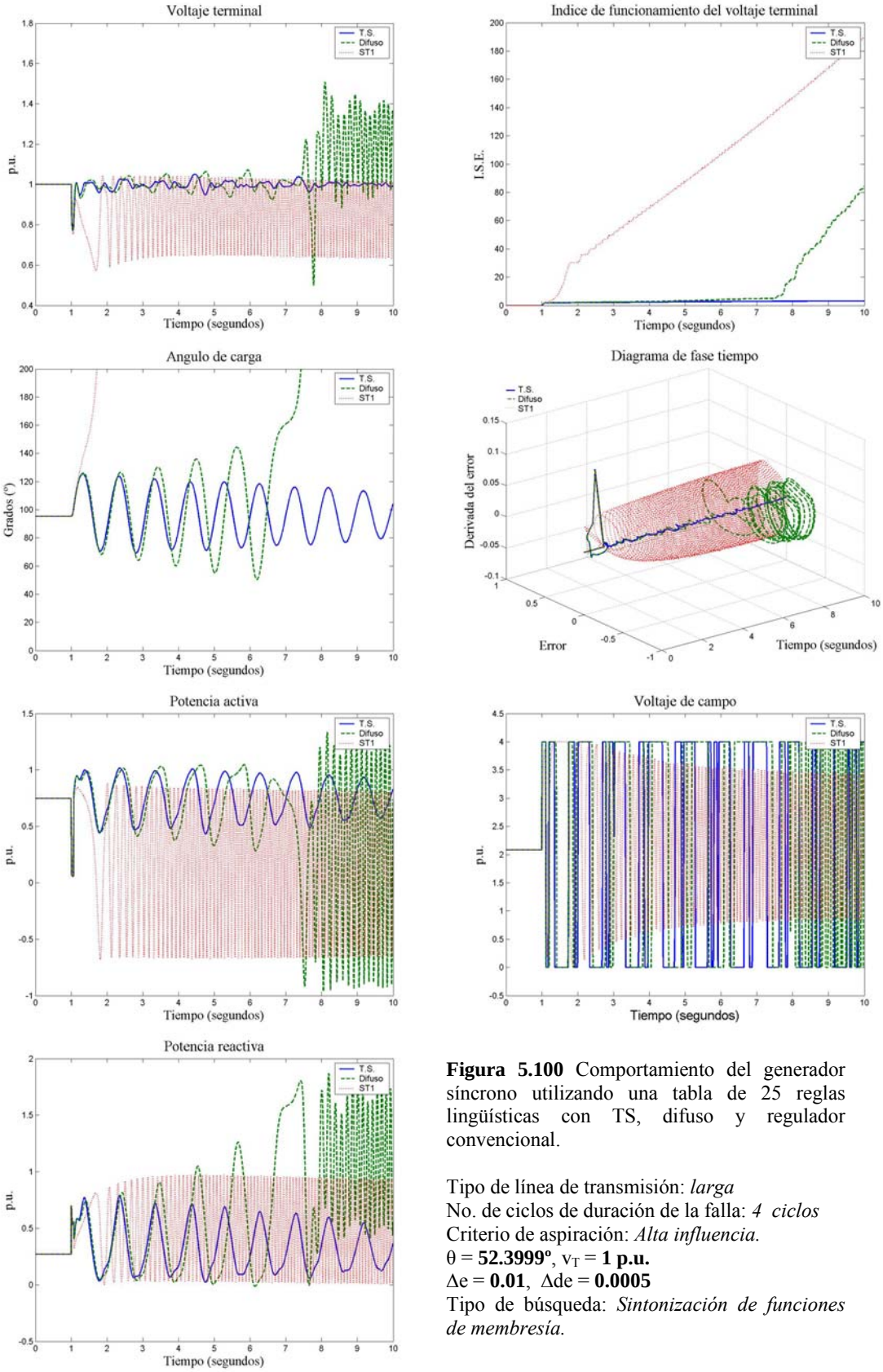



**Figura 5.100** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: *4 ciclos*
Criterio de aspiración: *Alta influencia.*
$\theta$ = **52.3999º**, $v_T$ = **1 p.u.**
$\Delta e$ = **0.01**, $\Delta de$ = **0.0005**
Tipo de búsqueda: *Sintonización de funciones de membresía.*

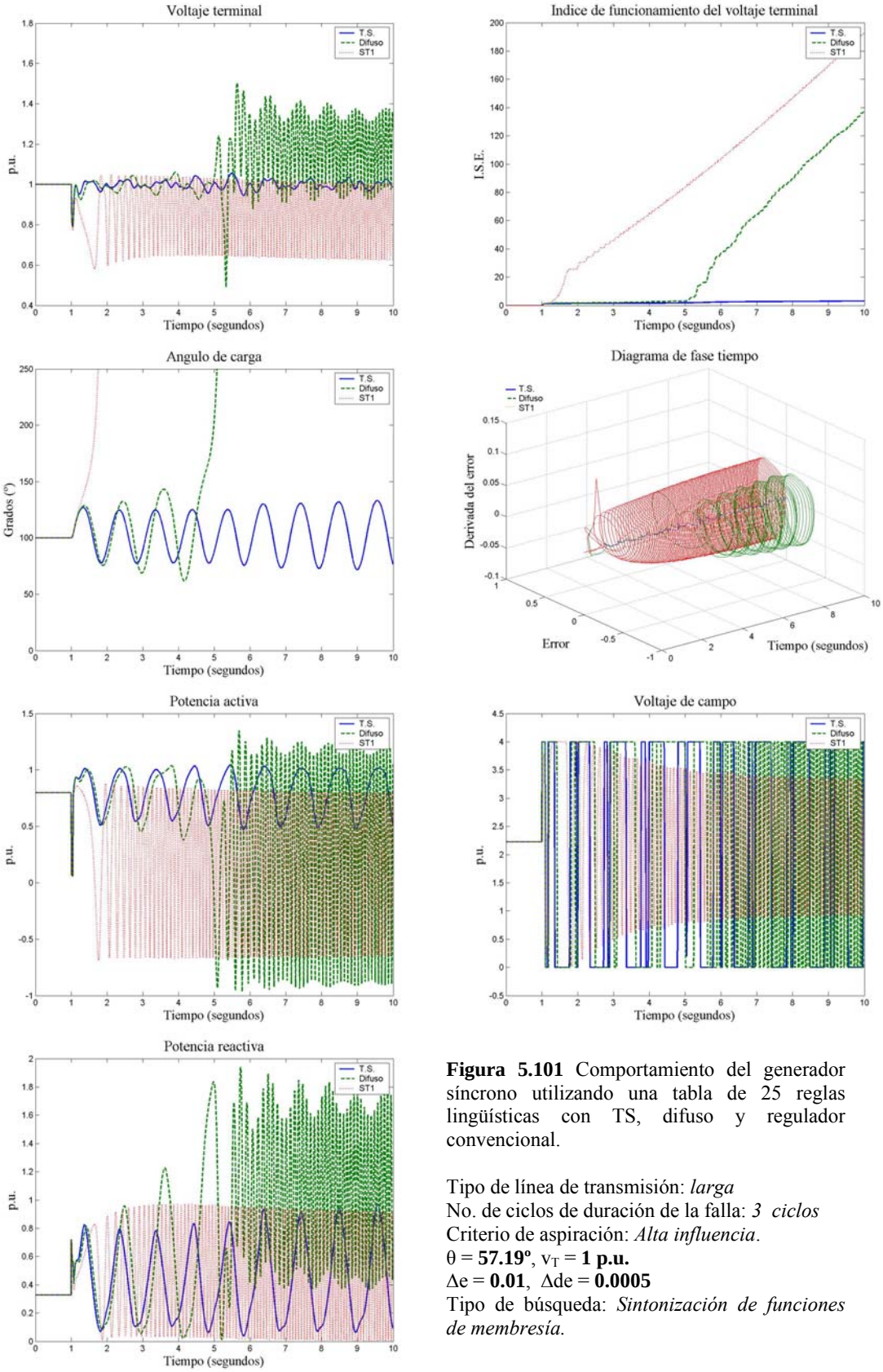
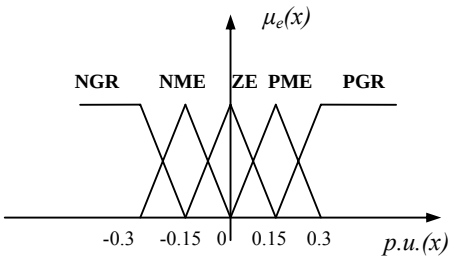


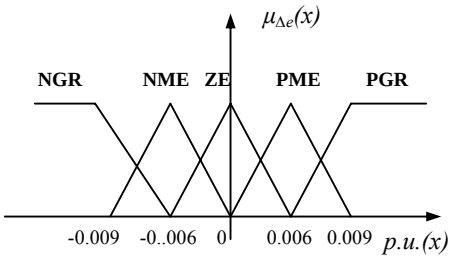

**Figura 5.101** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: *3 ciclos*
Criterio de aspiración: *Alta influencia*.
$\theta$ = **57.19º**, $v_T$ = **1 p.u.**
$\Delta e$ = **0.01**, $\Delta de$ = **0.0005**
Tipo de búsqueda: *Sintonización de funciones de membresía.*

A continuación se muestran en la figura 5.102 las funciones de membresía resultantes y las estructuras asociadas a la búsqueda de la figura 5.101




5.102 (a) Funciones de membresía del error.




5.102 (b) Funciones de membresía de la derivada del error.

| **de** \ **e** | $x_a$ | $x_b$ | $x_c$ | $x_d$ | $x_e$ | $x_f$ | $x_g$ | $x_h$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $y_a$ | 24 | 25 | 10 | 2 | 16 | 1 | 1 | 2 |
| $y_b$ | 21 | 11 | 9 | 3 | 12 | 2 | 3 | 0 |
| $y_c$ | 22 | 8 | 9 | 10 | 15 | 0 | 1 | 0 |
| $y_d$ | 22 | 5 | 0 | 10 | 14 | 5 | 0 | 0 |
| $y_e$ | 22 | 4 | 0 | 15 | 15 | 5 | 2 | 2 |
| $y_f$ | 21 | 10 | 12 | 11 | 5 | 0 | 1 | 1 |
| $y_g$ | 19 | 17 | 3 | 5 | 8 | 1 | 0 | 3 |
| $y_h$ | 15 | 11 | 7 | 5 | 7 | 1 | 2 | 0 |

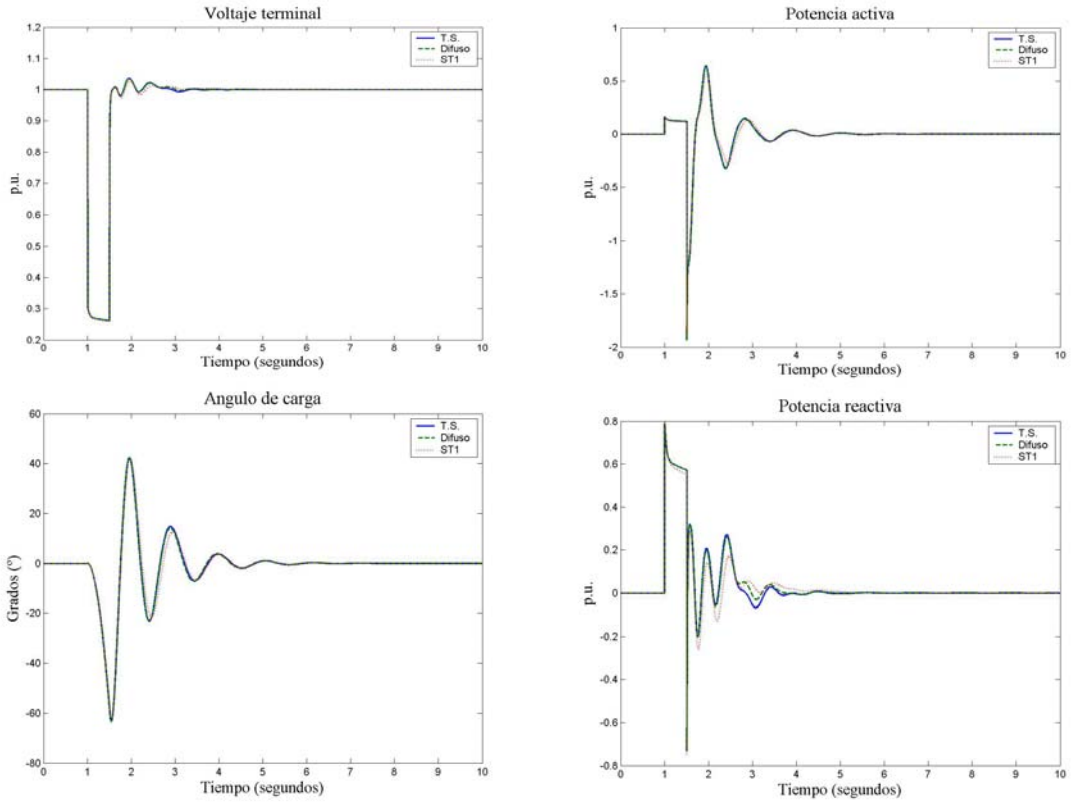
5.102 (c) Memoria de frecuencia después de aplicar TS.

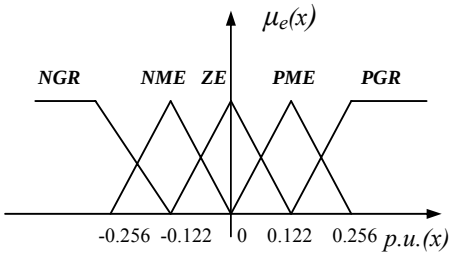
| **de** \ **e** | $x_a$ | $x_b$ | $x_c$ | $x_d$ | $x_e$ | $x_f$ | $x_g$ | $x_h$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $y_a$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $y_b$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $y_c$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $y_d$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $y_e$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $y_f$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $y_g$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $y_h$ | 0 | 0 | 0. | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

5.102 (d) Memoria explicita después de aplicar TS

**Figura 5.102** Funciones de membresía resultantes correspondientes a la figura 5.101 después de aplicar TS por el criterio de alta influencia con:

Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: *3 ciclos*
$\theta$ = **57.19º**, $v_T$ = **1 p.u**.
$\Delta e$ = **0.01**, $\Delta de$=**0.0005**



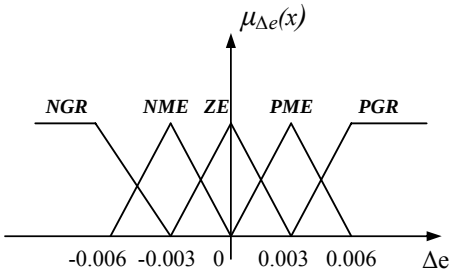




**Figura 5.103.** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional cuando:

No. de reglas lingüísticas: 25
Tipo de línea de transmisión: **corta**
No. de ciclos de duración de la falla: ***30 ciclos***
$\theta$ = **0º**, $v_T$ = **1 p.u**.
$\Delta e$ = **0.01**, $\Delta de$ = **0.0005**

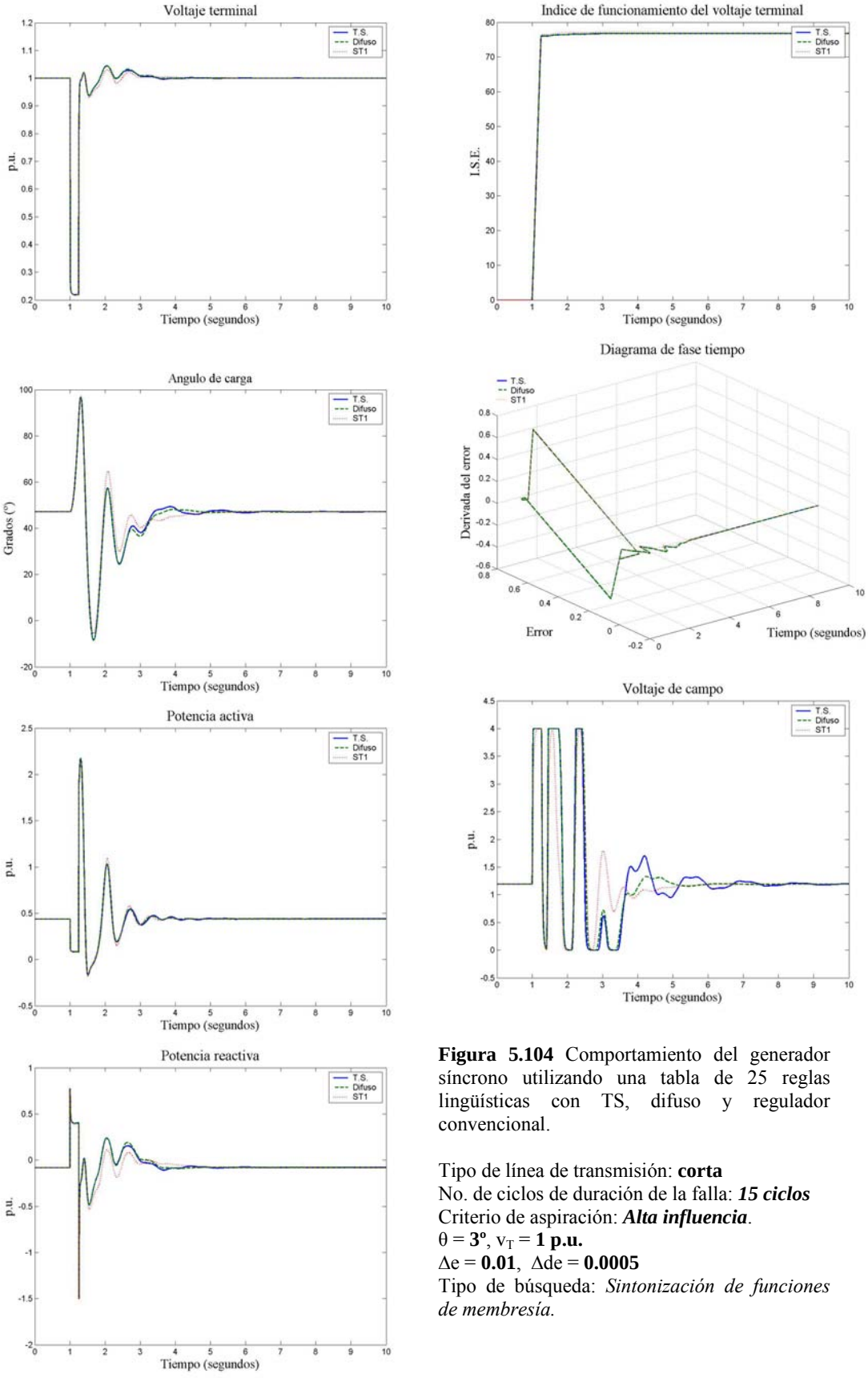



**Figura 5.104** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: **corta**
No. de ciclos de duración de la falla: ***15 ciclos***
Criterio de aspiración: ***Alta influencia***.
$\theta$ = **3º**, $v_T$ = **1 p.u.**
$\Delta e$ = **0.01**, $\Delta de$ = **0.0005**
Tipo de búsqueda: *Sintonización de funciones de membresía.*

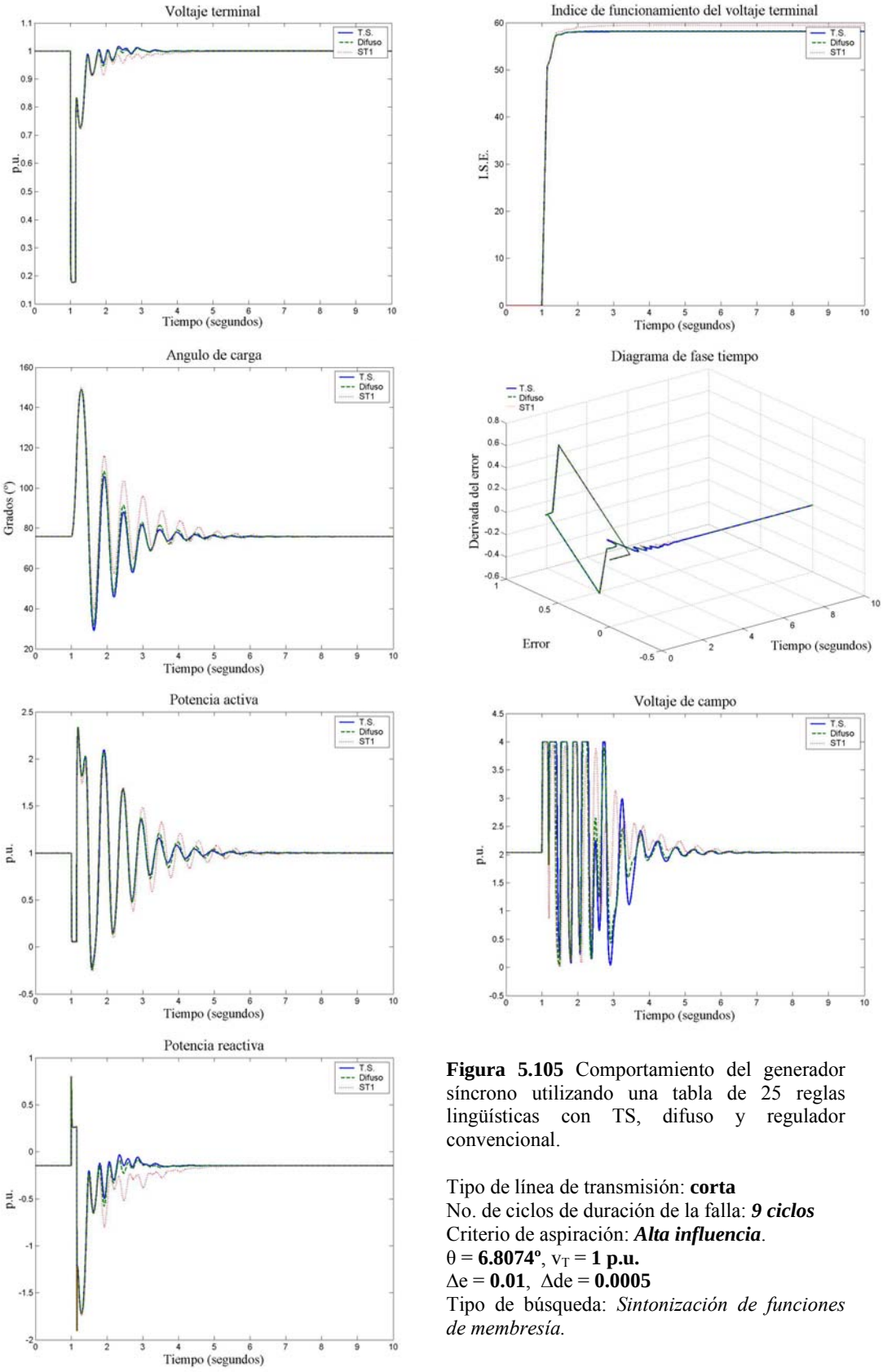



**Figura 5.105** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: **corta**
No. de ciclos de duración de la falla: ***9 ciclos***
Criterio de aspiración: ***Alta influencia***.
$\theta$ = **6.8074º**, $v_T$ = **1 p.u.**
$\Delta e$ = **0.01**, $\Delta de$ = **0.0005**
Tipo de búsqueda: *Sintonización de funciones de membresía.*

### *5.5.3 RESULTADOS OBTENIDOS DESPUÉS DE REALIZAR UNA PRUEBA DE AUTOSINTONIZACIÓN SOBRE 5 FUNCIONES DE MEMBRESÍA UTILIZANDO LA BÚSQUEDA POR TABÚ POR EL CRITERIO DE BAJA INFLUENCIA CON UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN LARGA Y CORTA.*

#### *5.5.3.1 INTRODUCCIÓN.*

En esta sección se muestran los resultados obtenidos después de simular el generador en diversos puntos de operación con una falla trifásica de n ciclos empleando la búsqueda por tabú por el criterio de baja influencia con una línea de transmisión larga y corta. En las siguientes pruebas se muestra la estructura final de las funciones de membresía sobre el universo de discusión que encuentra la búsqueda por tabú al final de cada prueba. Los datos usados para la búsqueda son:

Tipo de criterio: Baja Influencia

Tabú-elemento eliminado: 1 segundos.

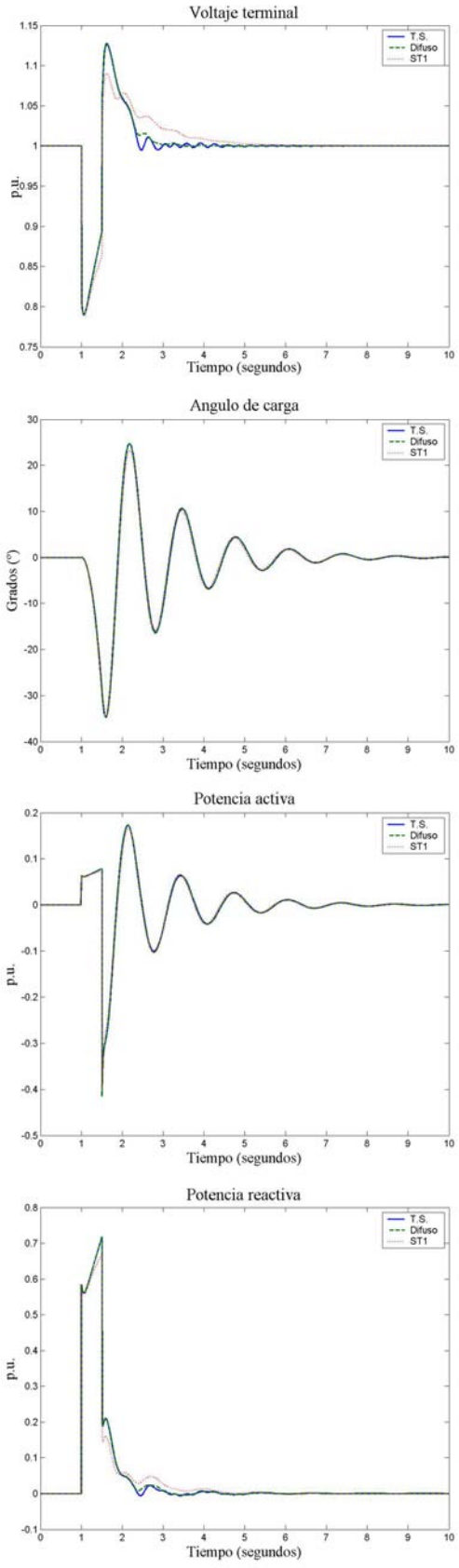
Tabú-elemento sumado: 0.125 segundos

Periodo de corto: 0.124 segundos

Periodo de largo plazo: 0.24 segundos

Los resultados comprenden de la figura 5.106- 5.120 y emplean los dos tipos de líneas larga y corta cuyo valor equivalente de la impedancia es referido en el apéndice C.

Durante esta sección se podrá notar que la diferencia en algunos puntos de operación es demasiado con respecto a las posiciones dimensionales encontradas para cada base de cada función de membresía tanto para el error como para la derivada del error; la principal razón se basa en el incremento del paso de búsqueda ($\Delta e$ *e* $\Delta de$) sobre el espacio de trabajo sobre el cual trabaja la búsqueda por tabú, al final de la sección se realiza un análisis del comportamiento del criterio de alta influencia contra el criterio de baja influencia. Al principio de cada prueba las funciones de membresía propuestas son aquellas funciones de membresía iniciales estáticas (ver valores de intervalos de funciones de membresía en apéndice A) las cuales serán modificadas durante la búsqueda, la calidad de tal solución dependerá básicamente de los valores elegidos iniciales debido a que es la cumbre (función óptima sobre una región de búsqueda de intervalos de las funciones de membresía) de la búsqueda de cada función de membresía y de los parámetros escogidos para la búsqueda, tomando en cuenta que existe una diferencia entre un criterio de aspiración y otro.



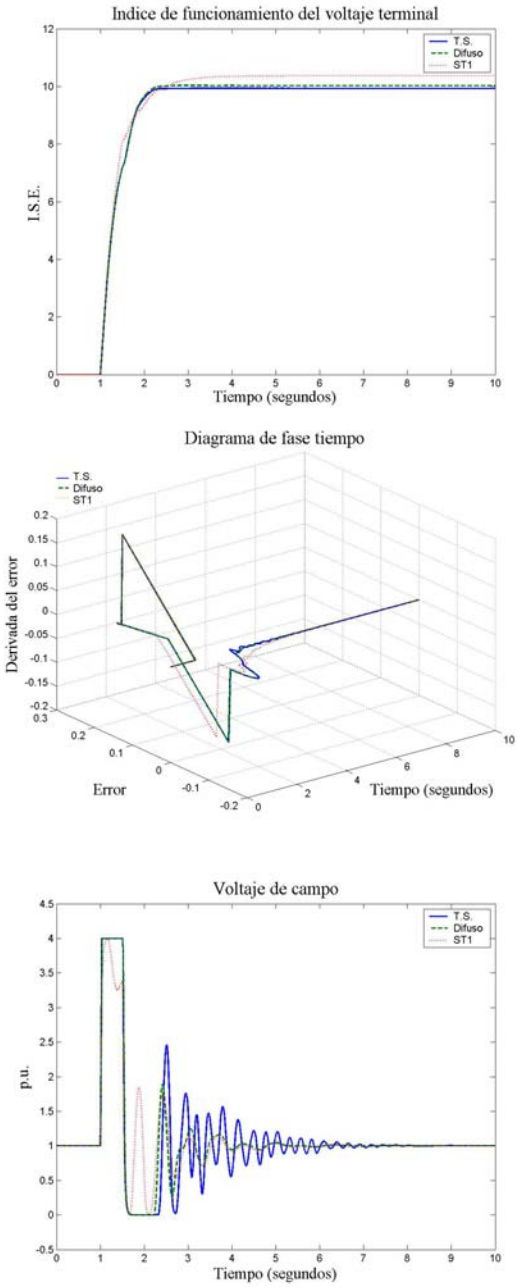
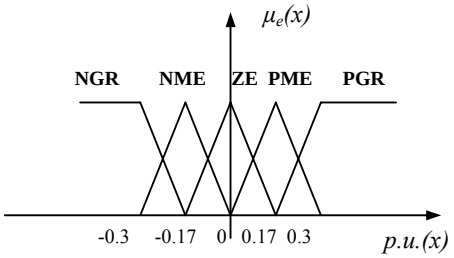



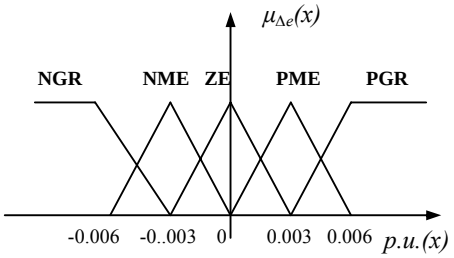

**Figura 5.106 Co**mportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: *30 ciclos*
Criterio de aspiración: *Baja influencia*.
$\theta = \mathbf{0^o}$, $v_T = \mathbf{1\ p.u.}$
$\Delta e = \mathbf{0.01}$, $\Delta de = \mathbf{0.0005}$
Tipo de búsqueda: *Sintonización de funciones de membresía.*

A continuación se muestran en la figura 5.107 las funciones de membresía resultantes y las estructuras asociadas a la búsqueda de la figura 5.106:




5.107 (a) Funciones de membresía del error.




5.107 (b) Funciones de membresía de la derivada del error.

| **de** \ **e** | $x_a$ | $x_b$ | $x_c$ | $x_d$ | $x_e$ | $x_f$ | $x_g$ | $x_h$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $y_a$ | 6 | 4 | 5 | 7 | 6 | 5 | 2 | 3 |
| $y_b$ | 4 | 3 | 5 | 5 | 3 | 1 | 0 | 1 |
| $y_c$ | 3 | 4 | 4 | 3 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| $y_d$ | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| $y_e$ | 2 | 3 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $y_f$ | 2 | 3 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $y_g$ | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| $y_h$ | 1 | 6 | 3 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |

5.107 (c) Memoria de frecuencia después de aplicar TS.

| **de** \ **e** | $x_a$ | $x_b$ | $x_c$ | $x_d$ | $x_e$ | $x_f$ | $x_g$ | $x_h$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $y_a$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $y_b$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $y_c$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $y_d$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $y_e$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $y_f$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $y_g$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $y_h$ | 0 | 0 | 0. | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

5.107 (d) Memoria explícita después de aplicar TS

**Figura 5.107** Funciones de membresía resultantes correspondientes a la figura 5.106 después de aplicar TS por el criterio de baja influencia con:
$\Delta e$ = **0.01**, $\Delta de$=**0.0005**
Tipo de línea de transmisión: *larga*
$\theta$ = **0º**, $v_T$ = **1 p.u**.
No. de ciclos de duración de la falla: *30 ciclos*

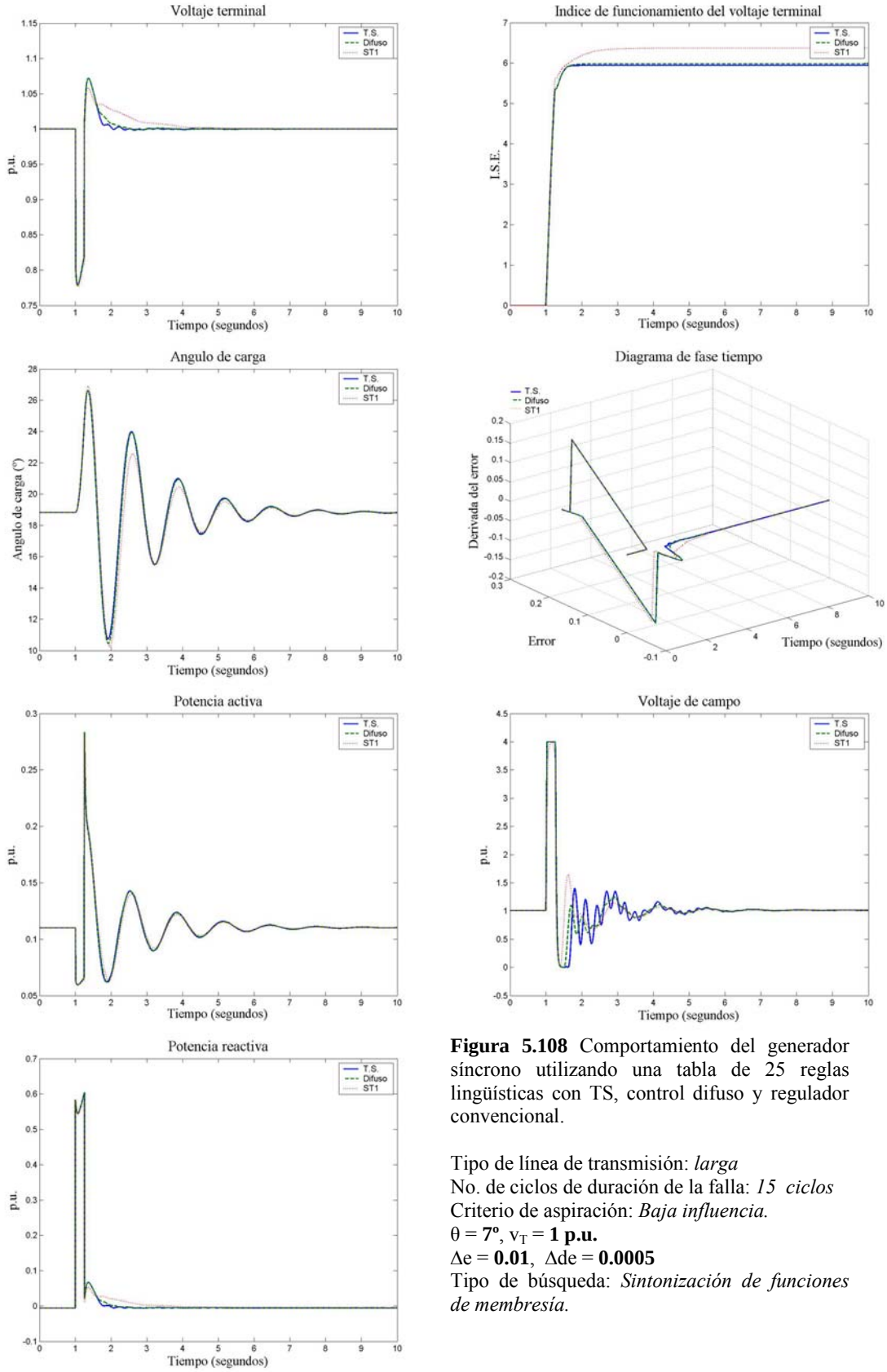



**Figura 5.108** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con TS, control difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: *15 ciclos*
Criterio de aspiración: *Baja influencia.*
$\theta$ = **7º**, $v_T$ = **1 p.u.**
$\Delta e$ = **0.01**, $\Delta de$ = **0.0005**
Tipo de búsqueda: *Sintonización de funciones de membresía.*

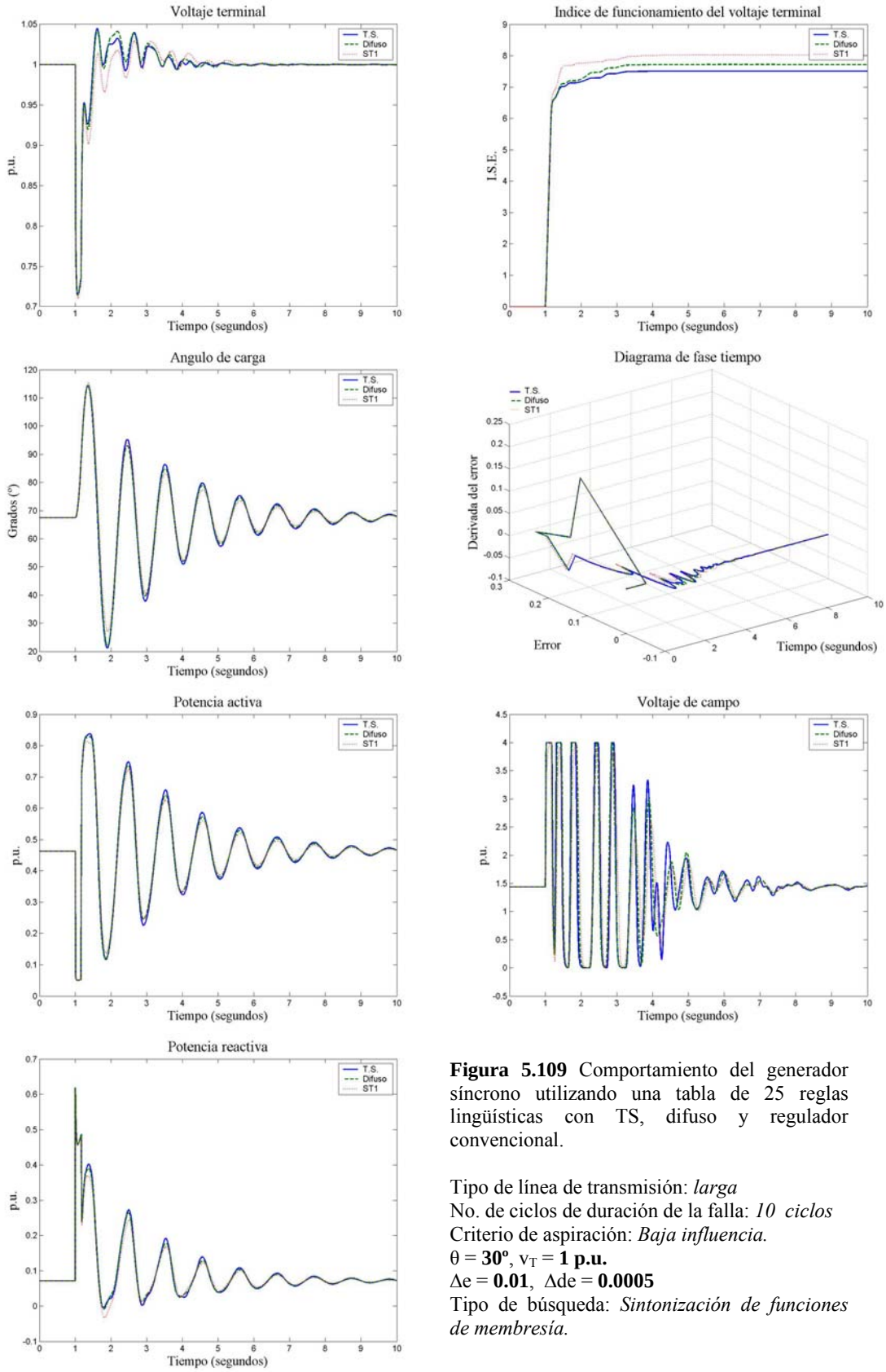



**Figura 5.109** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: *10 ciclos*
Criterio de aspiración: *Baja influencia.*
$\theta$ = **30º**, $v_T$ = **1 p.u.**
$\Delta e$ = **0.01**, $\Delta de$ = **0.0005**
Tipo de búsqueda: *Sintonización de funciones de membresía.*

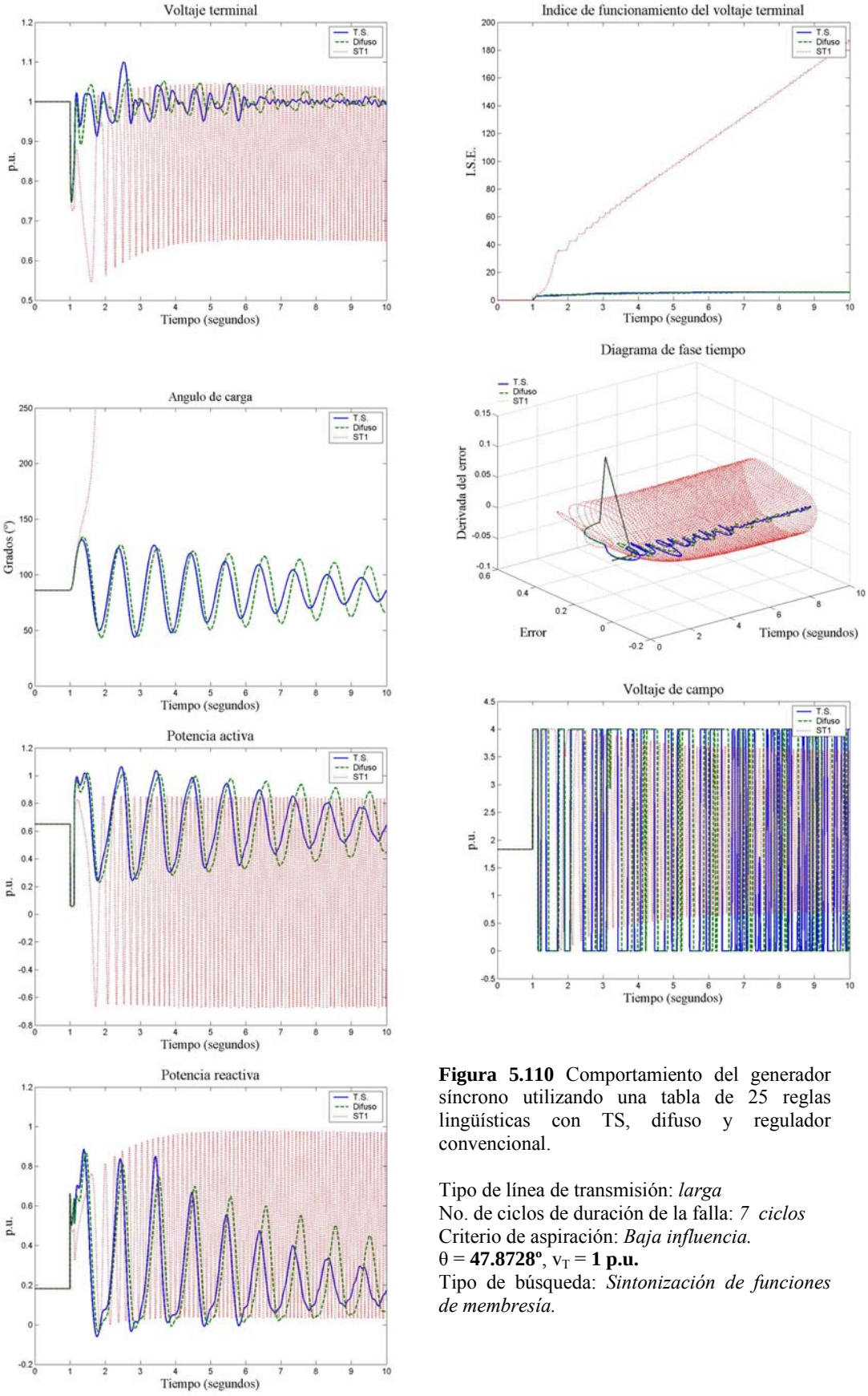



**Figura 5.110** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: *7 ciclos*
Criterio de aspiración: *Baja influencia.*
$\theta$ = **47.8728º**, $v_T$ = **1 p.u.**
Tipo de búsqueda: *Sintonización de funciones de membresía.*

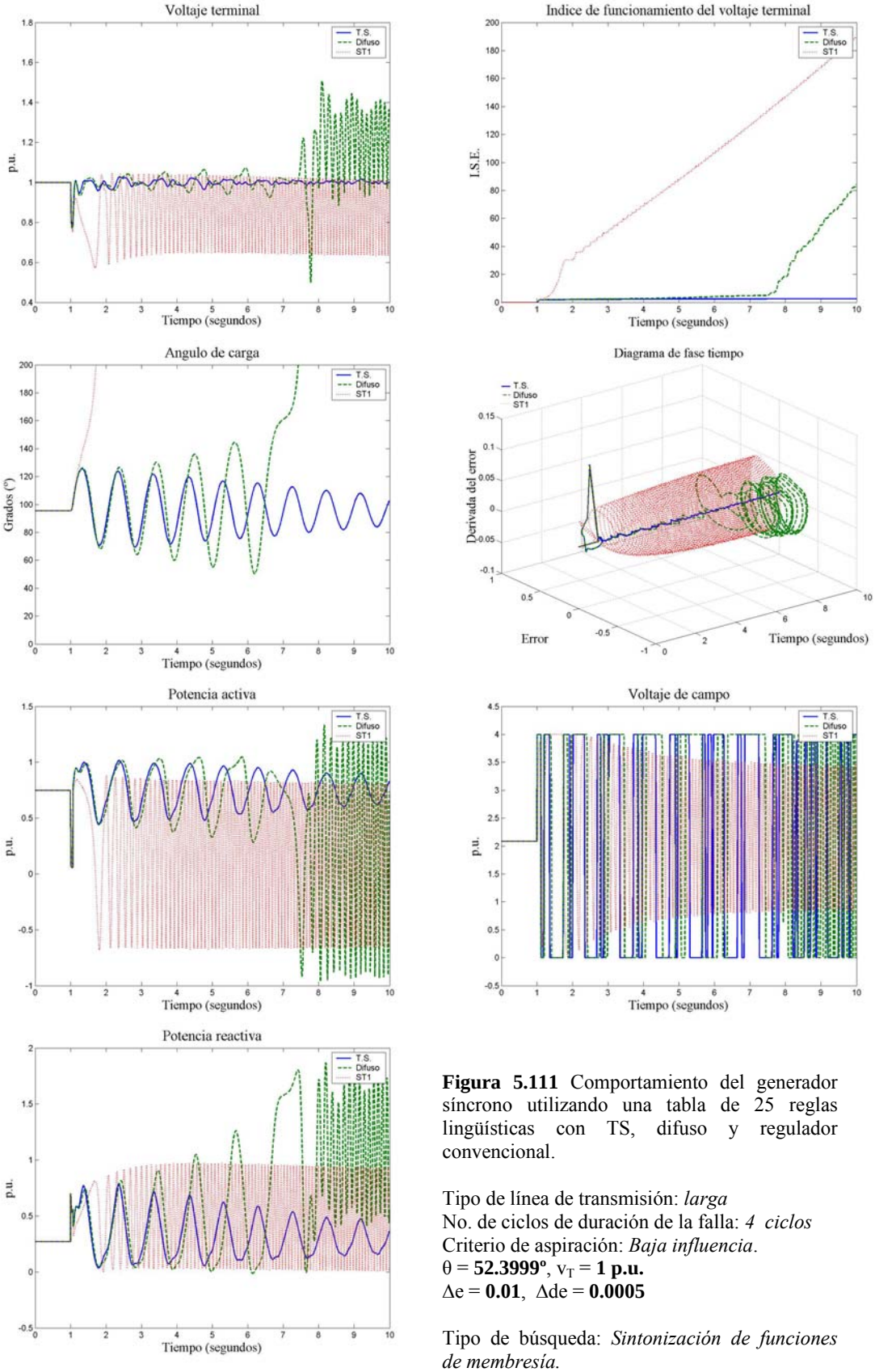



**Figura 5.111** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: *4 ciclos*
Criterio de aspiración: *Baja influencia*.
$\theta$ = **52.3999º**, $v_T$ = **1 p.u.**
$\Delta e$ = **0.01**, $\Delta de$ = **0.0005**

Tipo de búsqueda: *Sintonización de funciones de membresía.*

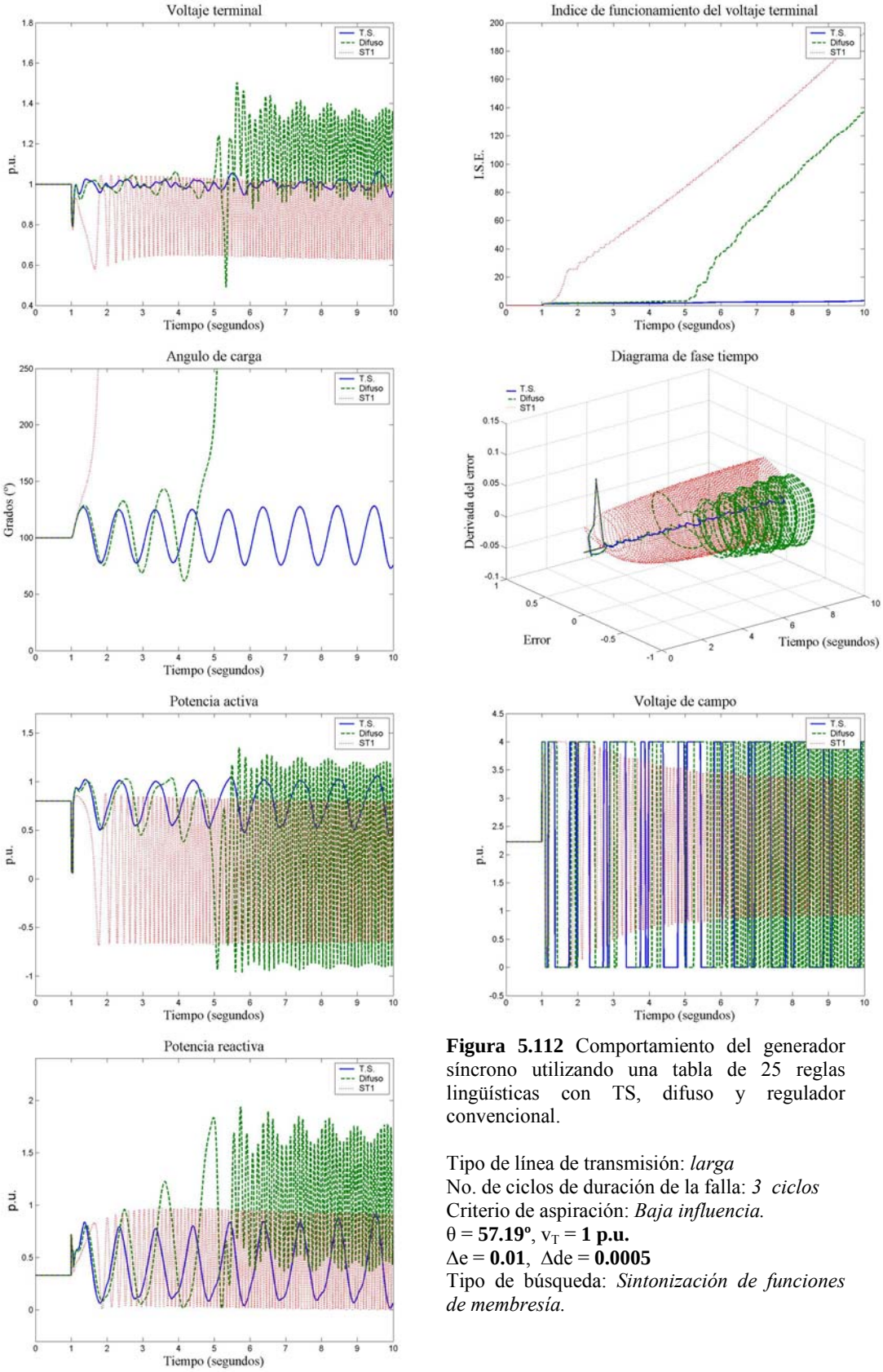
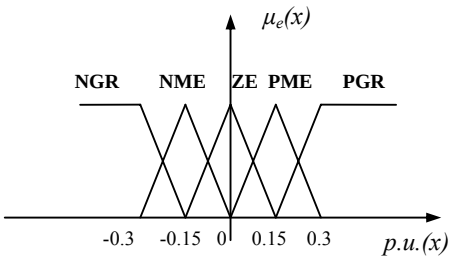


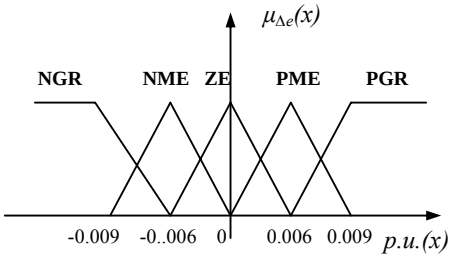

**Figura 5.112** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: *3 ciclos*
Criterio de aspiración: *Baja influencia.*
$\theta$ = **57.19º**, $v_T$ = **1 p.u.**
$\Delta e$ = **0.01**, $\Delta de$ = **0.0005**
Tipo de búsqueda: *Sintonización de funciones de membresía.*

A continuación se muestran en la figura 5.113 las funciones de membresía resultantes y las estructuras asociadas a la búsqueda de la figura 5.112




5.113 (a) Funciones de membresía del error.




5.113 (b) Funciones de membresía de la derivada del error.

| **de** \ **e** | $x_a$ | $x_b$ | $x_c$ | $x_d$ | $x_e$ | $x_f$ | $x_g$ | $x_h$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $y_a$ | 10 | 8 | 10 | 7 | 3 | 1 | 1 | 2 |
| $y_b$ | 12 | 12 | 10 | 5 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| $y_c$ | 10 | 16 | 11 | 0 | 2 | 1 | 0 | 1 |
| $y_d$ | 9 | 7 | 4 | 1 | 2 | 1 | 0 | 1 |
| $y_e$ | 9 | 3 | 6 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| $y_f$ | 6 | 3 | 3 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| $y_g$ | 16 | 3 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $y_h$ | 5 | 3 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |

5.113 (c) Memoria de frecuencia después de aplicar TS.

| **de** \ **e** | $x_a$ | $x_b$ | $x_c$ | $x_d$ | $x_e$ | $x_f$ | $x_g$ | $x_h$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $y_a$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $y_b$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $y_c$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $y_d$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $y_e$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $y_f$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $y_g$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $y_h$ | 0 | 0 | 0. | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

5.113 (d) Memoria explícita después de aplicar TS

**Figura 5.113** Funciones de membresía resultantes correspondientes a la figura 5.110 después de aplicar TS por el criterio de alta influencia con:

Tipo de línea de transmisión: *Baja*
No. de ciclos de duración de la falla: *3 ciclos*
$\theta$ = **57.19º**, $v_T$ = **1 p.u**.
$\Delta e$ = **0.01**, $\Delta de$=**0.0005**

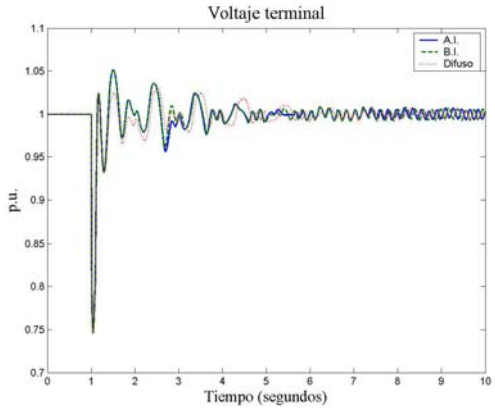



**Figura 5.114** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: *4 ciclos*
Criterio de aspiración: *Alta vs baja influencia.*
$\theta$ = ***47.9942º***, $v_T$ = **1 p.u.**
$\Delta e$ = **0.01**, $\Delta de$=**0.0005**

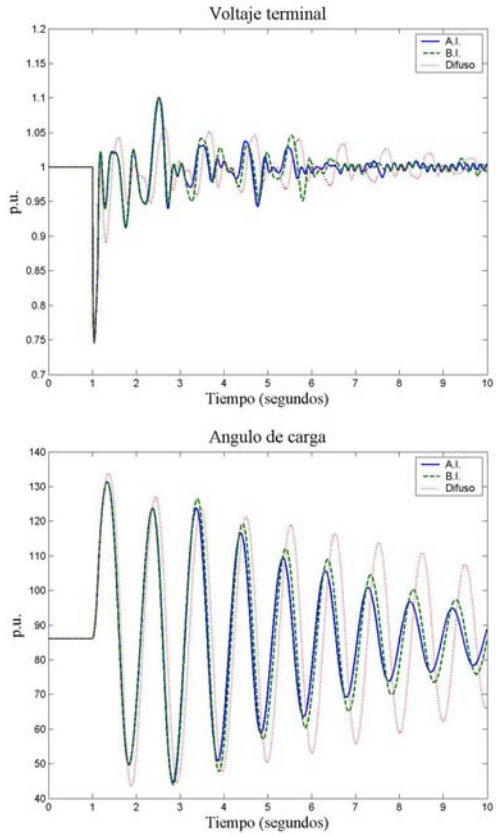



**Figura 5.115** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: *7 ciclos*
Criterio de aspiración: *Baja vs Alta influencia*.
$\theta$ = **43.8328º**, $v_T$ = **1 p.u.**
$\Delta e$ = **0.01**, $\Delta de$=**0.0005**

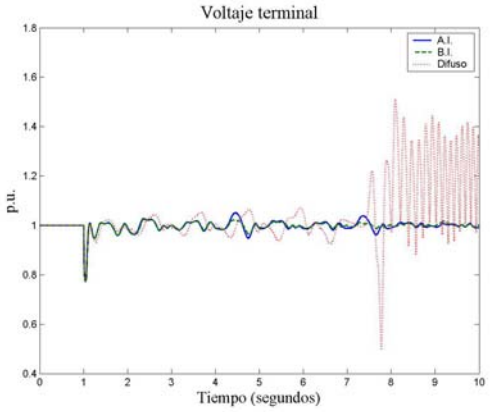



**Figura 5.116** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: *2 ciclos*
Criterio de aspiración: *Alta vs baja influencia*..
$\theta$ = **57.19º**, $v_T$ = **1 p.u.**

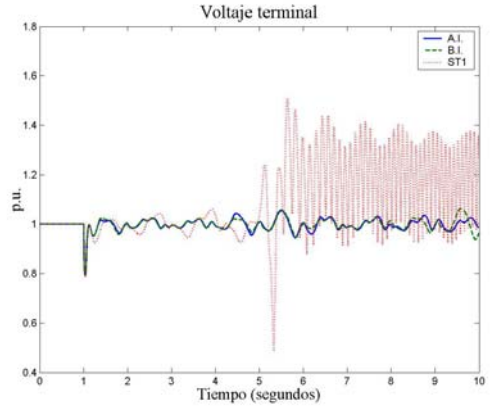



**Figura 5.117** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: *3 ciclos*
Criterio de aspiración: *Alta vs baja influencia*..
$\theta$ = ***57.19º***, $v_T$ = **1 p.u.**
$\Delta e$ = **0.01**, $\Delta de$=**0.0005**

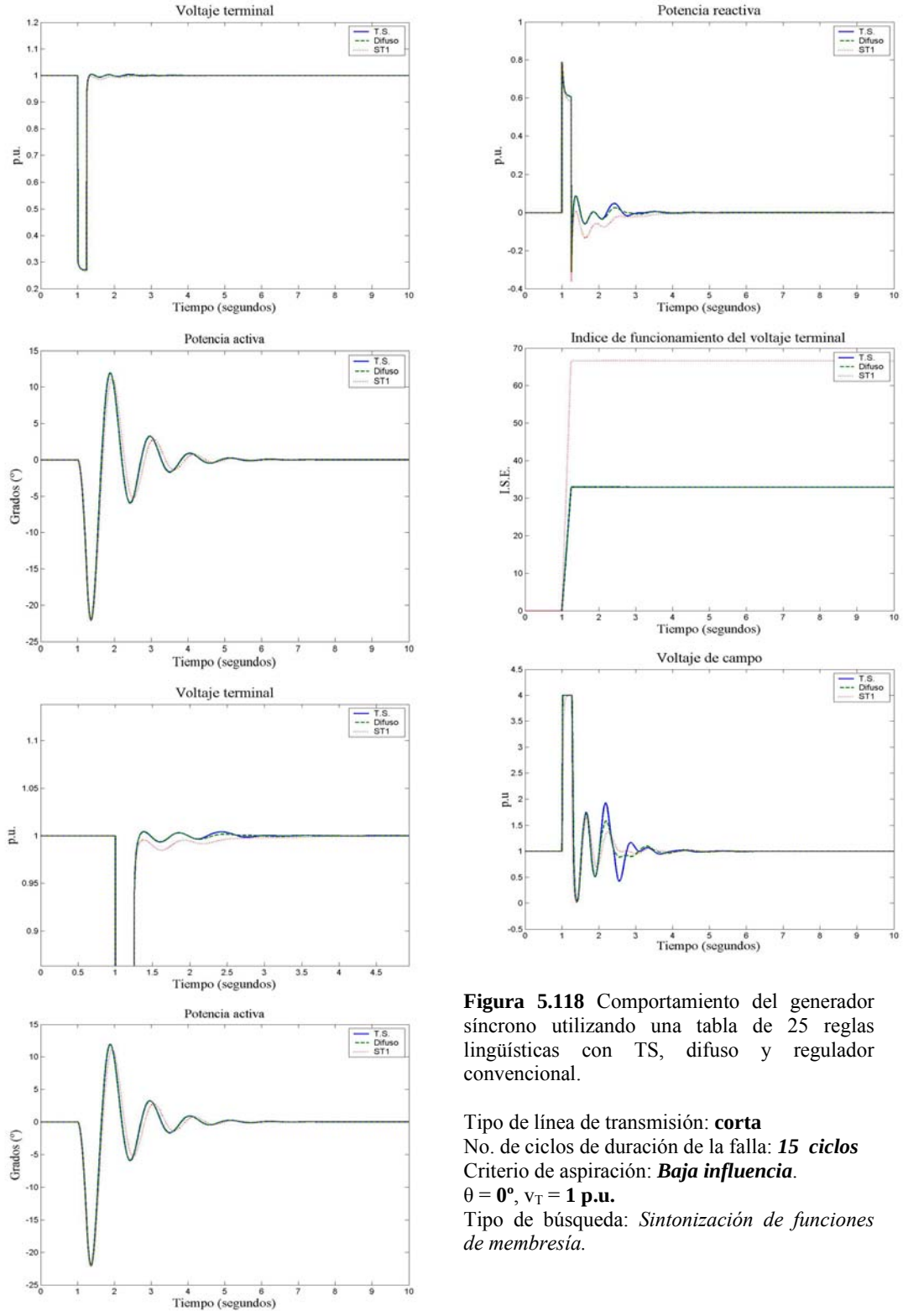



**Figura 5.118** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: **corta**
No. de ciclos de duración de la falla: ***15 ciclos***
Criterio de aspiración: ***Baja influencia***.
$\theta$ = **0º**, $v_T$ = **1 p.u.**
Tipo de búsqueda: *Sintonización de funciones de membresía.*

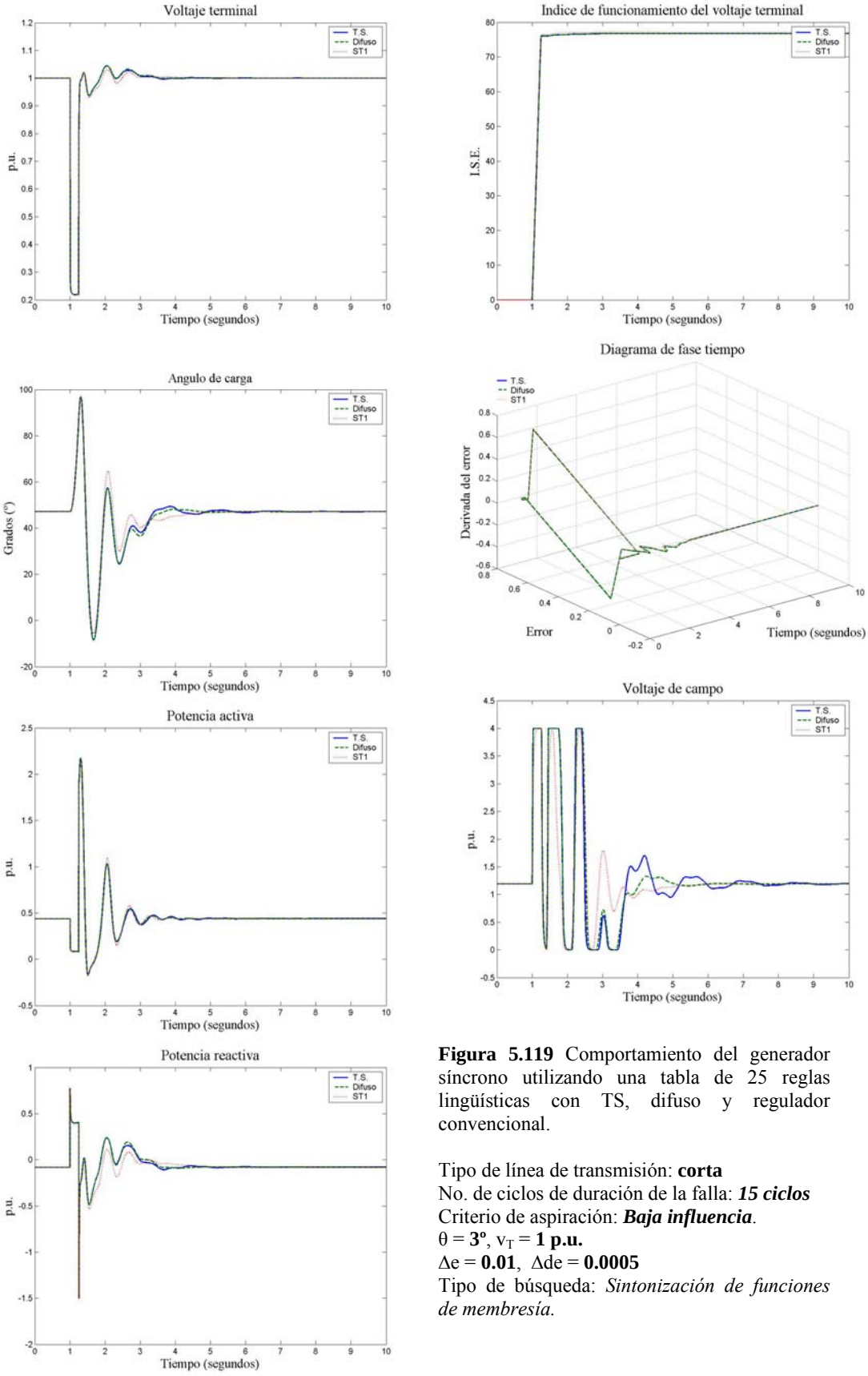



**Figura 5.119** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: **corta**
No. de ciclos de duración de la falla: ***15 ciclos***
Criterio de aspiración: ***Baja influencia***.
$\theta$ = **3º**, $v_T$ = **1 p.u.**
$\Delta e$ = **0.01**, $\Delta de$ = **0.0005**
Tipo de búsqueda: *Sintonización de funciones de membresía.*

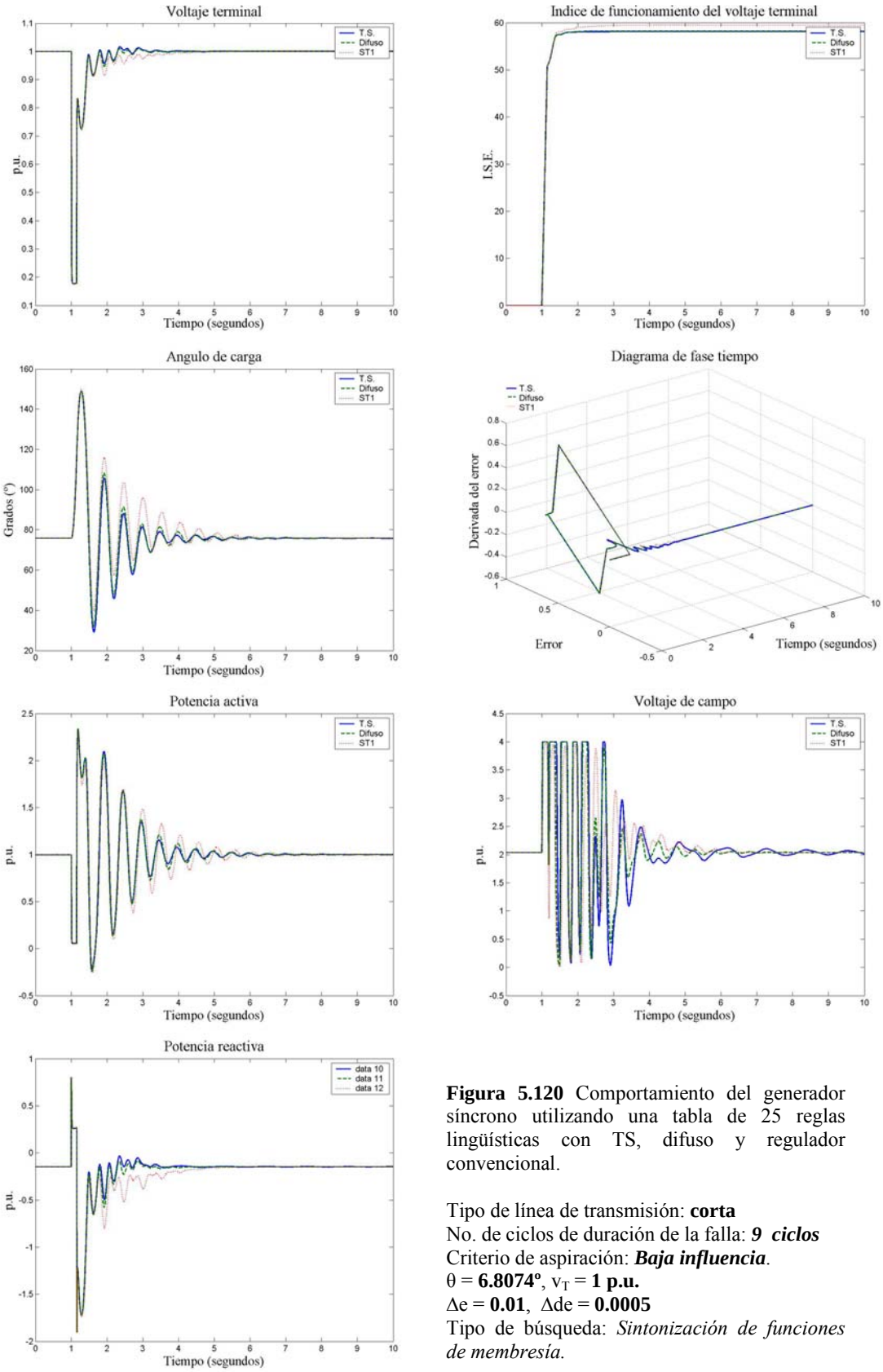



**Figura 5.120** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: **corta**
No. de ciclos de duración de la falla: ***9 ciclos***
Criterio de aspiración: ***Baja influencia***.
$\theta$ = **6.8074º**, $v_T$ = **1 p.u.**
$\Delta e$ = **0.01**, $\Delta de$ = **0.0005**
Tipo de búsqueda: *Sintonización de funciones de membresía.*

### *5.5.4 RESULTADOS OBTENIDOS DESPUÉS DE REALIZAR UNA PRUEBA DE AUTOSINTONIZACIÓN SOBRE 7 FUNCIONES DE MEMBRESÍA UTILIZANDO LA BÚSQUEDA POR TABÚ POR EL CRITERIO DE ALTA INFLUENCIA CON UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN LARGA Y CORTA.*

#### *5.5.4.1 INTRODUCCIÓN.*

En esta sección se muestran todos aquellos resultados correspondientes a la sintonización de las funciones de membresía con una tabla de 49 reglas lingüísticas empleando el criterio de alta influencia con una línea de transmisión larga y corta.

A continuación se presenta una prueba realizada al generador simulando un incremento en la carga y empleando la búsqueda por tabú por el criterio de alta influencia comparado contra la regulación en terminales realizada por un regulador convencional tipo ST1, tal como se muestra en la figura 5.121.

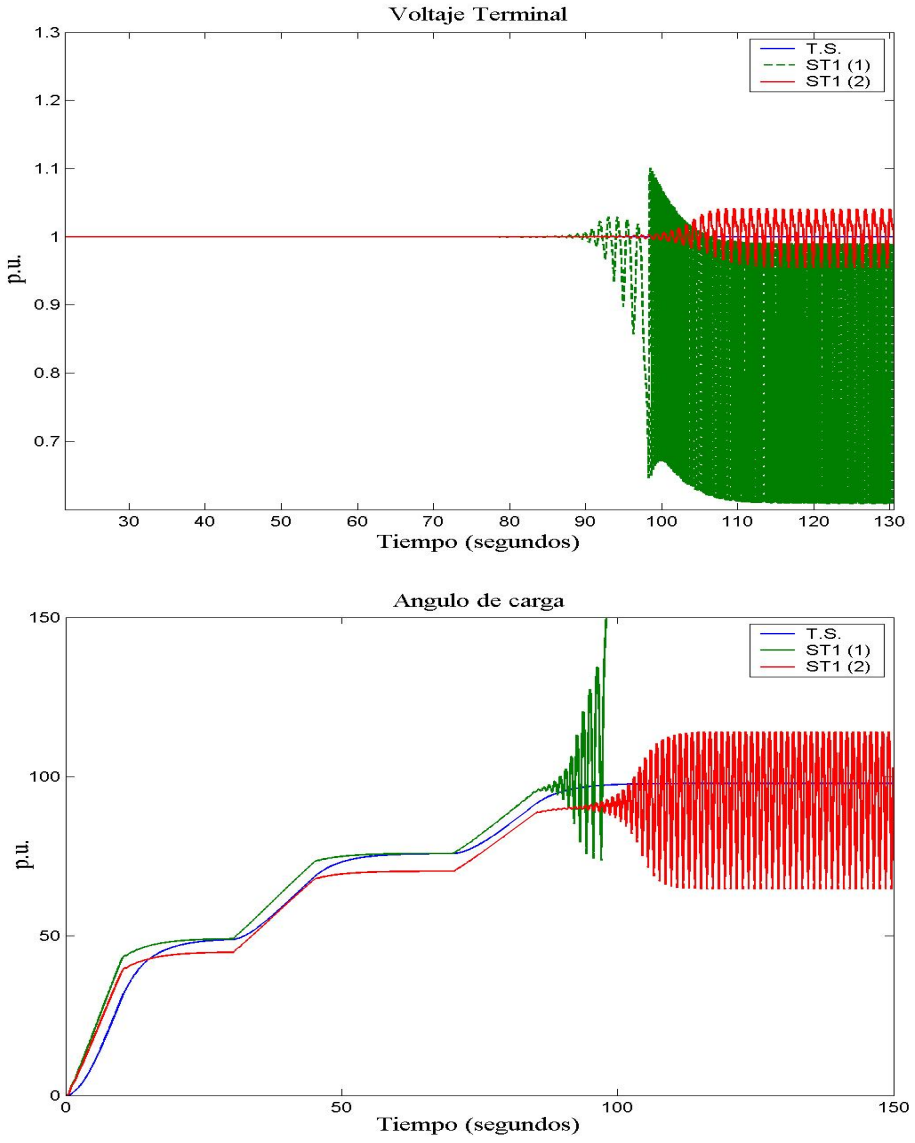



**Figura 5.121.** Comportamiento del generador síncrono empleando TS y ST1.

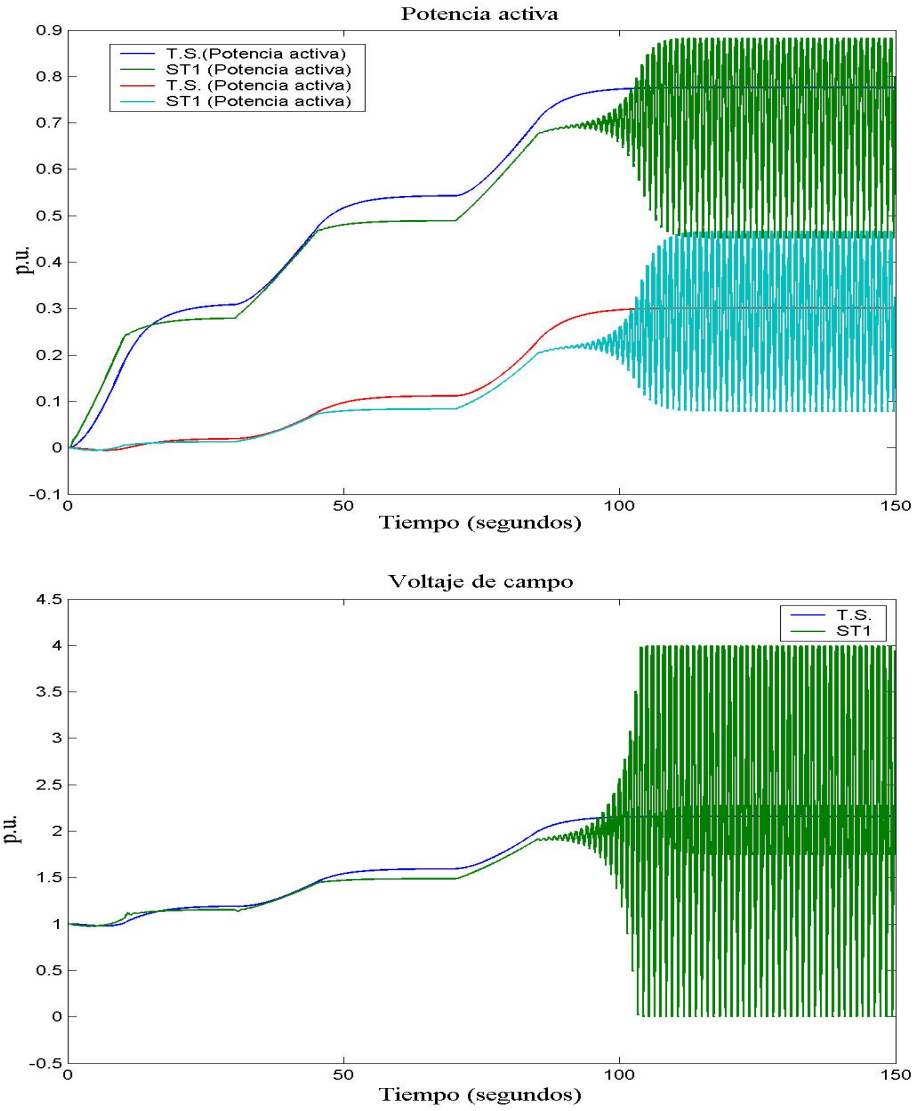
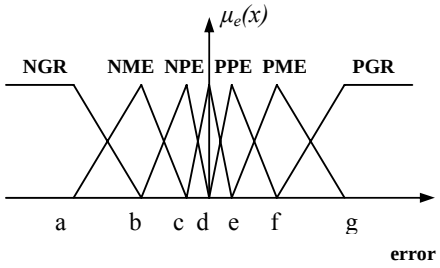
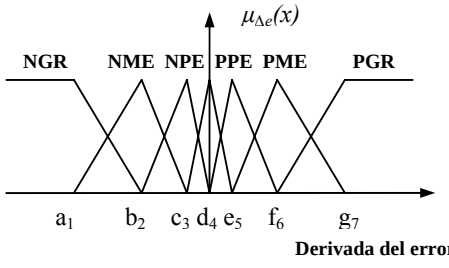



**Figura 5.122.** Comportamiento del generador síncrono empleando TS y ST1.

Finalmente para esta prueba las funciones de membresía finales son como se muestran en la figura 5.123:




5.123 (a) Funciones de membresía del error.




5.123 (b) Funciones de membresía de la derivada del error.

a =-0.12, b =-0.005, c =-0.0035, d = 0, e = 0.0035, f = 0.005, g = 0.12

$a_1$ = -0.0015, $b_2$ = -0.0013, $c_3$= -0.001, $e_4$= 0, $d_5$= 0.001, $f_6$= 0.0013, $g_7$= 0.0015

**Figura 5.123** Funciones de membresía resultantes.

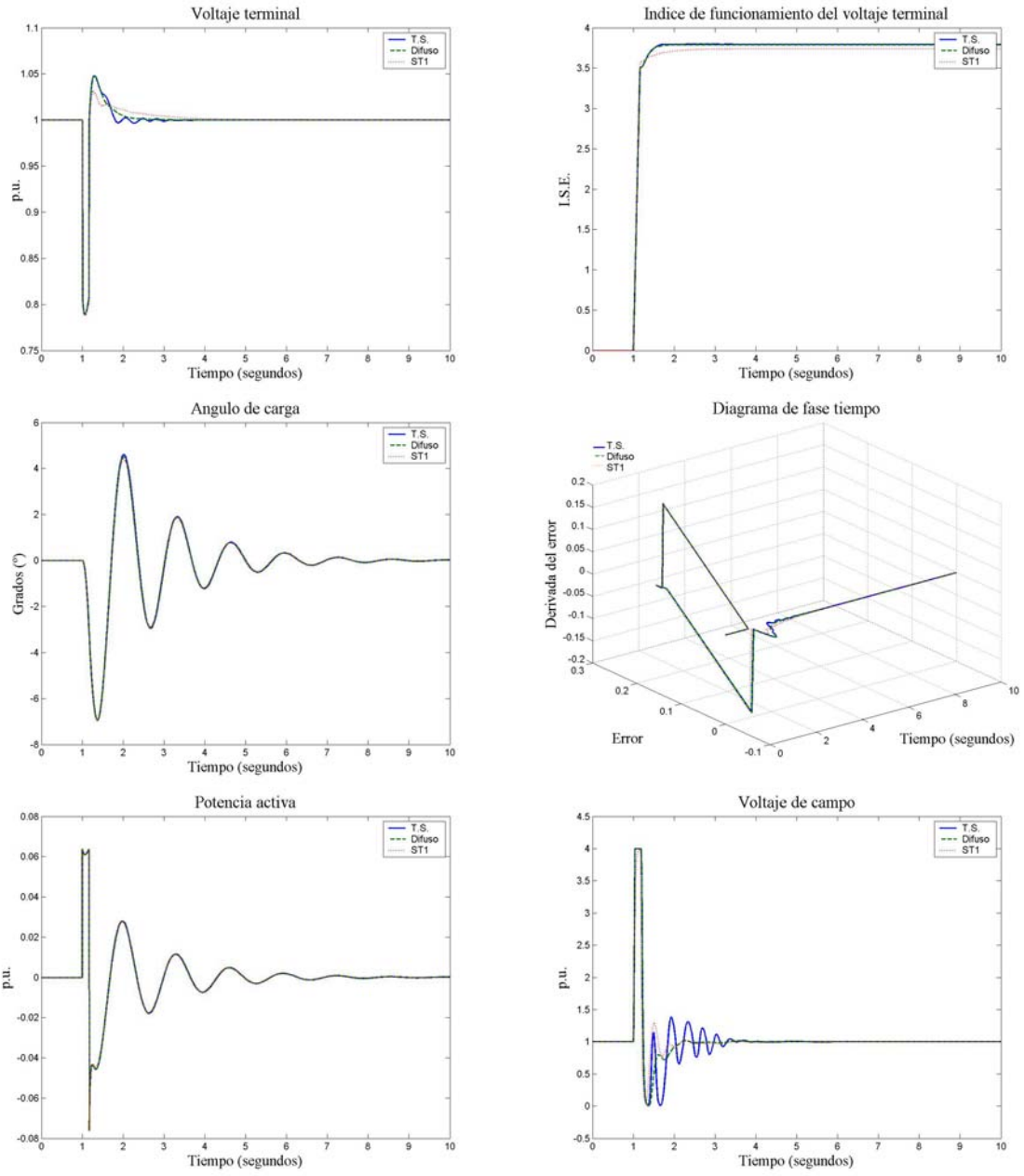
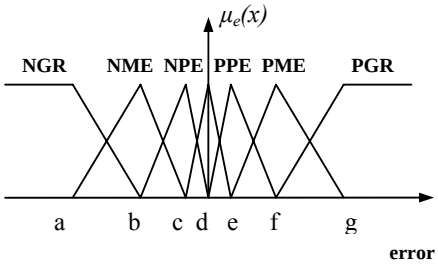
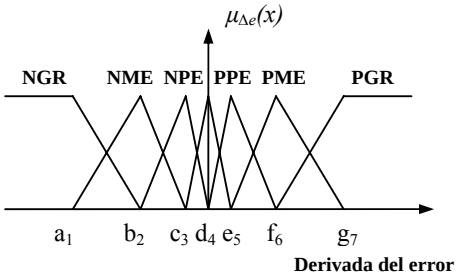



**Figura 5.124** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: *10 ciclos*
Criterio de aspiración: *Alta influencia*.
$\theta$ =**0º**, $v_T$ = **1 p.u.**
$\Delta e$ = **0.001**, $\Delta de$ = **0.0001**
Tipo de búsqueda: *Sintonización de funciones de membresía.*




5.125 (a) Funciones de membresía del error.




5.125 (b) Funciones de membresía de la derivada del error.

a=-0.12, b=-0.005, c=-0.0035, d= 0, e= 0.0035, f= 0.005, g= 0.12
$a_1$ = -0.0015, $b_2$ = -0.00135, $c_3$= -0.0011, $e_4$= 0, $d_5$= 0.0011, $f_6$= 0.00135, $g_7$= 0.0015

| **de** \| **e** | $x_a$ | $x_b$ | $x_c$ | $x_d$ | $x_e$ | $x_f$ | $x_g$ | $x_h$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $y_a$ | 11 | 10 | 9 | 12 | 14 | 4 | 0 | 4 |
| $y_b$ | 10 | 10 | 9 | 12 | 15 | 4 | 0 | 0 |
| $y_c$ | 8 | 12 | 7 | 14 | 16 | 4 | 2 | 0 |
| $y_d$ | 8 | 15 | 2 | 15 | 17 | 1 | 5 | 0 |
| $y_e$ | 6 | 14 | 1 | 16 | 18 | 2 | 4 | 1 |
| $y_f$ | 3 | 13 | 1 | 4 | 19 | 6 | 1 | 1 |
| $y_g$ | 4 | 11 | 3 | 5 | 20 | 5 | 6 | 1 |
| $y_h$ | 12 | 13 | 5 | 6 | 10 | 4 | 8 | 1 |

5.125 (c) Memoria de frecuencia después de aplicar TS.

| **de** \| **e** | $x_a$ | $x_b$ | $x_c$ | $x_d$ | $x_e$ | $x_f$ | $x_g$ | $x_h$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $y_a$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $y_b$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $y_c$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $y_d$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $y_e$ | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| $y_f$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $y_g$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $y_h$ | 0 | 0 | 0. | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |

5.125 (d) Memoria explícita después de aplicar TS

**Figura 5.125** Funciones de membresía y estructuras resultantes correspondientes a la figura 5.124 después de aplicar TS por el criterio de alta influencia con:

Tipo de línea de transmisión: *larga*
Criterio de aspiración: *Alta influencia*
No. de ciclos de duración de la falla: 1*0 ciclos*
$\theta$ = **0º**, $v_T$ = **1 p.u**.
$\Delta$e = **0.001**, $\Delta$de=**0.0001**

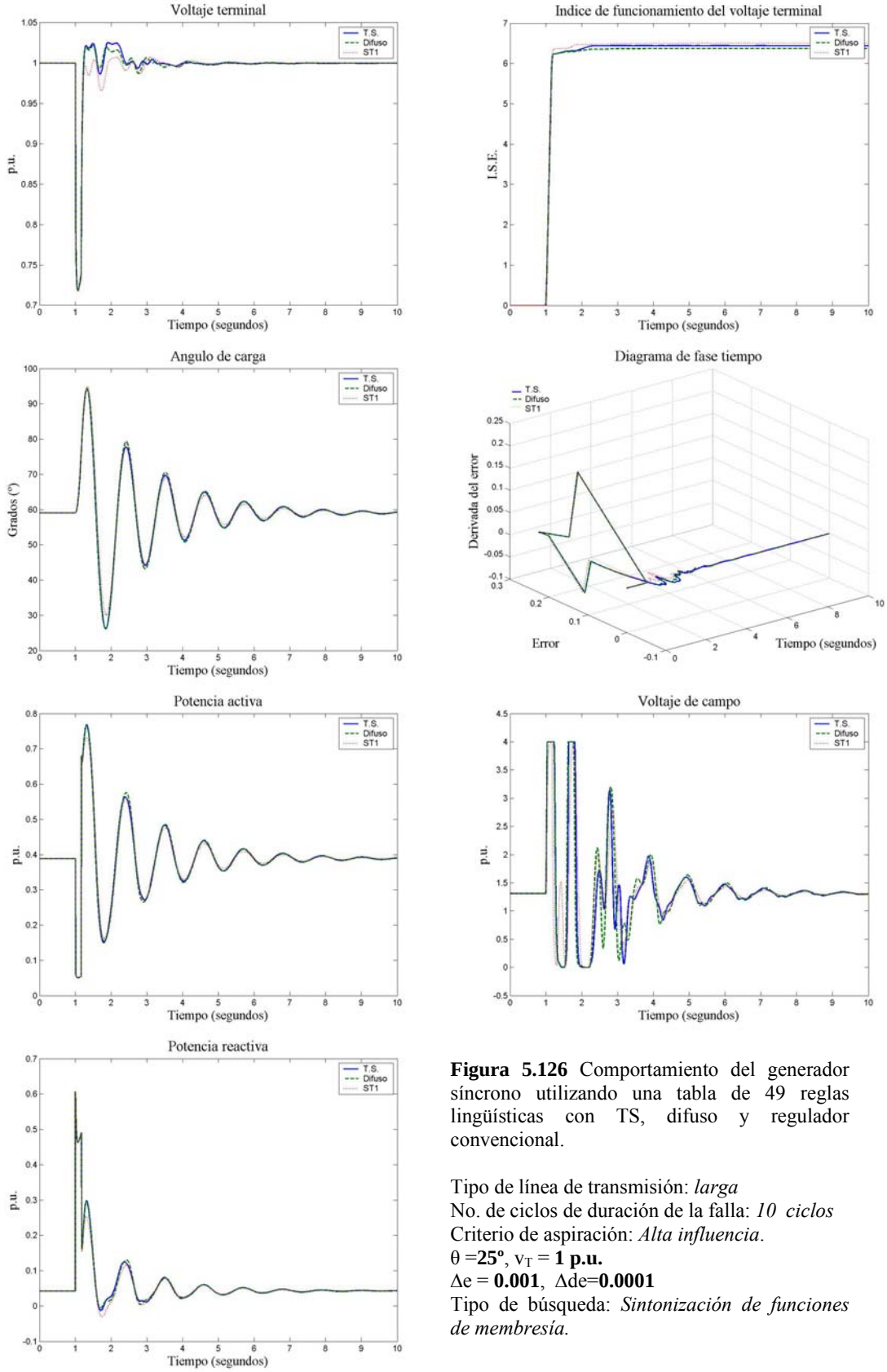



**Figura 5.126** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: *10 ciclos*
Criterio de aspiración: *Alta influencia*.
$\theta$ =**25°**, $v_T$ = **1 p.u.**
$\Delta e$ = **0.001**, $\Delta de$=**0.0001**
Tipo de búsqueda: *Sintonización de funciones de membresía.*

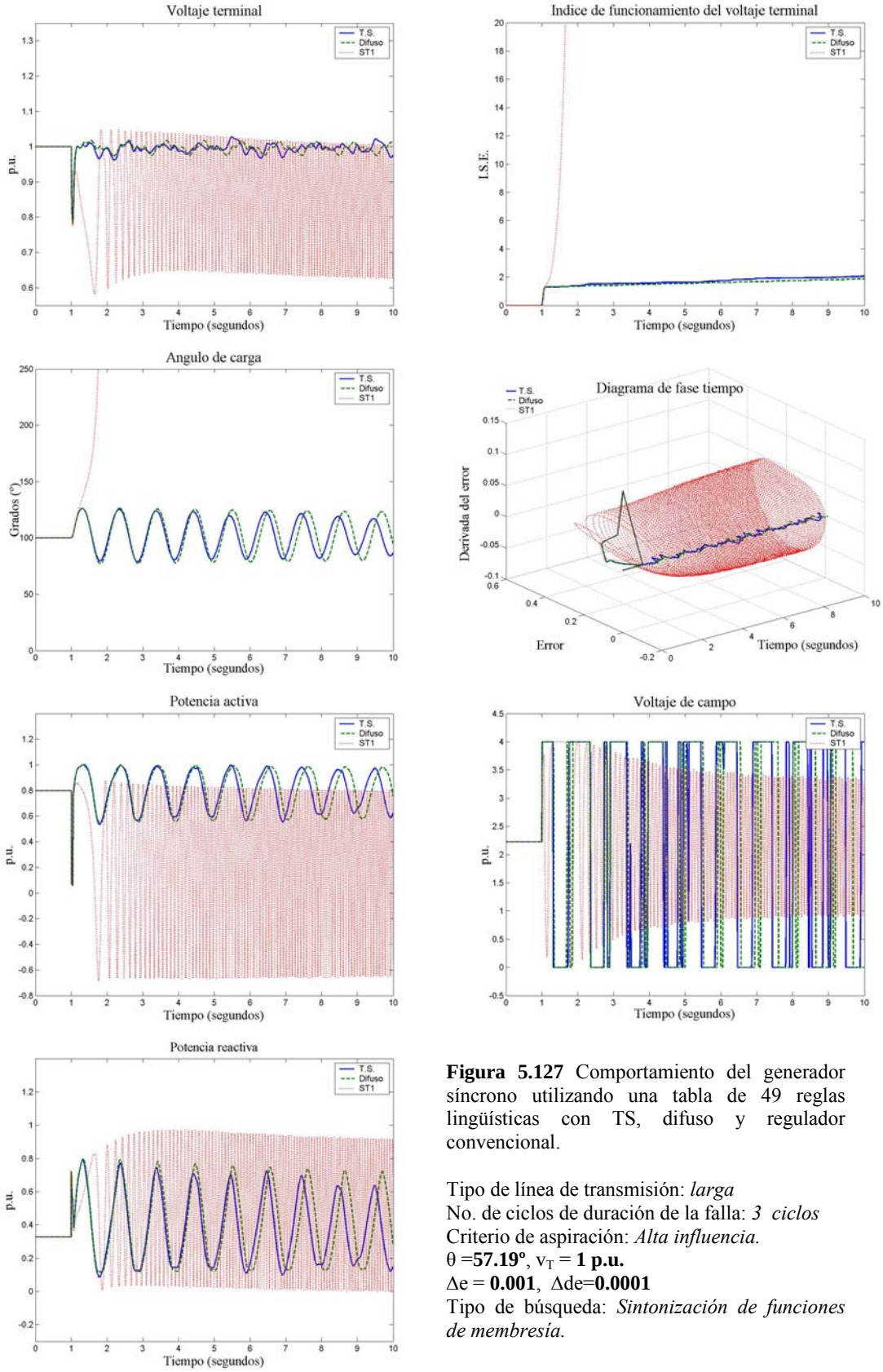
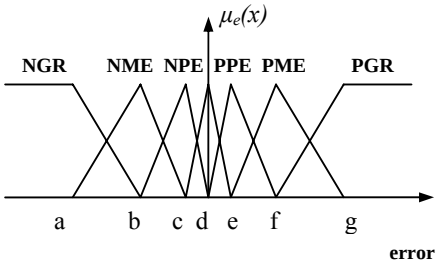


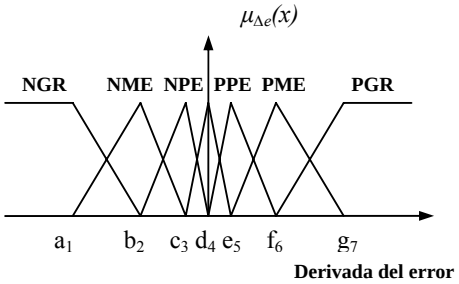

**Figura 5.127** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: *3 ciclos*
Criterio de aspiración: *Alta influencia.*
$\theta$ =**57.19º**, $v_T$ = **1 p.u.**
$\Delta e$ = **0.001**, $\Delta de$=**0.0001**
Tipo de búsqueda: *Sintonización de funciones de membresía.*

A continuación se muestran en la figura 5.128 las funciones de membresía resultantes y las estructuras asociadas a la búsqueda de la figura 5.127




5.128 (a) Funciones de membresía del error.




5.128 (b) Funciones de membresía de la derivada del error.

a =-0.12, b =-0.005, c =-0.0035, d = 0, e = 0.0035, f = 0.005, g = 0.12
$a_1$ = -0.0015, $b_2$ = -0.0013, $c_3$= -0.001, $e_4$= 0, $d_5$= 0.001, $f_6$= 0.0013, $g_7$= 0.0015

| **de** \ **e** | $x_a$ | $x_b$ | $x_c$ | $x_d$ | $x_e$ | $x_f$ | $x_g$ | $x_h$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $y_a$ | 20 | 9 | 8 | 4 | 2 | 16 | 1 | 1 |
| $y_b$ | 20 | 12 | 8 | 4 | 2 | 14 | 4 | 1 |
| $y_c$ | 21 | 15 | 7 | 0 | 1 | 15 | 4 | 1 |
| $y_d$ | 22 | 12 | 5 | 1 | 0 | 13 | 1 | 1 |
| $y_e$ | 24 | 14 | 6 | 2 | 4 | 12 | 1 | 0 |
| $y_f$ | 23 | 10 | 4 | 5 | 0 | 15 | 0 | 0 |
| $y_g$ | 15 | 10 | 2 | 4 | 14 | 13 | 0 | 0 |
| $y_h$ | 10 | 9 | 1 | 3 | 16 | 14 | 0 | 1 |

5.128 (c) Memoria de frecuencia después de aplicar TS.

| **de** \ **e** | $x_a$ | $x_b$ | $x_c$ | $x_d$ | $x_e$ | $x_f$ | $x_g$ | $x_h$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $y_a$ | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| $y_b$ | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| $y_c$ | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| $y_d$ | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $y_e$ | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $y_f$ | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| $y_g$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| $y_h$ | 0 | 0 | 1. | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 |

5.128 (d) Memoria explicita después de aplicar TS

**Figura 5.128** Funciones de membresía resultantes correspondientes a la figura 5.127 después de aplicar TS por el criterio de alta influencia con:

$\Delta e$ = **0.001**, $\Delta de$=**0.0001**
Tipo de línea de transmisión: *larga*
Criterio de aspiración: *Alta influencia*
No. de ciclos de duración de la falla: *3 ciclos*
$\theta$ = **57.19º**, $v_T$ = **1 p.u**.

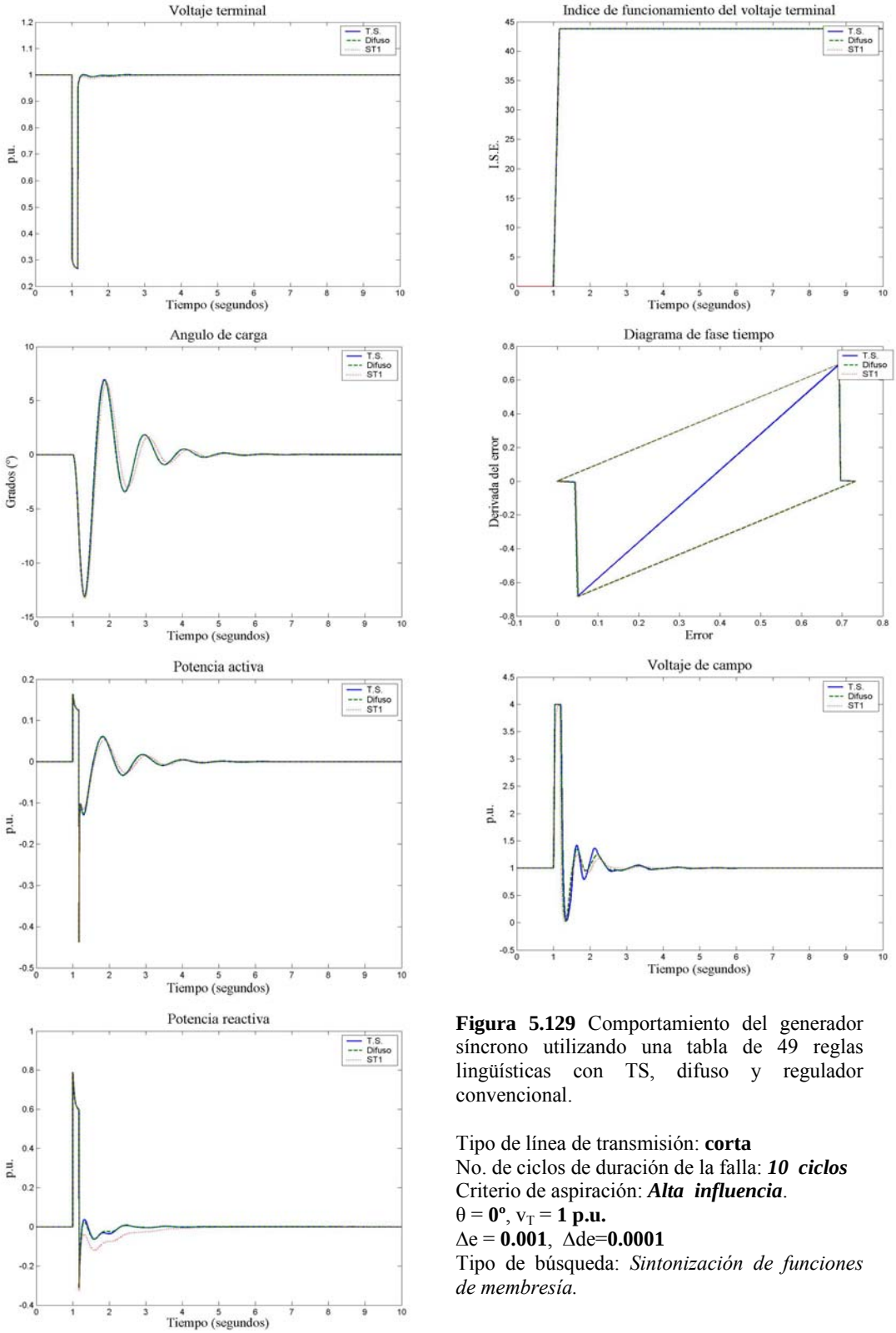



**Figura 5.129** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: **corta**
No. de ciclos de duración de la falla: ***10 ciclos***
Criterio de aspiración: ***Alta influencia***.
$\theta$ = **0º**, $v_T$ = **1 p.u.**
$\Delta e$ = **0.001**, $\Delta de$=**0.0001**
Tipo de búsqueda: *Sintonización de funciones de membresía.*

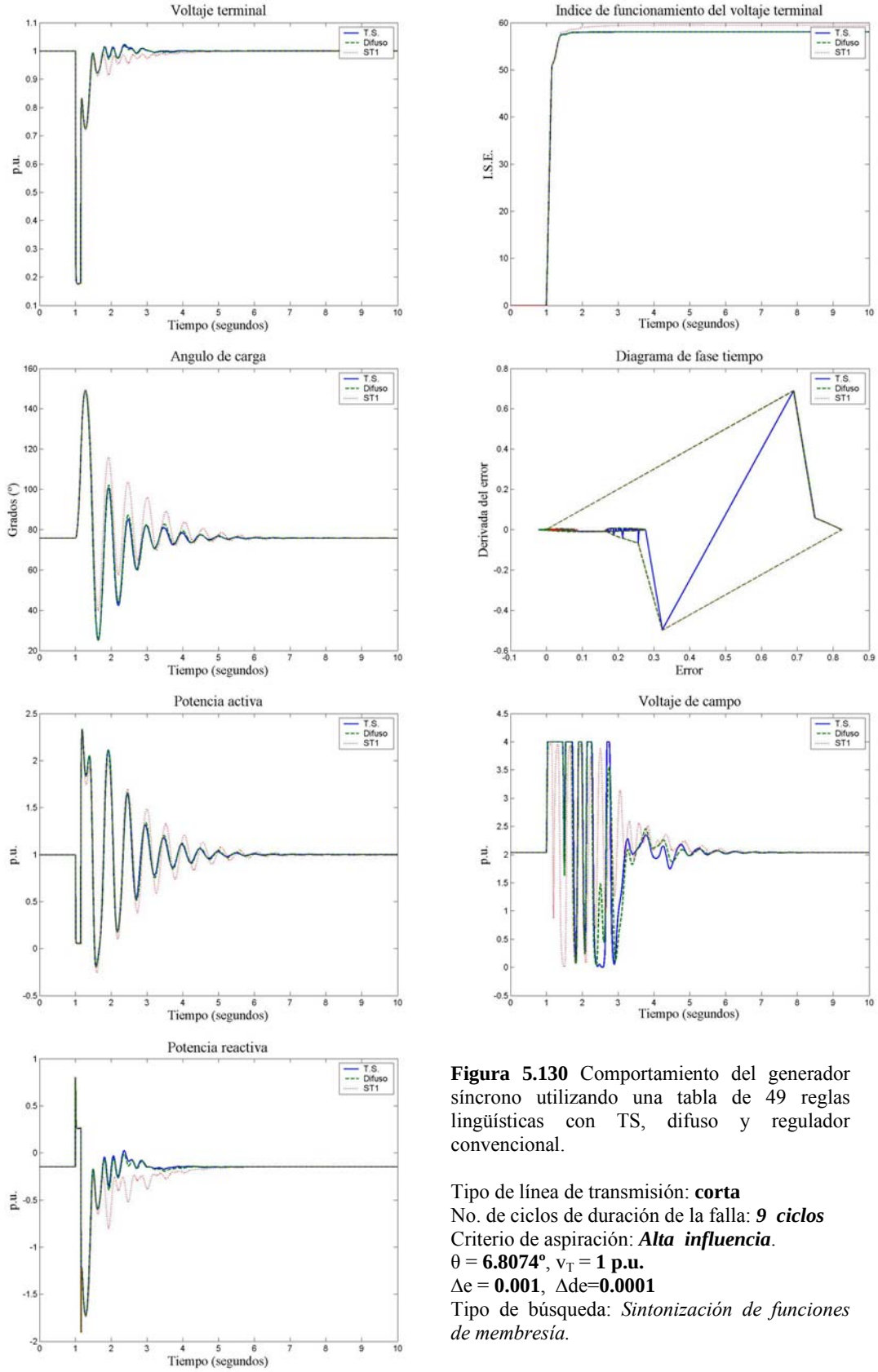



**Figura 5.130** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: **corta**
No. de ciclos de duración de la falla: ***9 ciclos***
Criterio de aspiración: ***Alta influencia***.
$\theta$ = **6.8074º**, $v_T$ = **1 p.u.**
$\Delta e$ = **0.001**, $\Delta de$=**0.0001**
Tipo de búsqueda: *Sintonización de funciones de membresía.*

### *5.5.5 RESULTADOS OBTENIDOS DESPUÉS DE REALIZAR UNA PRUEBA DE AUTOSINTONIZACIÓN SOBRE 7 FUNCIONES DE MEMBRESÍA UTILIZANDO UNA BÚSQUEDA POR TABÚ POR EL CRITERIO DE BAJA INFLUENCIA CON UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN LARGA Y CORTA.*

#### *5.5.5.1 INTRODUCCIÓN.*

Durante esta sección se presentan todos aquellos resultados correspondientes a la prueba realizada a la sintonización de funciones de membresía por el criterio de baja influencia simulando una falla de corto circuito en el bus durante un intervalo de n ciclos de duración, donde los parámetros empleados durante la prueba son:

Tipo de línea de transmisión: Corta y larga

Tipo de búsqueda: Lateral.

Criterio de aspiración: Baja Influencia.

Periodo de término a corto plazo: 0.125 segundos.

Periodo de largo plazo: 0.24 segundos.

Tabú-elemento eliminado: 1 segundos.

Tabú elemento sumado: 0.125 segundos.

Incremento del error para búsqueda ($\Delta e$): 0.001 unidades

Incremento de la derivada error para búsqueda ($\Delta de$): 0.0001 unidades

En esta sección se presentan también las estructuras encontradas referentes a la memoria de frecuencia, intervalos finales de las funciones de membresía y memoria explicita. Los intervalos presentados son aquellos construidos hasta el momento del tiempo final de la simulación.

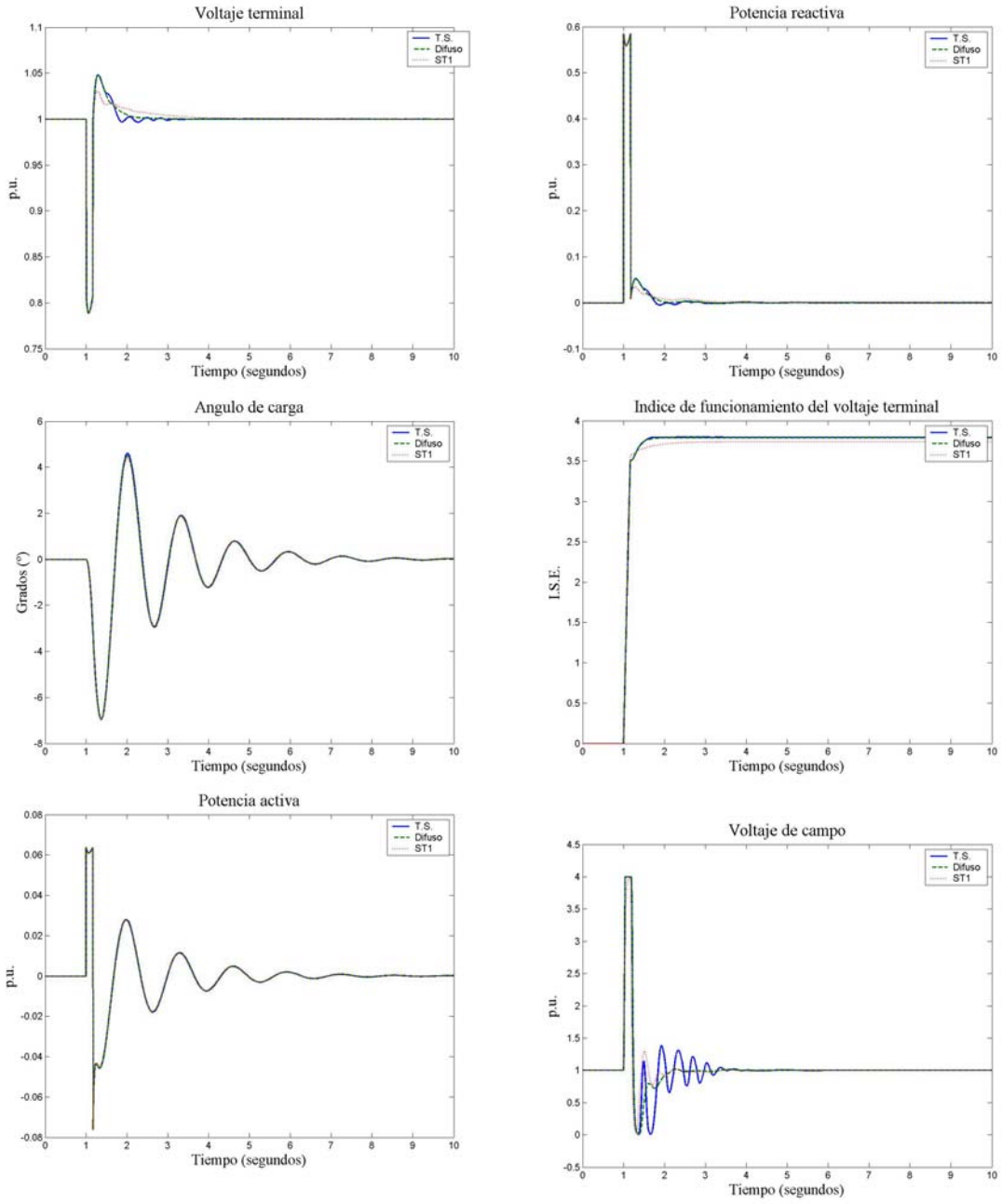
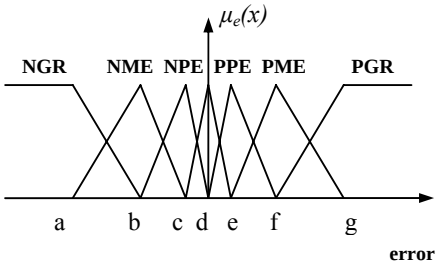


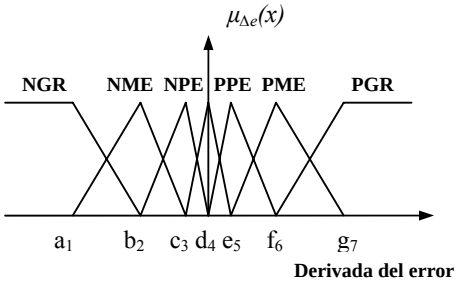

**Figura 5.131** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: *10 ciclos*
Criterio de aspiración: *Baja influencia*.
$\theta$ = **0º**, $v_T$ = **1 p.u.**
$\Delta e$ = **0.001**, $\Delta de$=**0.0001**

A continuación se muestran en la figura 5.132 las funciones de membresía resultantes y las estructuras asociadas a la búsqueda de la figura 5.131:




5.132 (a) Funciones de membresía del error.




5.132 (b) Funciones de membresía de la derivada del error.

a = -0.12, b = -0.005, c = -0.0035, d = 0, e = 0.0035, f = 0.005, g = 0.12
$a_1$ = -0.001, $b_2$ = -0.0007, $c_3$= -0.0004, $e_4$= 0, $d_5$ = 0.0004, $f_6$ = 0.0007, $g_7$ = 0.001

| **de** \ **e** | $x_a$ | $x_b$ | $x_c$ | $x_d$ | $x_e$ | $x_f$ | $x_g$ | $x_h$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $y_a$ | 10 | 10 | 20 | 7 | 2 | 1 | 0 | 0 |
| $y_b$ | 12 | 9 | 5 | 7 | 2 | 1 | 0 | 0 |
| $y_c$ | 13 | 9 | 6 | 5 | 2 | 2 | 0 | 0 |
| $y_d$ | 14 | 12 | 7 | 6 | 3 | 7 | 0 | 0 |
| $y_e$ | 14 | 11 | 8 | 4 | 1 | 6 | 0 | 1 |
| $y_f$ | 24 | 14 | 9 | 3 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| $y_g$ | 7 | 16 | 6 | 1 | 0 | 0 | 1 | 3 |
| $y_h$ | 9 | 17 | 7 | 1 | 1 | 1 | 1 | 3 |

5.132 (c) Memoria de frecuencia después de aplicar TS.

| **de** \ **e** | $x_a$ | $x_b$ | $x_c$ | $x_d$ | $x_e$ | $x_f$ | $x_g$ | $x_h$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $y_a$ | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| $y_b$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $y_c$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $y_d$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $y_e$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $y_f$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $y_g$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $y_h$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

5.132 (d) Memoria explicita después de aplicar TS

**Figura 5.132** Funciones de membresía resultantes correspondientes a la figura 5.131 después de aplicar TS con los siguientes datos:

$\Delta e$ = **0.001**, $\Delta de$=**0.0001**
Tipo de línea de transmisión: **larga**
Criterio de aspiración: ***Baja***
No. de ciclos de duración de la falla: ***10 ciclos***
$\theta$ = **0º**, $v_T$ = **1 p.u**.

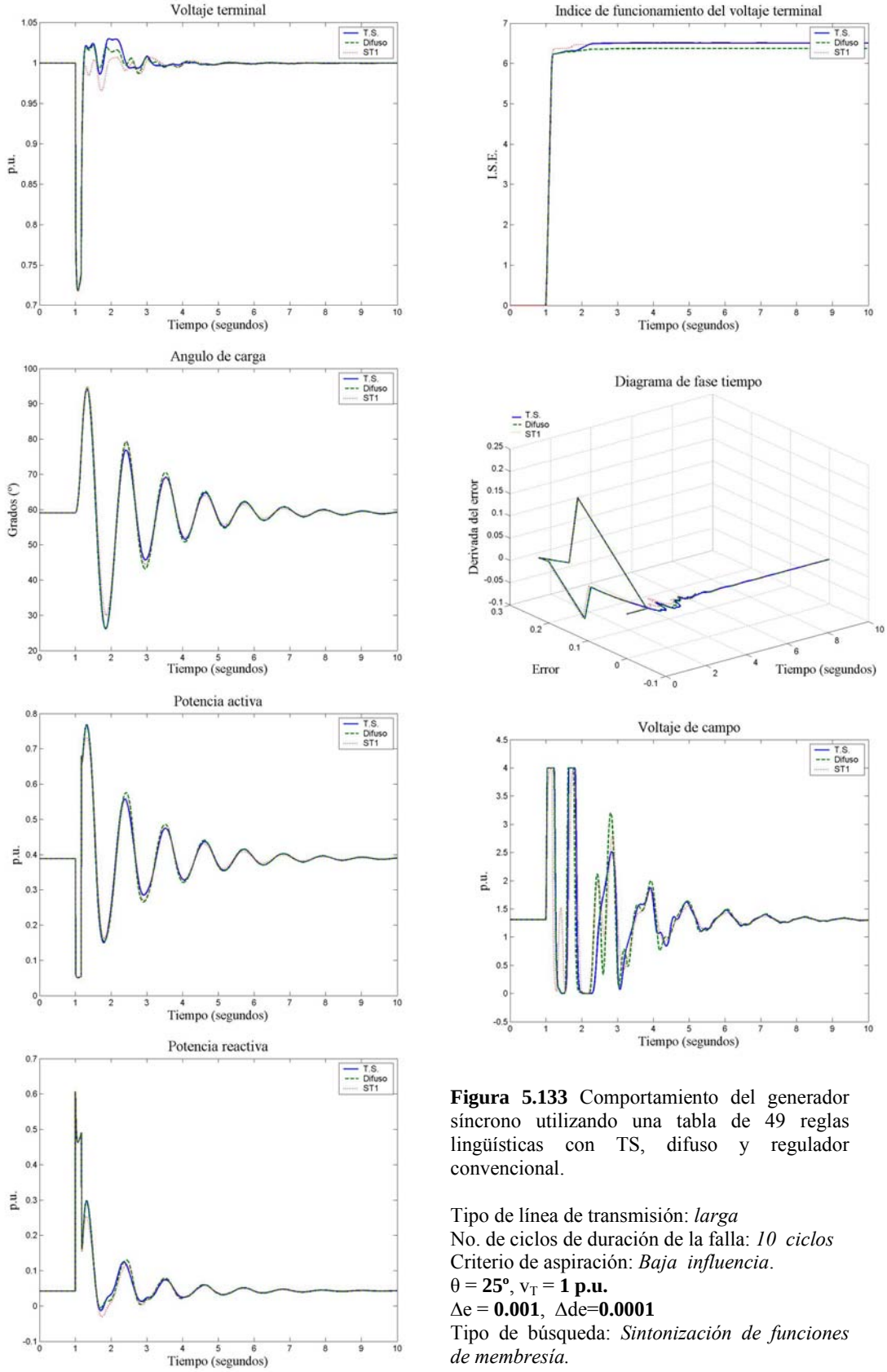



**Figura 5.133** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: *10 ciclos*
Criterio de aspiración: *Baja influencia*.
$\theta$ = **25º**, $v_T$ = **1 p.u.**
$\Delta e$ = **0.001**, $\Delta de$=**0.0001**
Tipo de búsqueda: *Sintonización de funciones de membresía.*

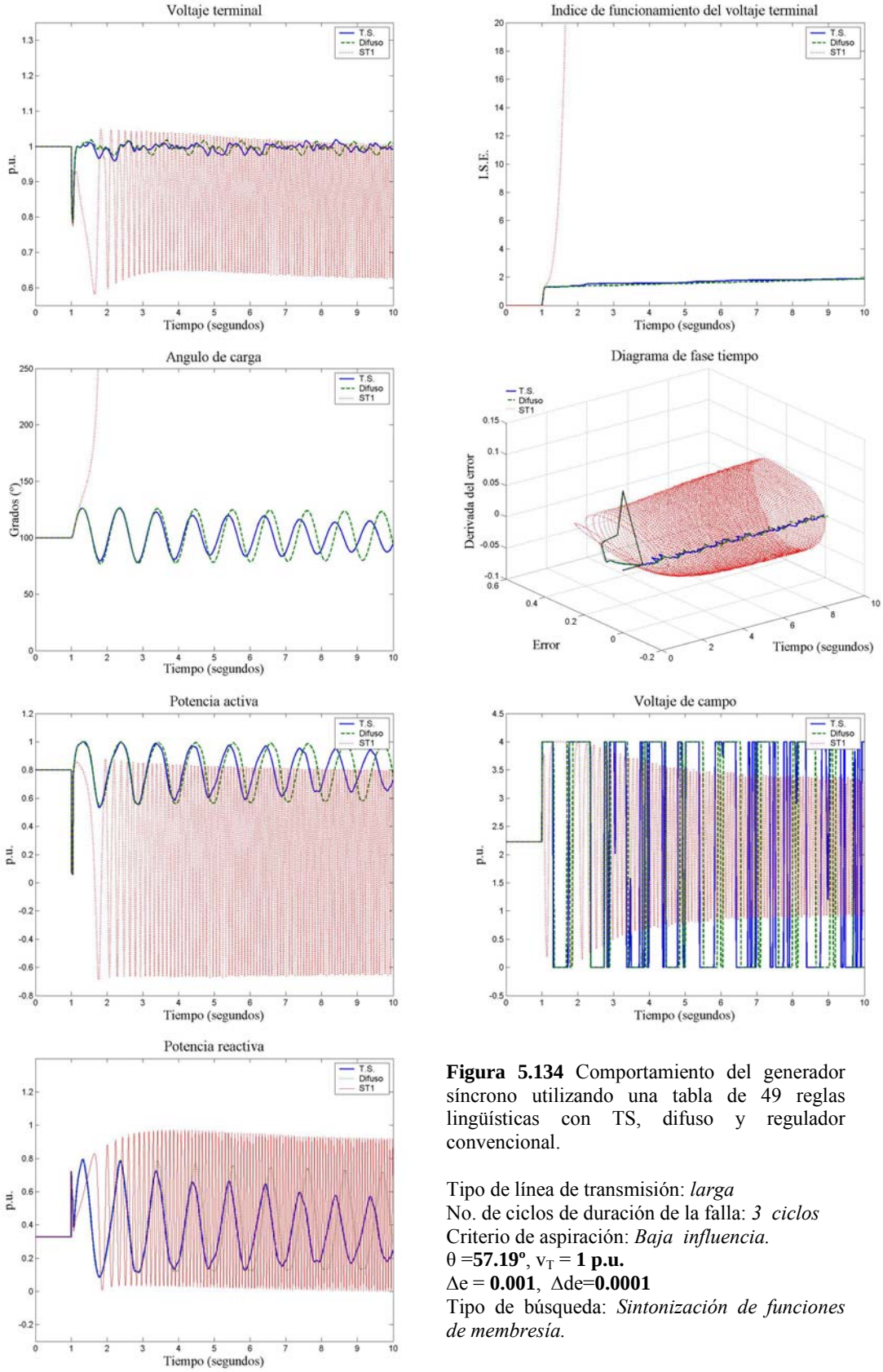
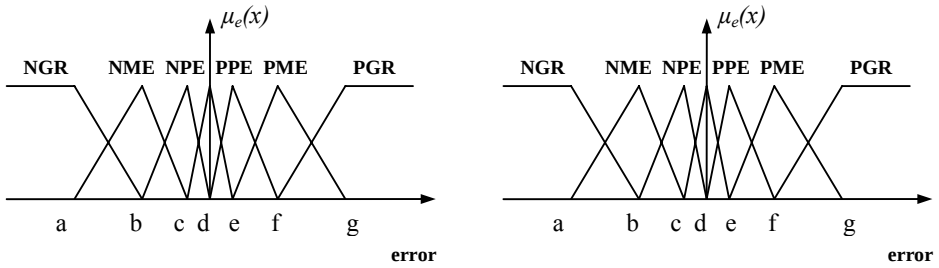


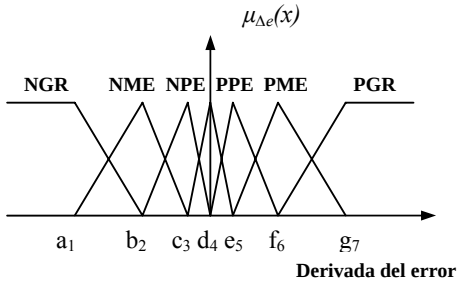

**Figura 5.134** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: *3 ciclos*
Criterio de aspiración: *Baja influencia.*
$\theta$ =**57.19º**, $v_T$ = **1 p.u.**
$\Delta e$ = **0.001**, $\Delta de$=**0.0001**
Tipo de búsqueda: *Sintonización de funciones de membresía.*

A continuación se muestran en la figura 5.135 las funciones de membresía resultantes y las estructuras asociadas a la búsqueda de la figura 5.134:




135 (a) Funciones de membresía del error.




135 (b) Funciones de membresía de la derivada del error.

a =-0.121, b =-0.0051, c =-0.0036, d = 0, e = 0.0036, f = 0.0053, g = 0.121
$a_1$ = -0.0014, $b_2$ = -0.0012, $c_3$= -0.0009, $e_4$= 0, $d_5$= 0.00095, $f_6$= 0.0012, $g_7$= 0.00145

| **de** \| **e** | $x_a$ | $x_b$ | $x_c$ | $x_d$ | $x_e$ | $x_f$ | $x_g$ | $x_h$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $y_a$ | 6 | 2 | 3 | 3 | 1 | 1 | 7 | 7 |
| $y_b$ | 10 | 1 | 1 | 5 | 6 | 3 | 10 | 2 |
| $y_c$ | 10 | 24 | 2 | 2 | 8 | 0 | 5 | 0 |
| $y_d$ | 1 | 6 | 3 | 3 | 3 | 0 | 4 | 0 |
| $y_e$ | 1 | 5 | 4 | 4 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| $y_f$ | 2 | 11 | 3 | 1 | 13 | 1 | 1 | 0 |
| $y_g$ | 5 | 14 | 7 | 1 | 11 | 2 | 1 | 1 |
| $y_h$ | 10 | 9 | 0 | 1 | 10 | 2 | 1 | 1 |

5.135(c) Memoria de frecuencia después de aplicar TS.

| **de** \| **e** | $x_a$ | $x_b$ | $x_c$ | $x_d$ | $x_e$ | $x_f$ | $x_g$ | $x_h$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $y_a$ | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| $y_b$ | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| $y_c$ | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| $y_d$ | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| $y_e$ | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| $y_f$ | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| $y_g$ | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| $y_h$ | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |

5.135 (d) Memoria explicita después de aplicar TS

**Figura 5.135** Funciones de membresía resultantes correspondientes a la figura 5.134 después de aplicar TS por el criterio de alta influencia con:
$\Delta e$ = **0.001**, $\Delta de$=**0.0001**
Tipo de línea de transmisión: *larga*
Criterio de aspiración: *Baja influencia*
No. de ciclos de duración de la falla: *3 ciclos*
$\theta$ = **57.19º**, $v_T$ = **1 p.u**.

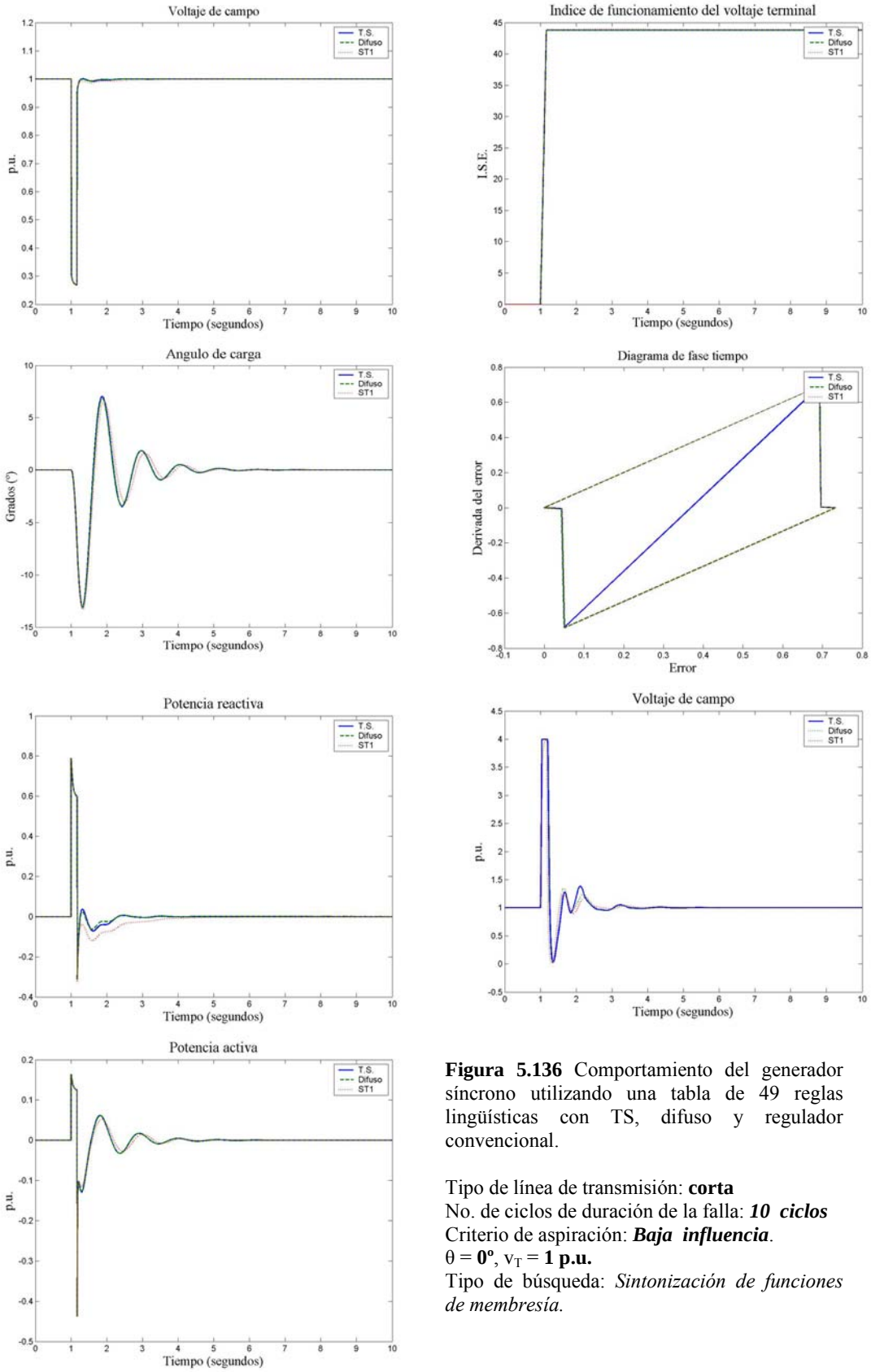



**Figura 5.136** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: **corta**
No. de ciclos de duración de la falla: ***10 ciclos***
Criterio de aspiración: ***Baja influencia***.
$\theta$ = **0º**, $v_T$ = **1 p.u.**
Tipo de búsqueda: *Sintonización de funciones de membresía.*

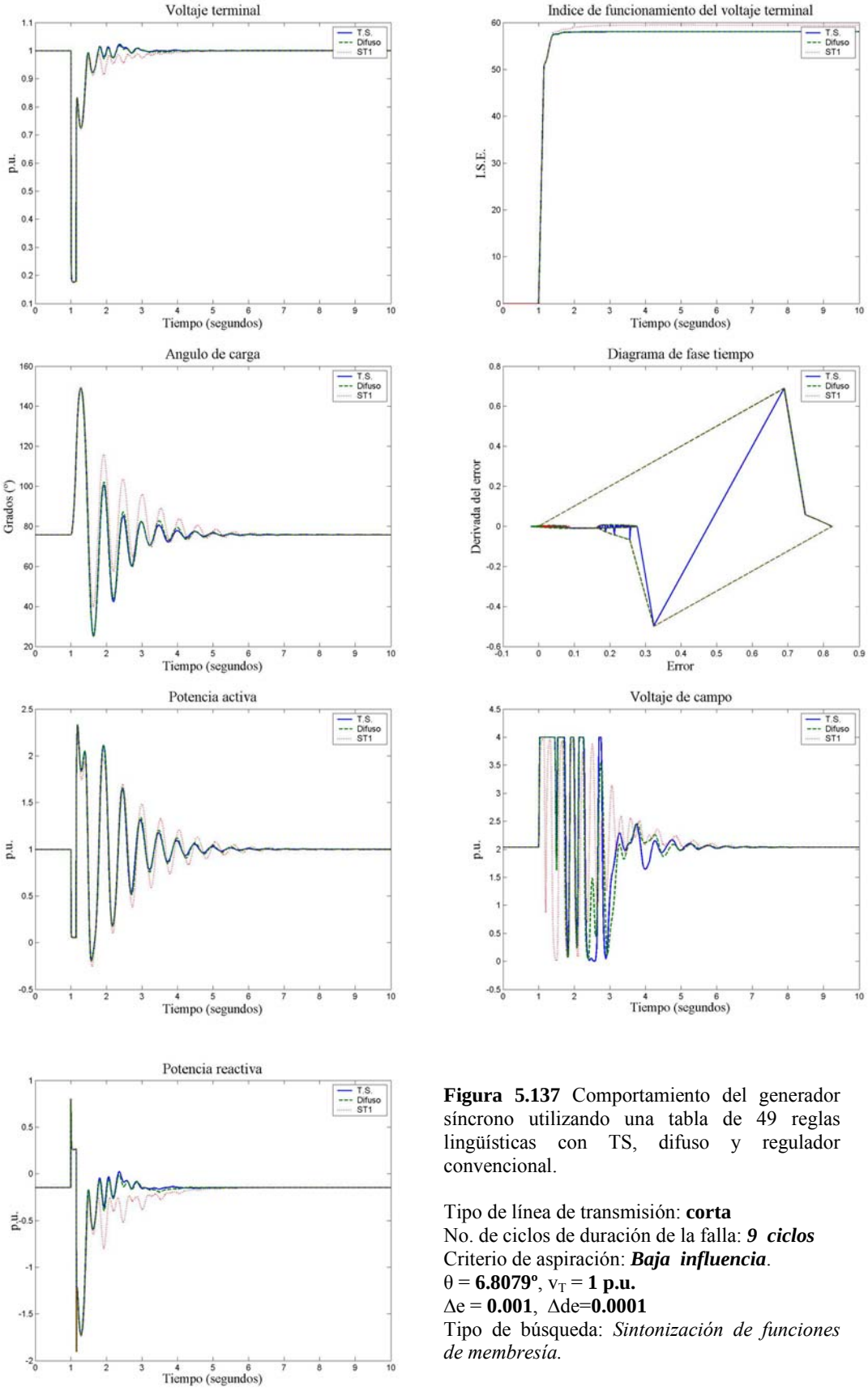
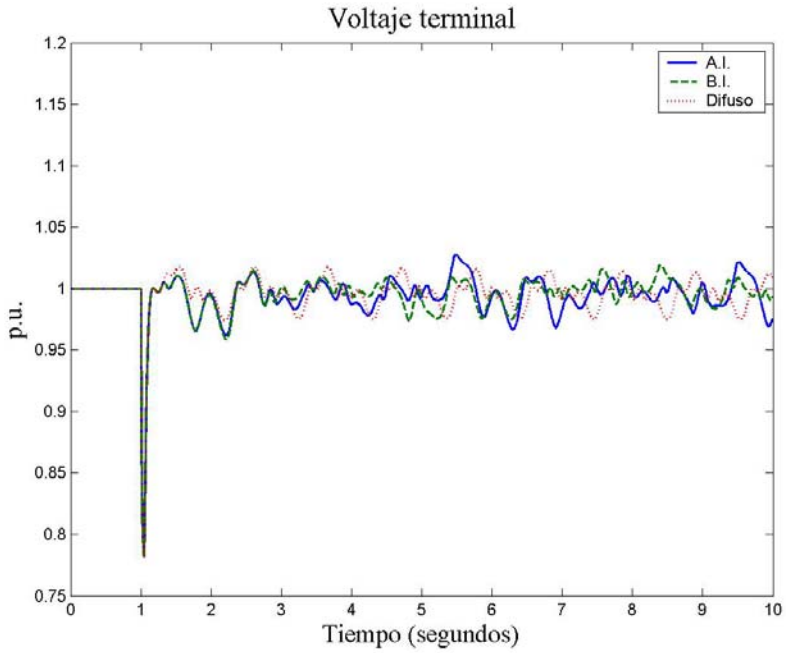



**Figura 5.137** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con TS, difuso y regulador convencional.

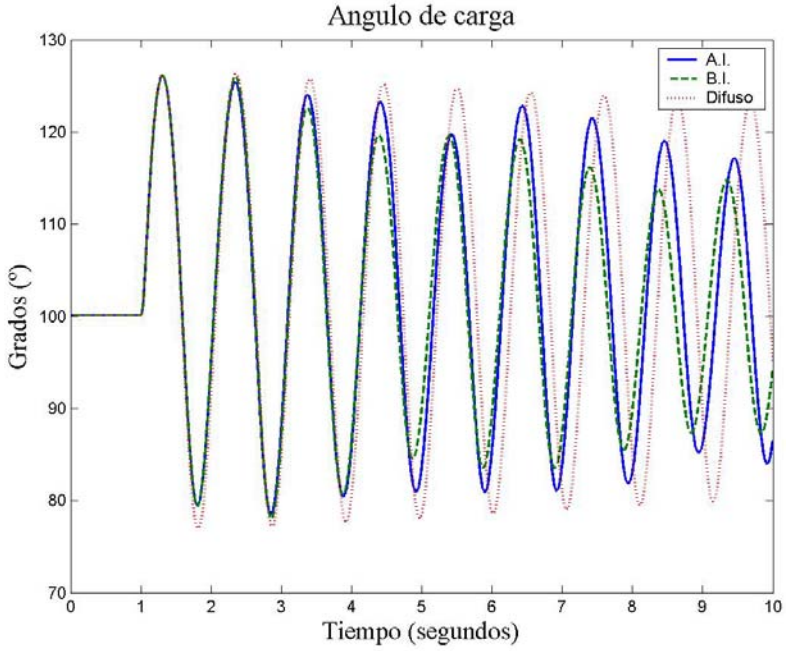
Tipo de línea de transmisión: **corta**
No. de ciclos de duración de la falla: ***9 ciclos***
Criterio de aspiración: ***Baja influencia***.
$\theta$ = **6.8079º**, $v_T$ = **1 p.u.**
$\Delta e$ = **0.001**, $\Delta de$=**0.0001**
Tipo de búsqueda: *Sintonización de funciones de membresía.*

### *5.5.6 ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL CRITERIO DE ALTA INFLUENCIA Y EL CRITERIO DE BAJA INFLUENCIA.*

Tal como se planteo el criterio de alta influencia y baja influencia para la tabla de reglas lingüísticas de igual forma se plantea para la sintonización de las funciones de membresía; cada criterio establece cuál es el umbral de calidad según las características trazadas para cada solución x', la ventaja que tiene el criterio de baja influencia sobre el criterio de alta influencia es poder recordar la frecuencia de un elemento y respetar dichas características, durante la sección 5.5 se presento la sintonización sobre 5 y 7 funciones de membresía y se muestra que no existe diferencia entre un criterio y otro cuando la máquina no tiene mucha carga debido a que el voltaje en terminales es ya el valor de referencia pocos instantes después de la liberación de la falla. En las figuras 5.101, 5.112 y 5.127, 5.134 se presenta el comportamiento del voltaje en terminales cuando la potencia activa es de 0.78 p.u. y se observa que los intervalos encontrados por el criterio de alta influencia y baja influencia son similares pero existe una pequeña diferencia que se debe al registro de cada una de las cualidades de cada uno de los elementos x' visitados durante la búsqueda establecidas por el criterio de baja influencia, esta cualidad se ve claramente en la memoria de frecuencia de la figura 5.101 (c) y 5.134 (c) y en la memoria explícita de las figuras 5.101 (d) y 5.134 (d); al comienzo de la simulación después de la liberación de la falla ambos criterios establecen las mismas rutas de solución y se ve reflejado en el comportamiento del voltaje en terminales, unos instantes después cada criterio en base a la historia de la búsqueda y en base al umbral establecido el voltaje en terminales continúa por rutas diferentes, esta característica se puede observar en la figura 5.138 (a) y 5.138 (b).




5.138 (a) Comportamiento del voltaje en terminales utilizando 7 funciones de membresía cuando $\theta = 57.19^{o}$, $v_T = 1$ p.u. y una duración de la falla de 3 ciclos.




5.138 (b) Comportamiento del ángulo de carga.

**Figura 5.138** Criterio de alta influencia vs. Criterio de baja influencia.

Tal como se observa en la figura 5.135 (a) y (b) el voltaje en terminales y el ángulo de carga son iguales para el criterio de alta y baja influencia cuando t ≈ 3 segundos, después de este tiempo cada criterio conduce al voltaje en terminales y al ángulo de carga por rutas distintas; cuando la simulación comienza la memoria de frecuencia, base elemento-sumado, base elemento-eliminado y memoria explícita se encuentran en cero, tal como se muestra en la figura 5.136 (a) y (b).

| **de** / **e** | $x_a$ | $x_b$ | $x_c$ | $x_d$ | $x_e$ | $x_f$ | $x_g$ | $x_h$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $y_a$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $y_b$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $y_c$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $y_d$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $y_e$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $y_f$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $y_g$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $y_h$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

5.139 (a) Memoria de frecuencia cuando t = 0 segundos.

| **de** / **e** | $x_a$ | $x_b$ | $x_c$ | $x_d$ | $x_e$ | $x_f$ | $x_g$ | $x_h$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $y_a$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $y_b$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $y_c$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $y_d$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $y_e$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $y_f$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $y_g$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $y_h$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

5.139 (b) Memoria explícita cuando t = 0 segundos.

| de \ e | $x_a$ | $x_b$ | $x_c$ | $x_d$ | $x_e$ | $x_f$ | $x_g$ | $x_h$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $y_a$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $y_b$ | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $y_c$ | 5 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $y_d$ | 7 | 0 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $y_e$ | 8 | 0 | 0 | 5 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $y_f$ | 10 | 0 | 0 | 0 | 4 | 0 | 0 | 0 |
| $y_g$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 5 | 0 | 0 | 0 |
| $y_h$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |

5.139 (c) Memoria de frecuencia establecida por el criterio de alta influencia cuando t = 3.2 segundos.

| de \ e | $x_a$ | $x_b$ | $x_c$ | $x_d$ | $x_e$ | $x_f$ | $x_g$ | $x_h$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $y_a$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $y_b$ | 4 | 0 | 0 | 5 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $y_c$ | 5 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $y_d$ | 7 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $y_e$ | 8 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $y_f$ | 16 | 0 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $y_g$ | 3 | 0 | 0 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $y_h$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

5.139 (c) Memoria de frecuencia establecida por el criterio de baja influencia cuando t = 3.2 segundos.

**Figura 5.139** Estructuras auxiliares de la búsqueda por tabú en diferentes puntos del tiempo de la simulación.

Las estructuras mostradas en la figura 5.139 (a) y (b) serán diferentes al termino de la simulación debido a que la característica principal del criterio de alta influencia es seleccionar la mejor solución x' sin tomar en cuenta las características históricas de dicha solución siempre y cuando no exista alguna $x_n$' mejor que x' actual. En las figuras 5.139 (c) y (d) existe ya una diferencia de residencia esto se debe al camino elegido por cada criterio y principalmente a las multas y los incentivos.

Se puede notar durante esta sección que los diversos resultados mostrados cuando el generador no maneja demasiada carga el voltaje en terminales producido por la aplicación del controlador difuso empleando TS por ambos criterios de aspiración son casi idénticos aún cuando el voltaje de campo muestra totalmente lo contrario, esto se debe al modelo de la máquina establecido en p.u. recordando que corresponde a valores reales muy grandes y donde el generador es de una capacidad de 650 MVA.

## *5.6 RESULTADOS OBTENIDOS DESPUÉS DE REALIZAR UNA PRUEBA SOBRE LA SINTONIZACIÓN DE LAS FUNCIONES DE MEMBRESÍA DE UN CONTROL DIFUSO POR MEDIO DE LOS ALGORITMOS GENÉTICOS.*

### *5.6.1 INTRODUCCIÓN.*

En esta sección se presentan los resultados encontrados durante las pruebas de optimización realizadas a las funciones de membresía por medio de los algoritmos genéticos para un controlador difuso tipo proporcional integral para 5 y 7 funciones de membresía empleando 300 y 500 generaciones después de la liberación de la falla cuando la simulación es de 10 segundos y 50000 generaciones cuando la simulación se trata de incremento de carga (simulación aproximada de 150 segundos). Los parámetros empleados para los algoritmos genéticos son:

- No. de generaciones: 300, 500 y 50000
- $\Delta e = 0.001, 0.0001, 0.0008$, $\Delta e = 0.0001, 0.00001$
- Tipo de selección: No elitista (tipo rueda ruleta)
- Punto de mutación: Un punto (aleatorio)
- Tamaño del cromosoma: 6 (12 y 18)
- Tamaño de la población 6 individuos/función de membresía

Acerca del generador síncrono se tiene:

- Simulación en diversos puntos de operación.
- Tipo de línea de transmisión: Corta y larga.

Se realizan dos tipos de pruebas; la primera de ellas es simular el generador observando el comportamiento del voltaje terminal aplicando las técnicas mencionadas en un punto de operación especifico y la segunda prueba es simular el generador desde un punto de vacío (sin carga) hasta llegar un punto de carga observando el comportamiento del generador síncrono.

### *5.6.2 RESULTADOS OBTENIDOS DESPUÉS DE LA APLICACIÓN DE LOS ALGORITMOS GENÉTICOS SOBRE LA SINTONIZACIÓN DE 5 FUNCIONES DE MEMBRESÍA DE UN CONTROLADOR DIFUSO EMPLEANDO UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN LARGA Y CORTA.*

#### *5.6.2.1 INTRODUCCIÓN*

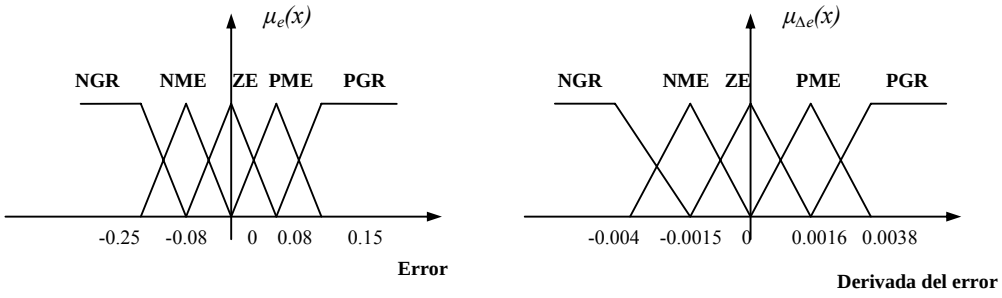
Durante esta sección se mostrarán todos aquellos resultados obtenidos después de sintonizar el universo de discusión de las funciones de membresía empleando los algoritmos genéticos en diversos puntos de operación con una línea de transmisión larga y una línea corta; se pretende establecer los intervalos precisos para cada caso partiendo de los intervalos estáticos establecidos al comienzo para el controlador difuso.

A continuación se muestra en la figura 5.140 los resultados correspondientes a la primera prueba realizada en esta sección los cuales presentan el comportamiento del generador síncrono ante un incremento de carga donde los parámetros para los algoritmos genéticos son los siguientes:

Probabilidad de mutación ($p_m$): ***0.98777***
Probabilidad de cruzamiento ($p_c$): ***0.0123***
No. máximo de generaciones: ***50000***

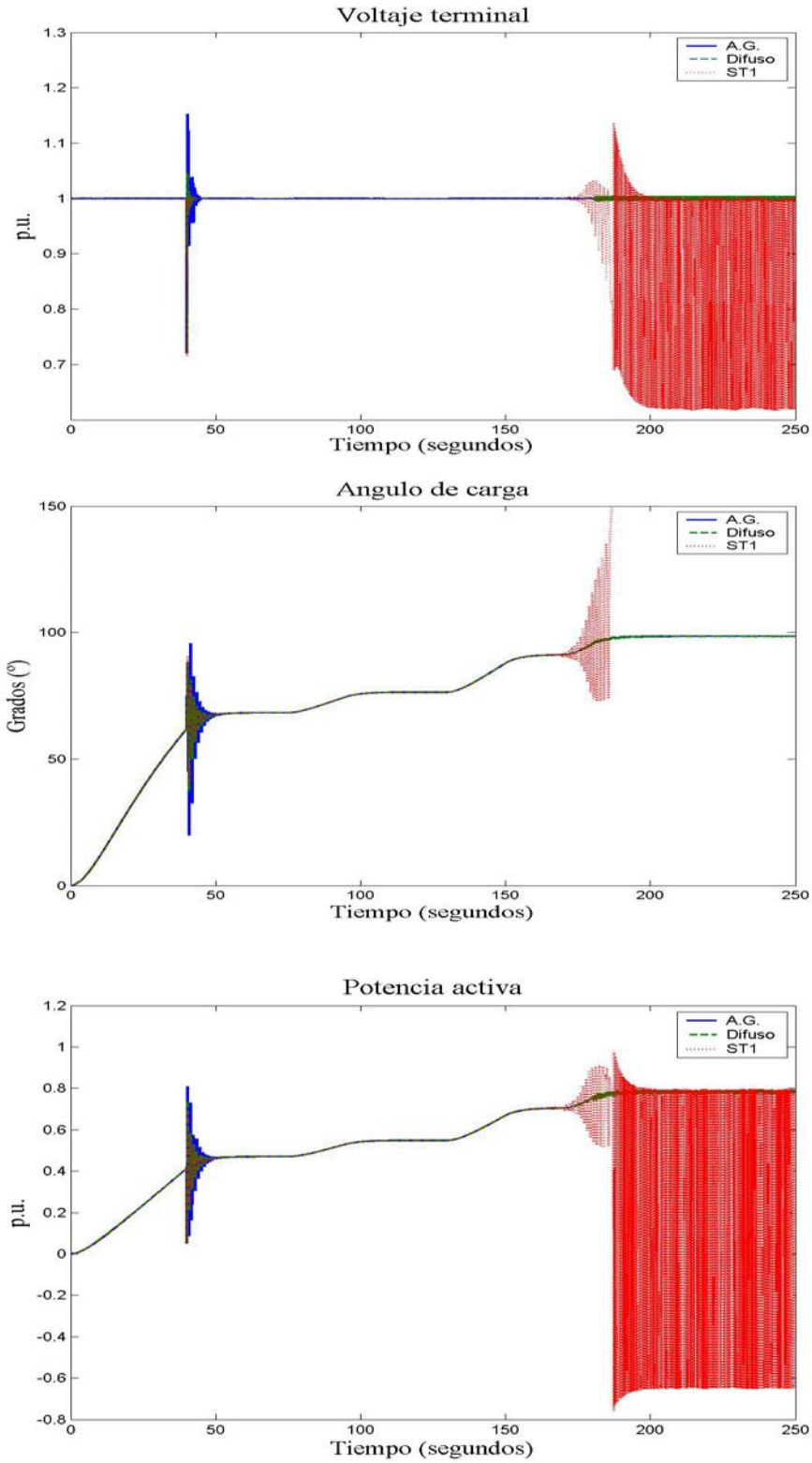
La razón principal por el número elevado es el tiempo de simulación empleado durante los diversos incrementos de carga permitiendo a las siguientes generaciones de funciones de membresía adaptarse más fácilmente a los nuevos ambientes de trabajo (espacios de búsqueda).

Con respecto a los intervalos finales de las funciones de membresía son los siguientes:




5.140 (a) Funciones de membresía finales después de aplicar los algoritmos genéticos con un tipo de selección no elitista tipo rueda ruleta.

La maquina se somete a una falla trifásica en la línea de transmisión con una duración de 7 ciclos cuando t = 40 segundos y el ángulo de carga 55º, el comportamiento del generador se puede observar en la figura 5.140 (b, c, d y e)




5.140 (b). Comportamiento del generador síncrono simulando una falla de 7 ciclos de duración cuando tiempo = 40 segundos con una línea de transmisión larga.

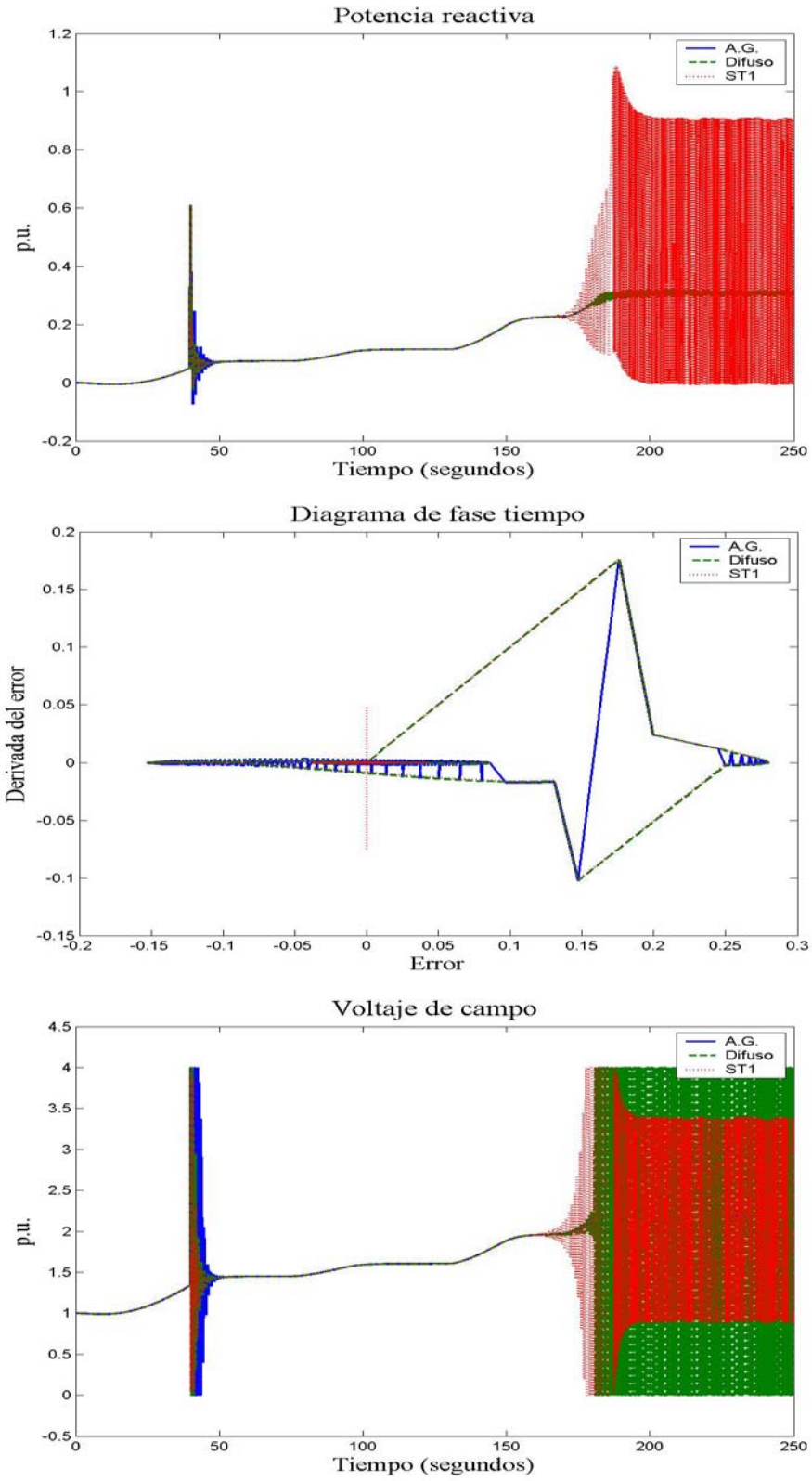
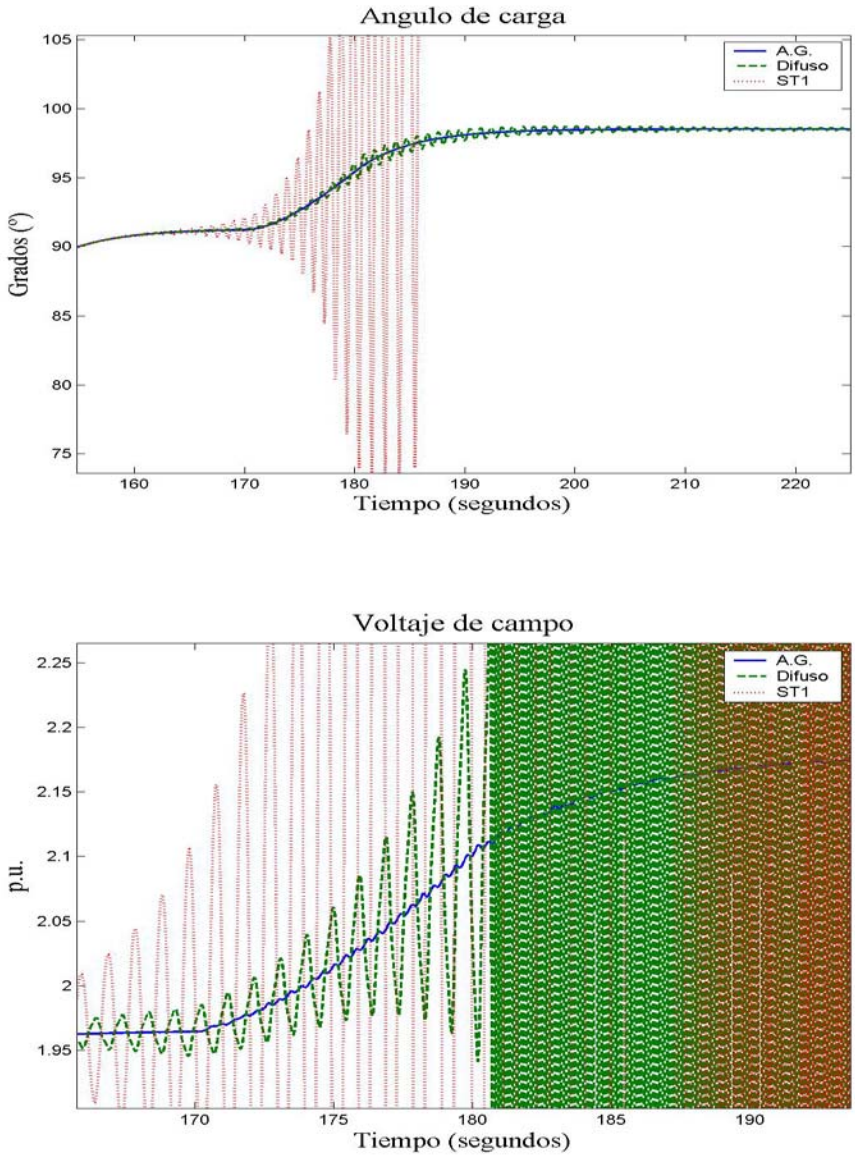
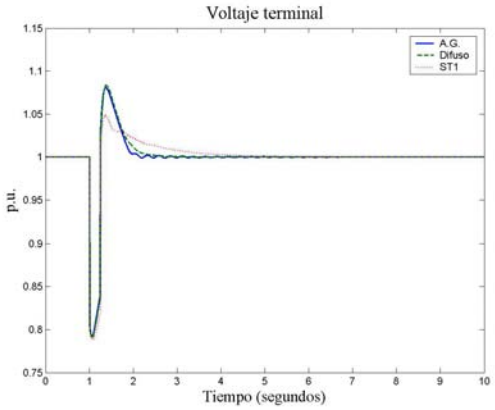


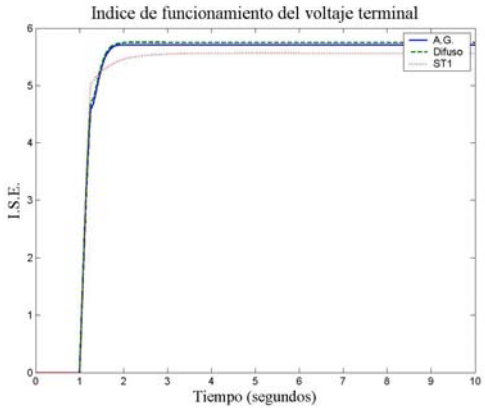

Figura 5.140 (c). Comportamiento del generador empleando 5 funciones de membresía con un número de 50000 generaciones sobre un punto de cruzamiento.

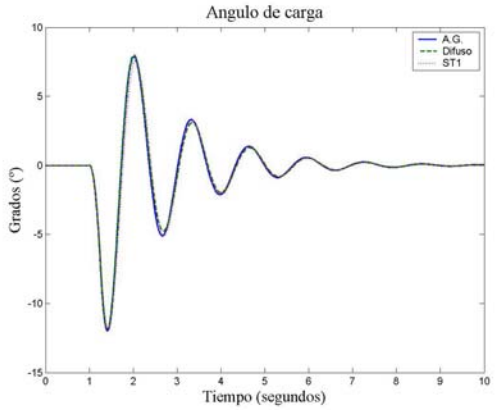


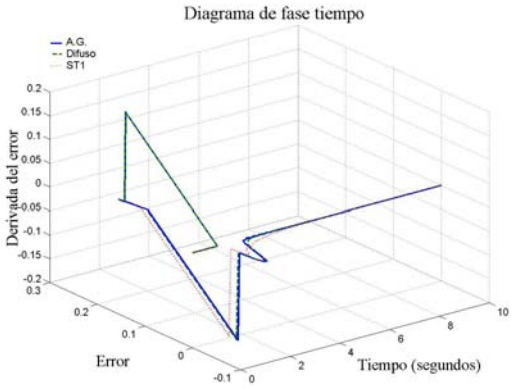

5.140 (d) Acercamiento del comportamiento del voltaje de campo y el ángulo de carga antes de t = 200 segundos.

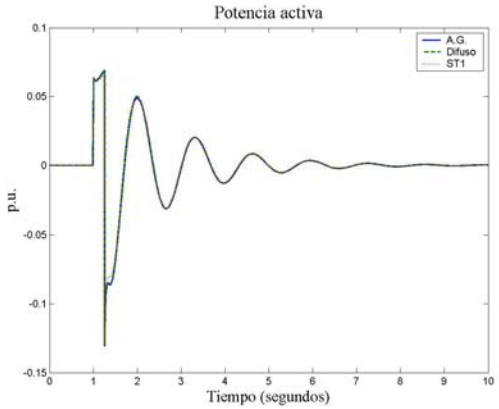
**Figura 5.140**. Comportamiento del generador síncrono con una duración de simulación de 250 segundos comenzando desde vacío hasta un punto de operación donde la potencia activa es igual a 0.775 p.u. y un ángulo de carga de 97º.

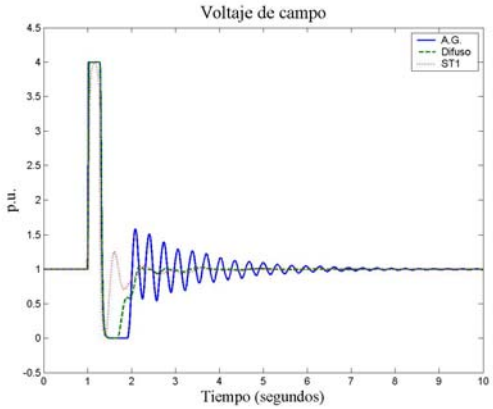


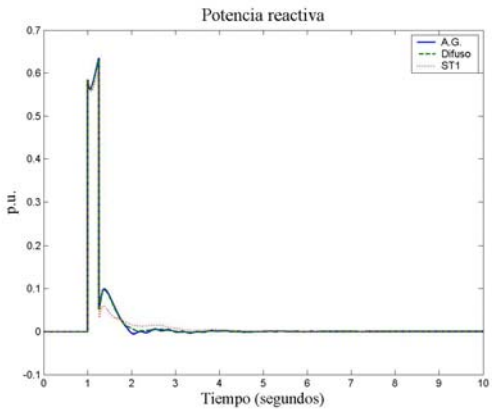




**Figura 5.141** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con AG, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: *15 ciclos*
No. de generaciones: *500*
$\theta$ = **0º**, $v_T$ = **1 p.u.**
$\Delta e$ = 0.01, $\Delta de$= 0.0005

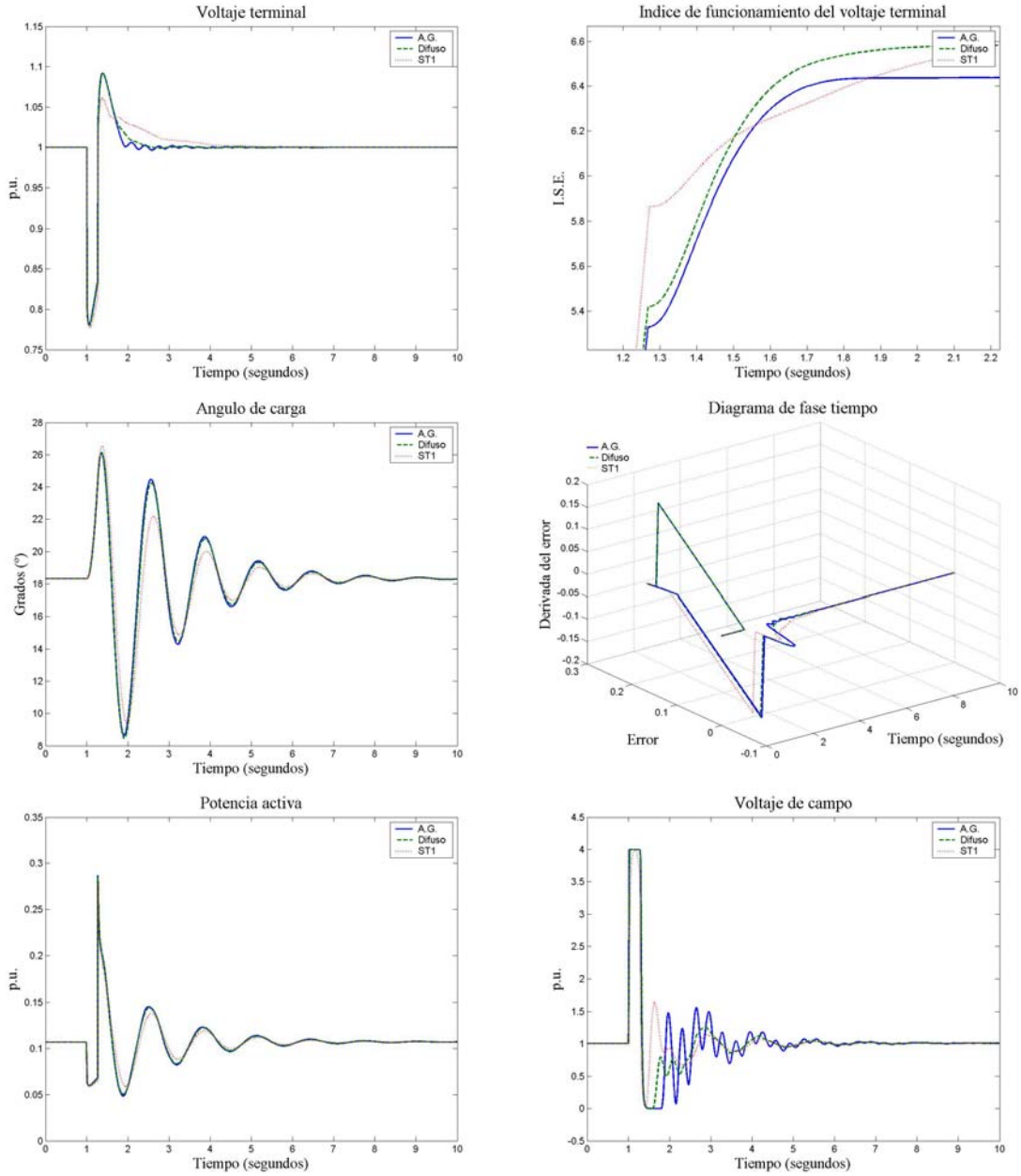



**Figura 5.142** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con AG, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: *15 ciclos*
No. de generaciones: *500*
$\theta$ = **6.8074º**, $v_T$ = **1 p.u.**
$\Delta e = 0.01$, $\Delta de = 0.0005$

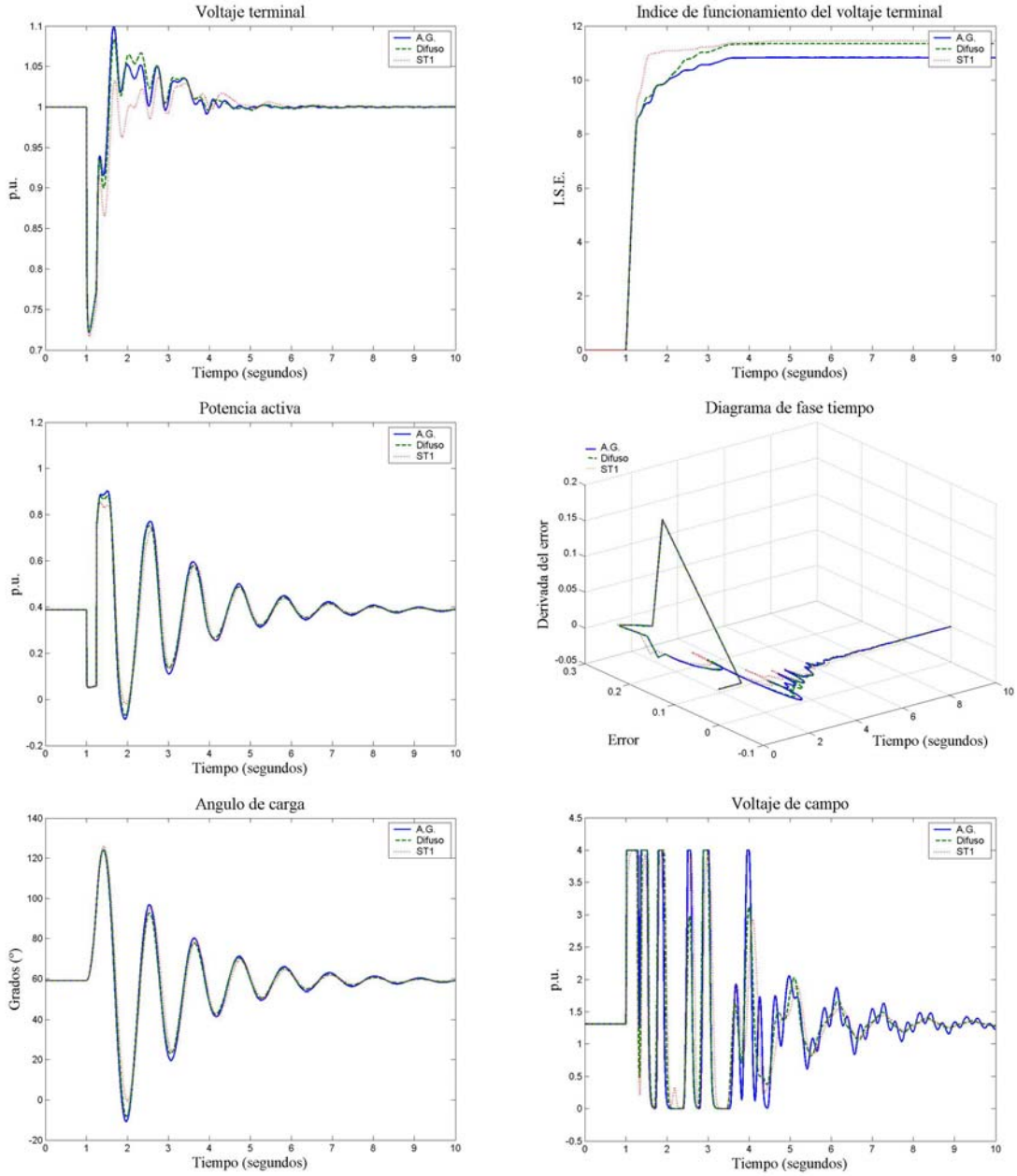



**Figura 5.143** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con AG, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: *10 ciclos*
No. de generaciones: *500*
$\theta$ = **25°**, $v_T$ = **1 p.u.**
$\Delta e = 0.01$, $\Delta de = 0.0005$

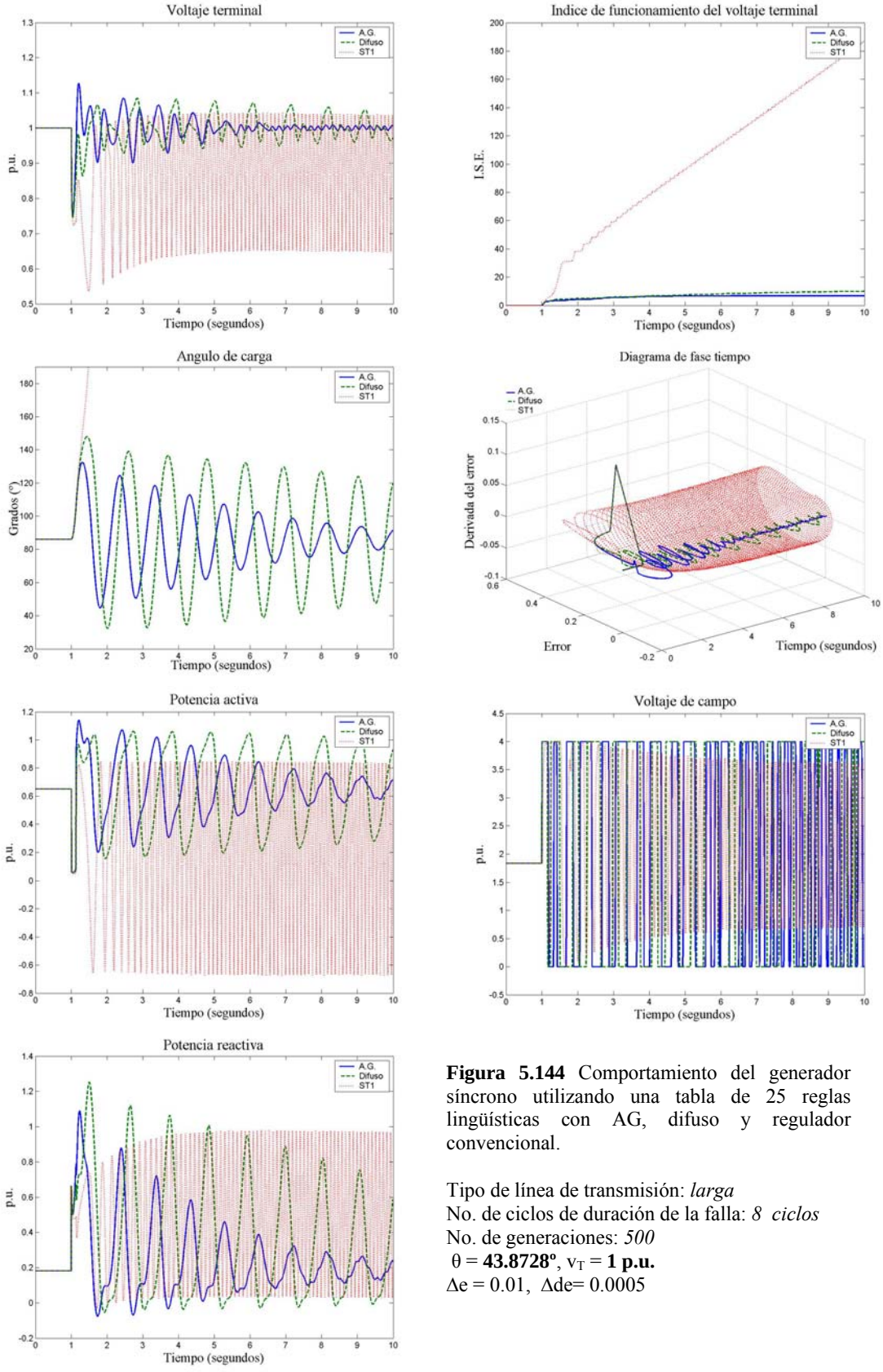



**Figura 5.144** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con AG, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: *8 ciclos*
No. de generaciones: *500*
$\theta$ = **43.8728°**, $v_T$ = **1 p.u.**
$\Delta e$ = 0.01, $\Delta de$= 0.0005

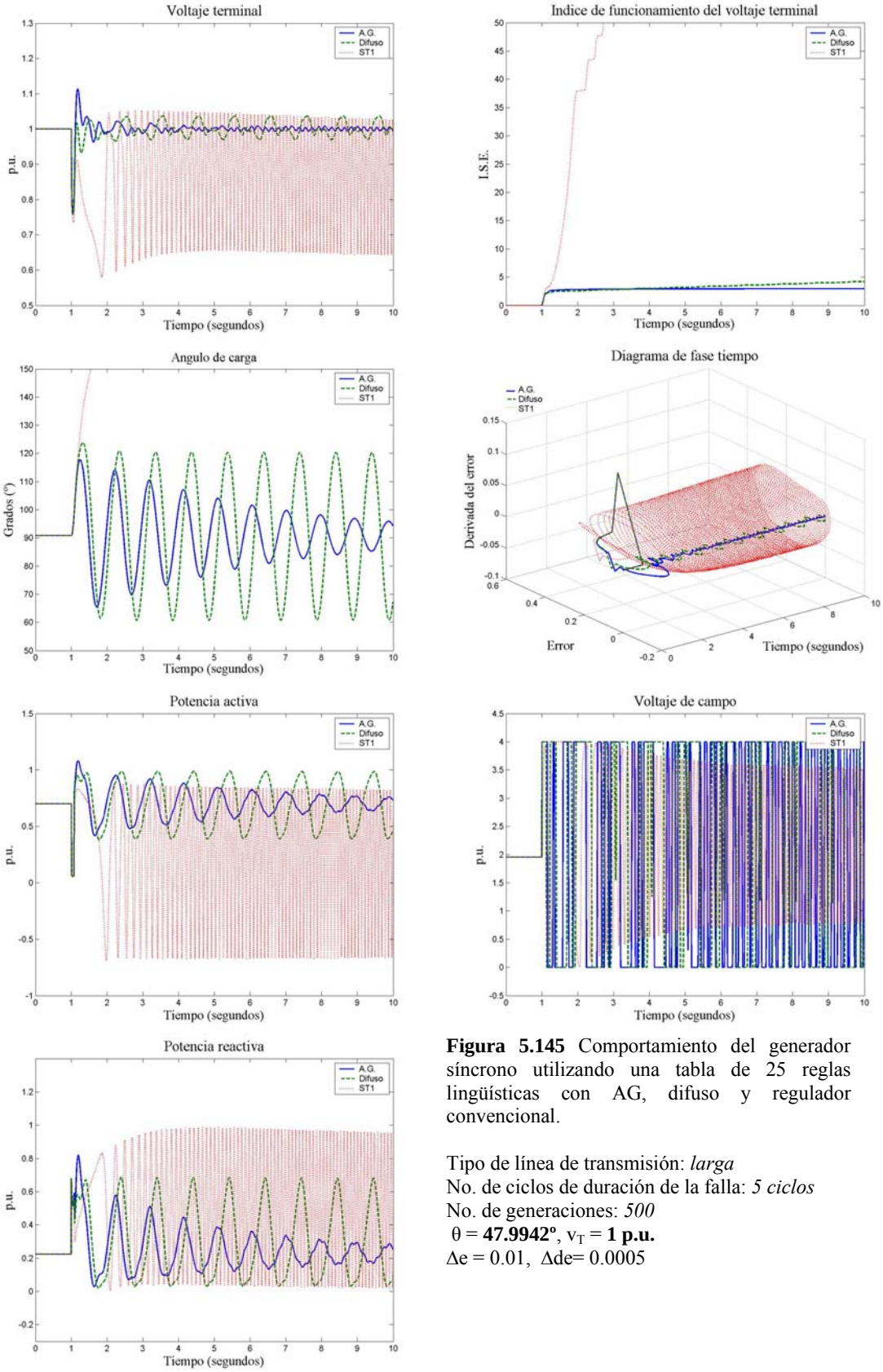



**Figura 5.145** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con AG, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: *5 ciclos*
No. de generaciones: *500*
$\theta$ = **47.9942º**, $v_T$ = **1 p.u.**
$\Delta e$ = 0.01, $\Delta de$= 0.0005

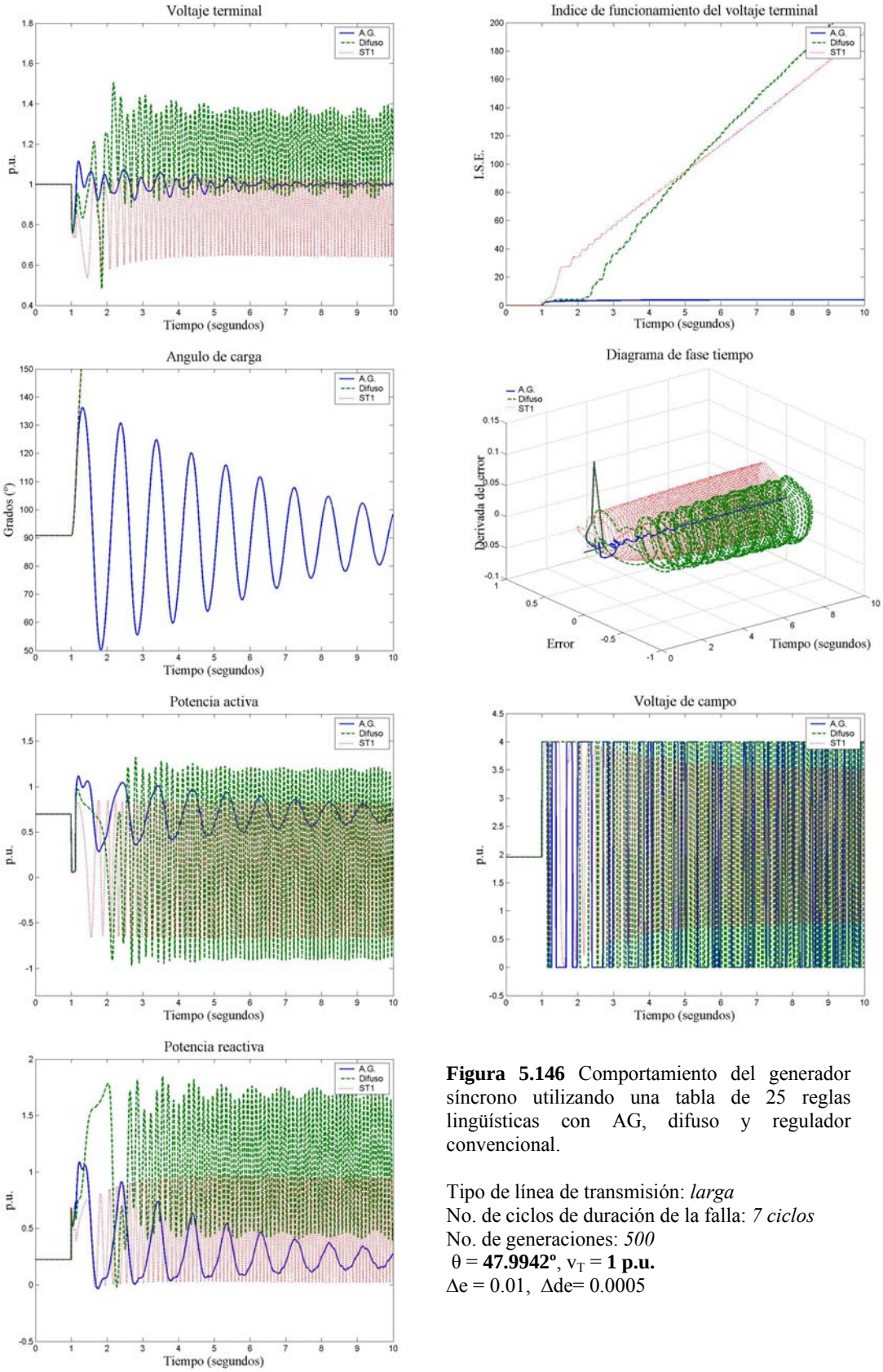



**Figura 5.146** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con AG, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: *7 ciclos*
No. de generaciones: *500*
$\theta$ = **47.9942º**, $v_T$ = **1 p.u.**
$\Delta e$ = 0.01, $\Delta de$= 0.0005

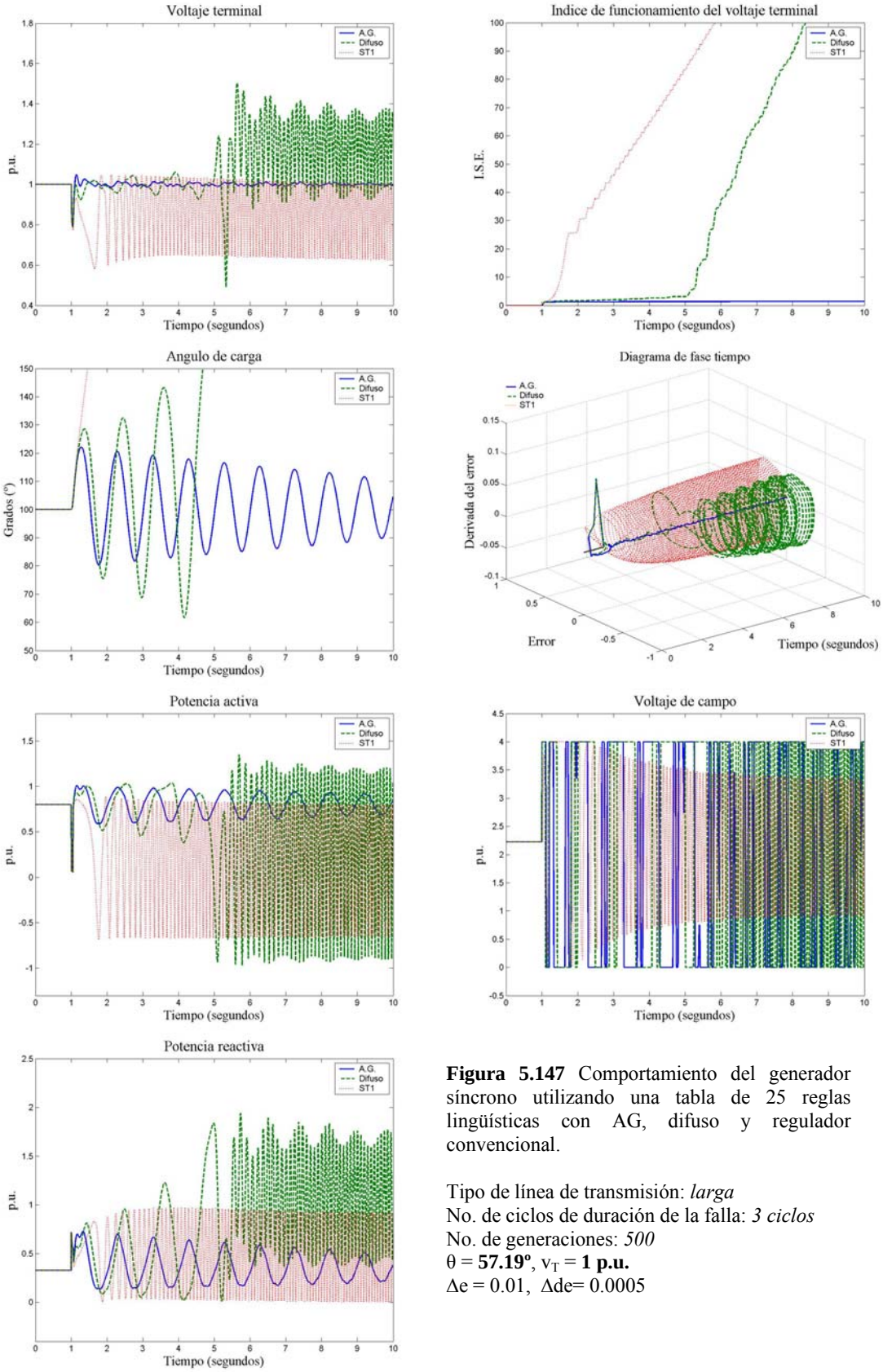



**Figura 5.147** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con AG, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: *3 ciclos*
No. de generaciones: *500*
$\theta$ = **57.19º**, $v_T$ = **1 p.u.**
$\Delta e$ = 0.01, $\Delta de$= 0.0005

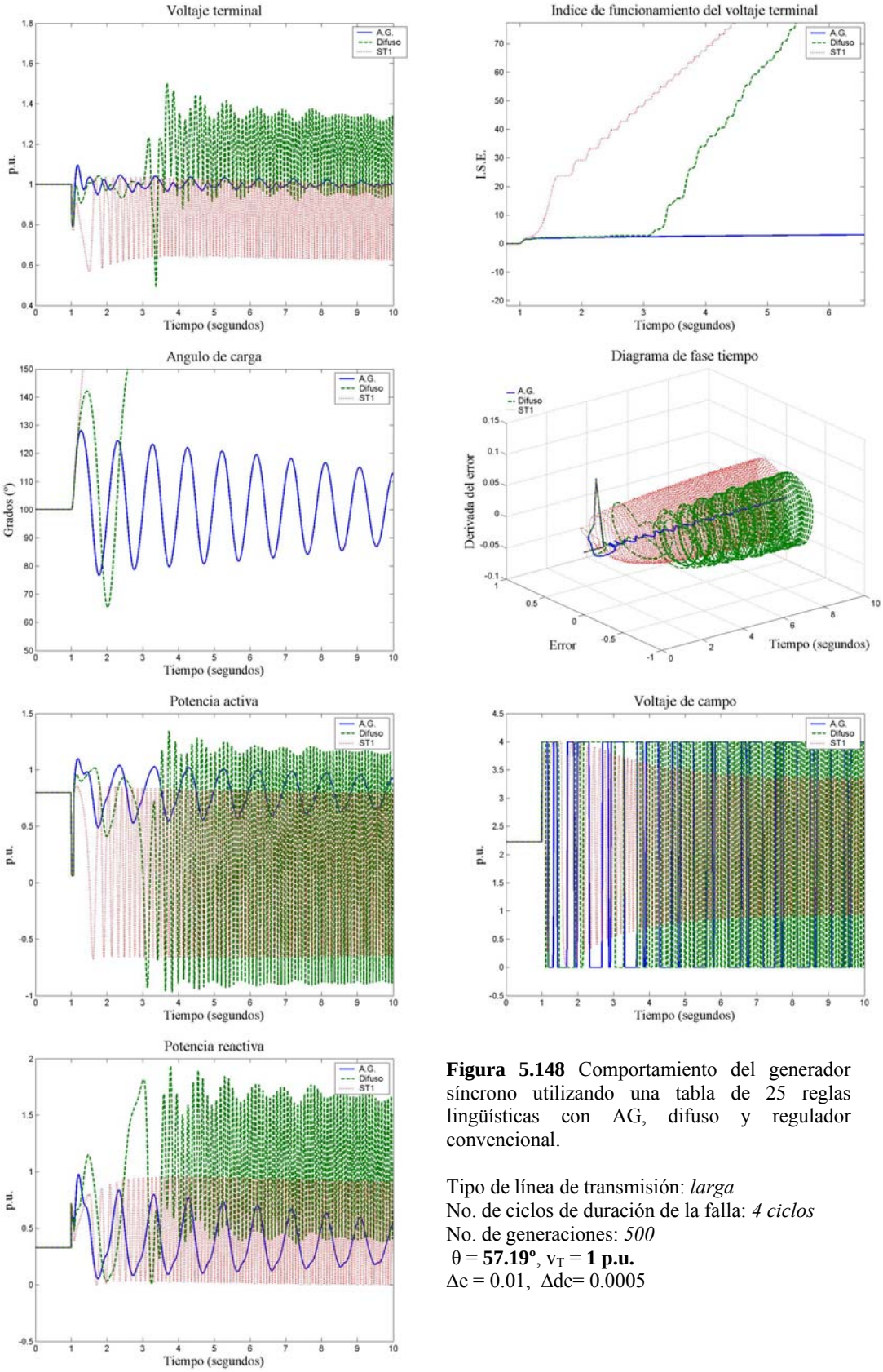



**Figura 5.148** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con AG, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: *4 ciclos*
No. de generaciones: *500*
$\theta$ = **57.19º**, $v_T$ = **1 p.u.**
$\Delta e$ = 0.01, $\Delta de$= 0.0005

### *5.6.2.2 INTERVALOS RESULTANTES DESPUÉS DE LA APLICACIÓN DE LOS ALGORITMOS GENÉTICOS PARA LA SINTONIZACIÓN DE UN CONTROLADOR DIFUSO DE 5 FUNCIONES DE MEMBRESÍA EMPLEANDO UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN LARGA.*

En esta sección se presentan los intervalos resultantes de las funciones de membresía correspondientes a la sección 5.6.3 después de aplicar los algoritmos genéticos.

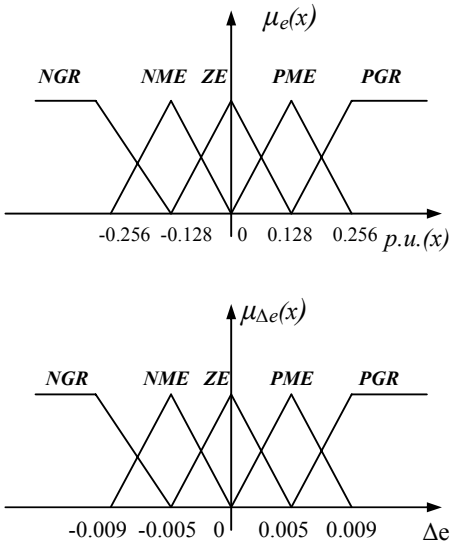



**Figura 5.149** Intervalos resultantes para 5 funciones de membresía después de aplicar AG con 500 generaciones para una condición de $v_T$ = 1.0 p.u. y θ = 0º, con una falla de duración de 15 ciclos cuando t =1 seg.

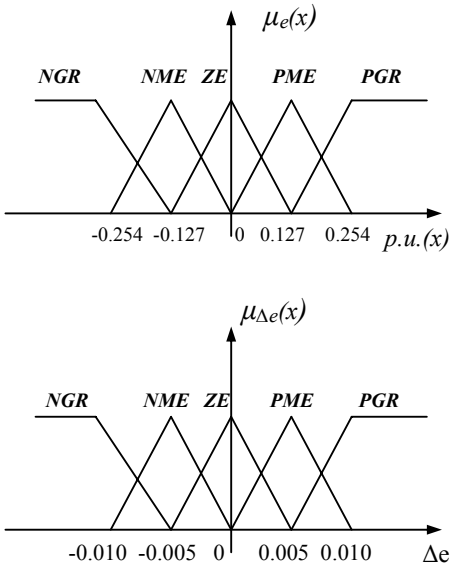



**Figura 5.150** Intervalos resultantes para 5 funciones de membresía después de aplicar AG con 500 generaciones para una condición de $v_T$ = 1.0 p.u. y θ = 0º, con una falla de duración de 25 ciclos cuando t =1 seg.

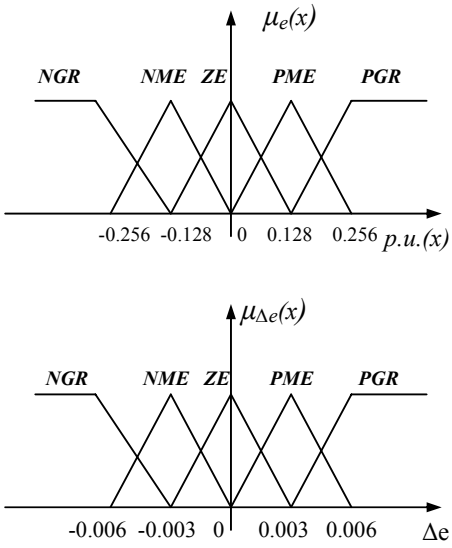



**Figura 5.151** Intervalos resultantes para 5 funciones de membresía después de aplicar AG con 500 generaciones para una condición de $v_T$ = 1.0 p.u. y θ = 0º, Potencia activa = 0.0 p.u. con un incremento a $v_T$ = 1.0 p.u. θ = 98º y potencia activa = 0.785 p.u.

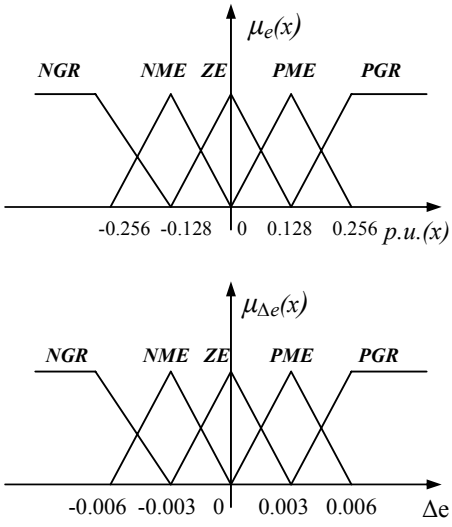



**Figura 5.152** Intervalos resultantes para 5 funciones de membresía después de aplicar AG con 500 generaciones para una condición de $v_T$ = 1.0 p.u. y θ = 43.8728º, con una falla de duración de 9 ciclos cuando t =1 seg.

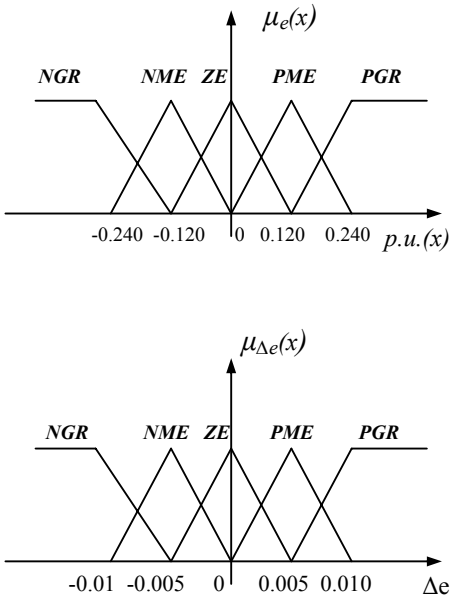



**Figura 5.153** Intervalos resultantes para 5 funciones de membresía después de aplicar AG con 500 generaciones para una condición de $v_T$ = 1.0 p.u. y θ = 47.9942º, con una falla de duración de 7 ciclos cuando t =1 seg.

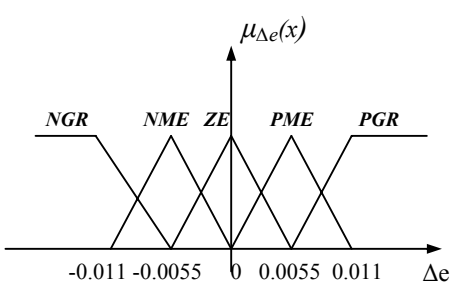



**Figura 5.154** Intervalos resultantes para 5 funciones de membresía después de aplicar AG con 500 generaciones para una condición de $v_T$ = 1.0 p.u. y θ = 57.19º, con una falla de duración de 4 ciclos cuando t =1 seg.

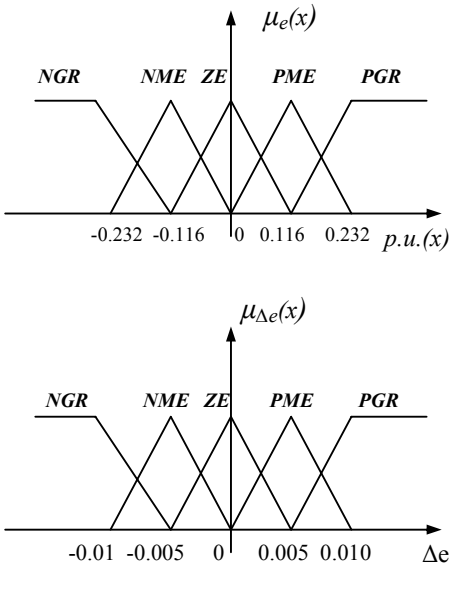



**Figura 5.155** Intervalos resultantes para 5 funciones de membresía después de aplicar AG con 500 generaciones para una condición de $v_T$ = 1.0 p.u. y θ = 43.8728º, con una falla de duración de 8 ciclos cuando t =1 seg.

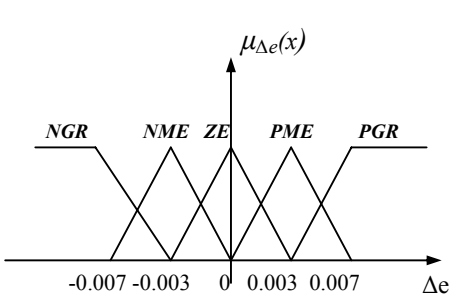



**Figura 5.156** Intervalos resultantes para 5 funciones de membresía después de aplicar AG con 500 generaciones para una condición de $v_T$ = 1.0 p.u. y θ = 57.19º, con una falla de duración de 3 ciclos cuando t =1 seg.

### *5.6.2.3 RESULTADOS OBTENIDOS DESPUÉS DE LA APLICACIÓN DE LOS ALGORITMOS GENÉTICOS SOBRE LA SINTONIZACIÓN DE 5 FUNCIONES DE MEMBRESÍA DE UN CONTROLADOR DIFUSO EMPLEANDO UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN CORTA.*

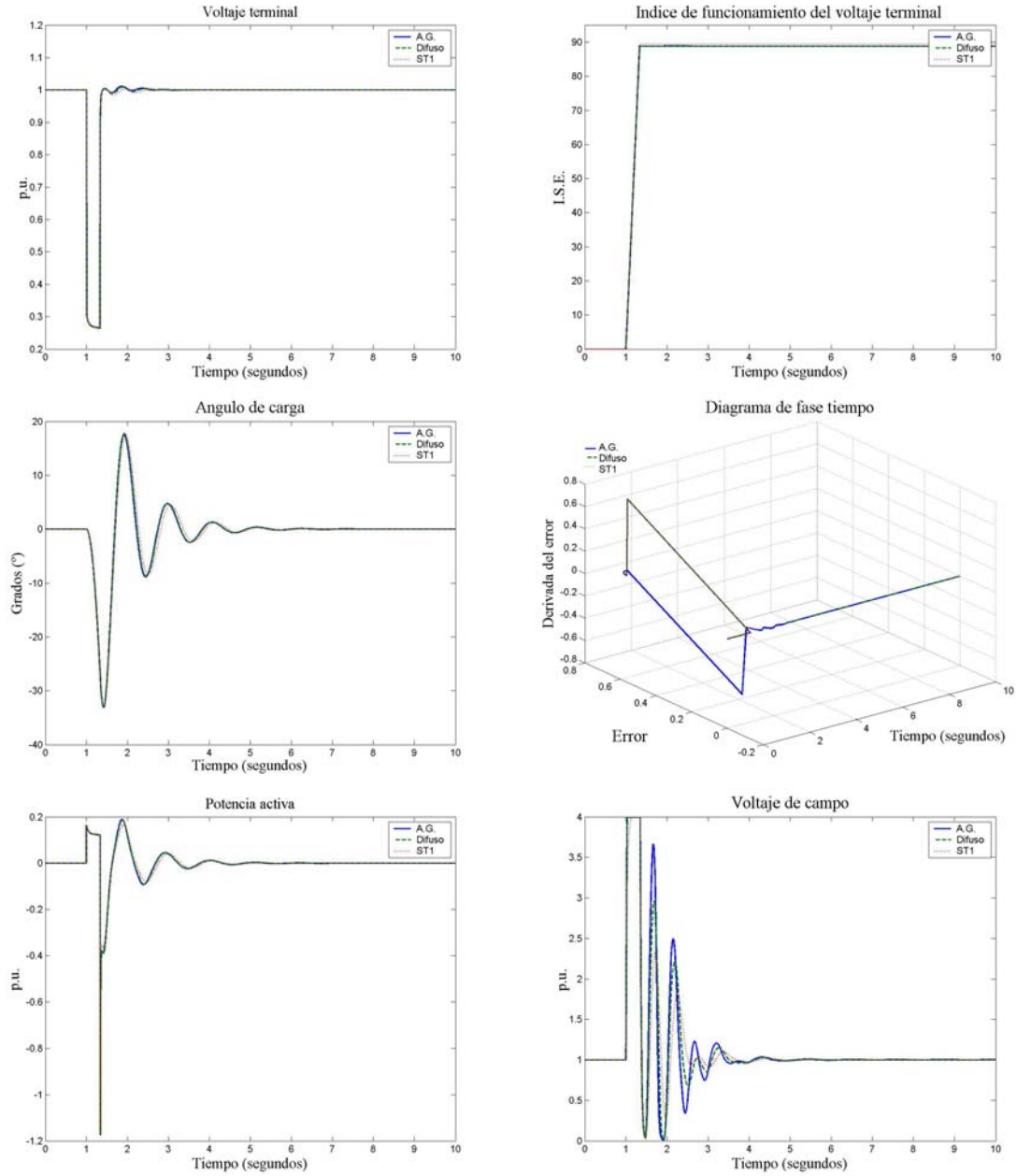



**Figura 5.157** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con AG, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: **corta**
No. de ciclos de duración de la falla: ***20 ciclos***
No. de generaciones: ***500***
$\theta$ = **0º**, $v_T$ = **1 p.u.**
$\Delta e$ = 0.01, $\Delta de$= 0.0005

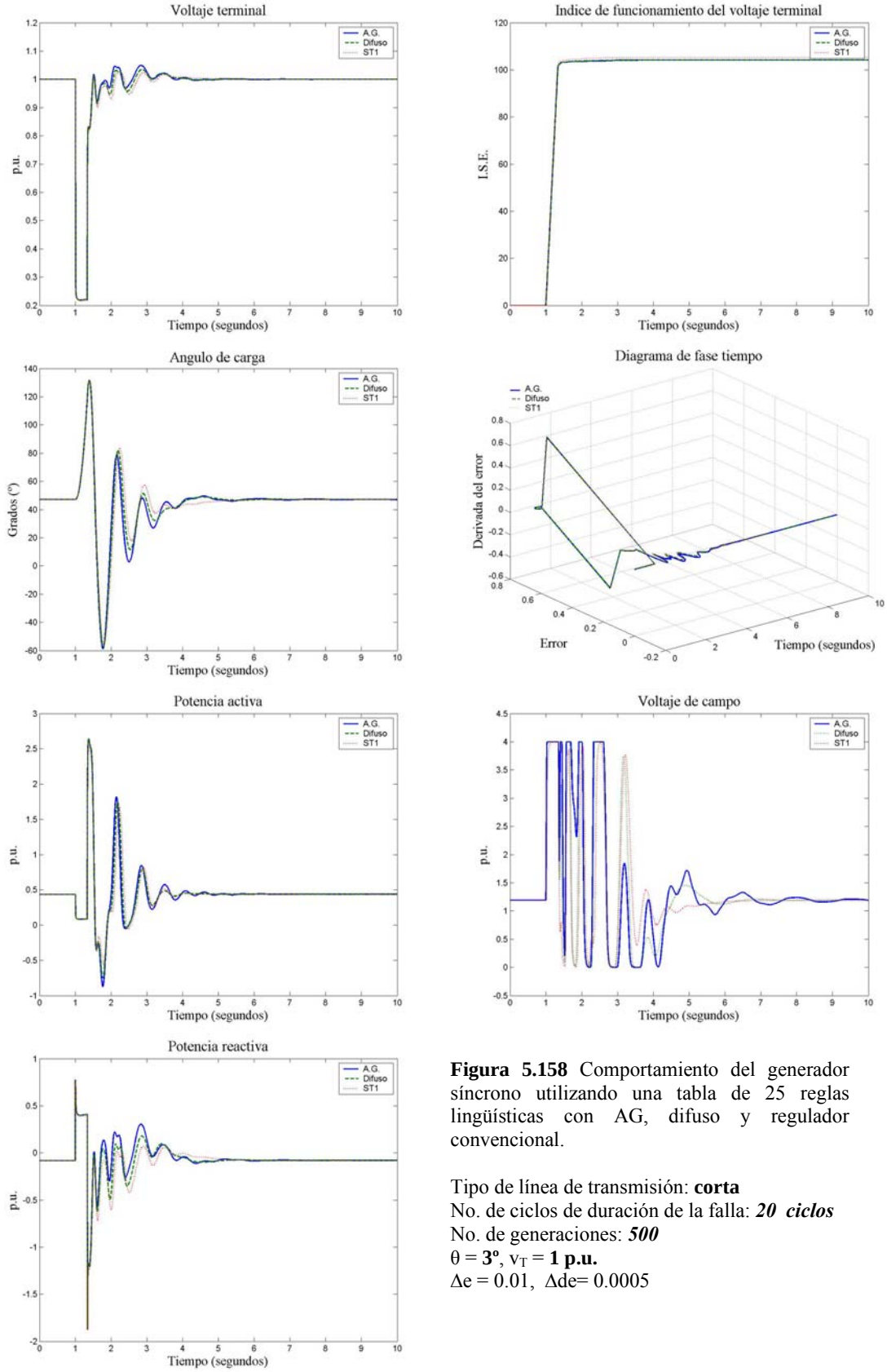



**Figura 5.158** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con AG, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: **corta**
No. de ciclos de duración de la falla: ***20 ciclos***
No. de generaciones: ***500***
$\theta$ = **3º**, $v_T$ = **1 p.u.**
$\Delta e$ = 0.01, $\Delta de$= 0.0005

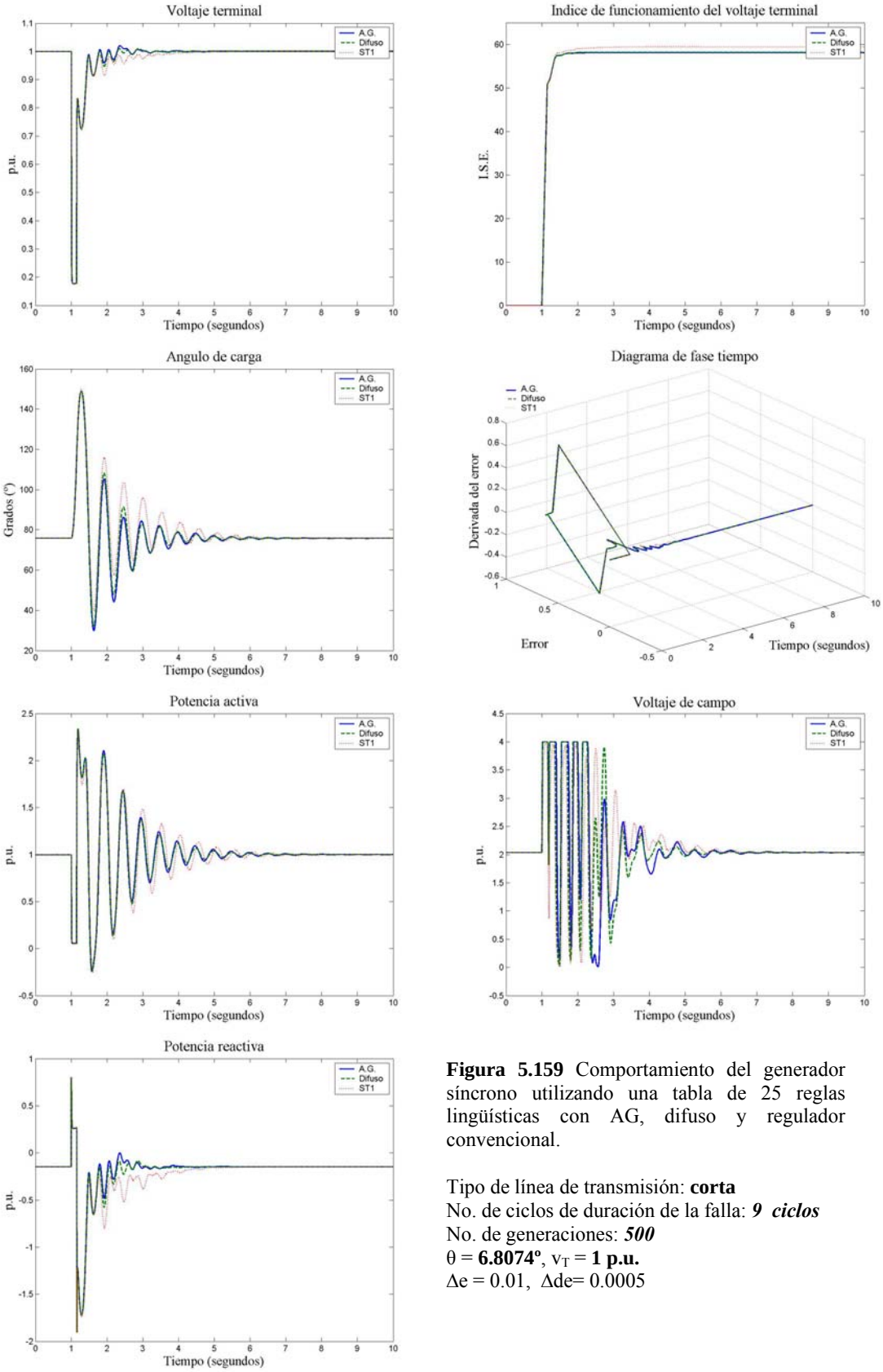



**Figura 5.159** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con AG, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: **corta**
No. de ciclos de duración de la falla: ***9 ciclos***
No. de generaciones: ***500***
$\theta$ = **6.8074º**, $v_T$ = **1 p.u.**
$\Delta e$ = 0.01, $\Delta de$= 0.0005

### *5.6.3. RESULTADOS OBTENIDOS DESPUÉS DE LA SINTONIZACIÓN DE UN CONTROL DIFUSO CON 7 FUNCIONES DE MEMBRESÍA EMPLEANDO UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN LARGA Y CORTA.*

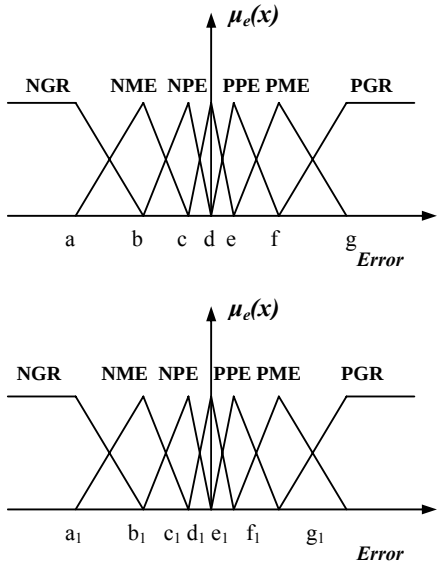
#### *5.6.3.1 INTRODUCCIÓN.*

En esta sección se mostrarán todos aquellos resultados obtenidos después de simular el generador síncrono en diversos puntos de operación empleando un controlador difuso con siete funciones de membresía. El objetivo de tales pruebas es destacar el comportamiento que describen los algoritmos genéticos enfocados sobre la lógica difusa, en particular la sintonización de las funciones de membresía. Las pruebas comienzan en esta sección con la simulación del generador ante un incremento de carga (rampa) con una duración de 150 segundos hasta alcanzar un punto de operación donde la potencia activa es igual a 0.779 p.u. y un ángulo de carga de 97º, tal simulación del comportamiento del generador síncrono puede ser comparada con los resultados obtenidos por un regulador de voltaje convencional mostrado al principio de esta unidad.

A continuación se muestran los datos utilizados durante la simulación:

**Datos:**

- Tipo de línea de transmisión: Larga y corta.
- Sintonización: AGS, 50000 generaciones
- Tipo de Falla: Corto circuito(Trifásica)
- No. de ciclos de Falla: Indicados
- Partiremos de los siguientes:




Donde los valores iniciales de las funciones de membresía son:

*Universo del error:*

a = -0.12, b = -0.05, c = -0.035, d = 0 e = 0.035, f = 0.05, g = 0.12

*Para el universo de la derivada del error:*

a = -0.0008, b = -0.0006, c = -0.00035, d = 0 e = 0.00035, f = 0.0006, g = 0.0008

A continuación se muestra los resultados de la prueba en la figura 5.160.

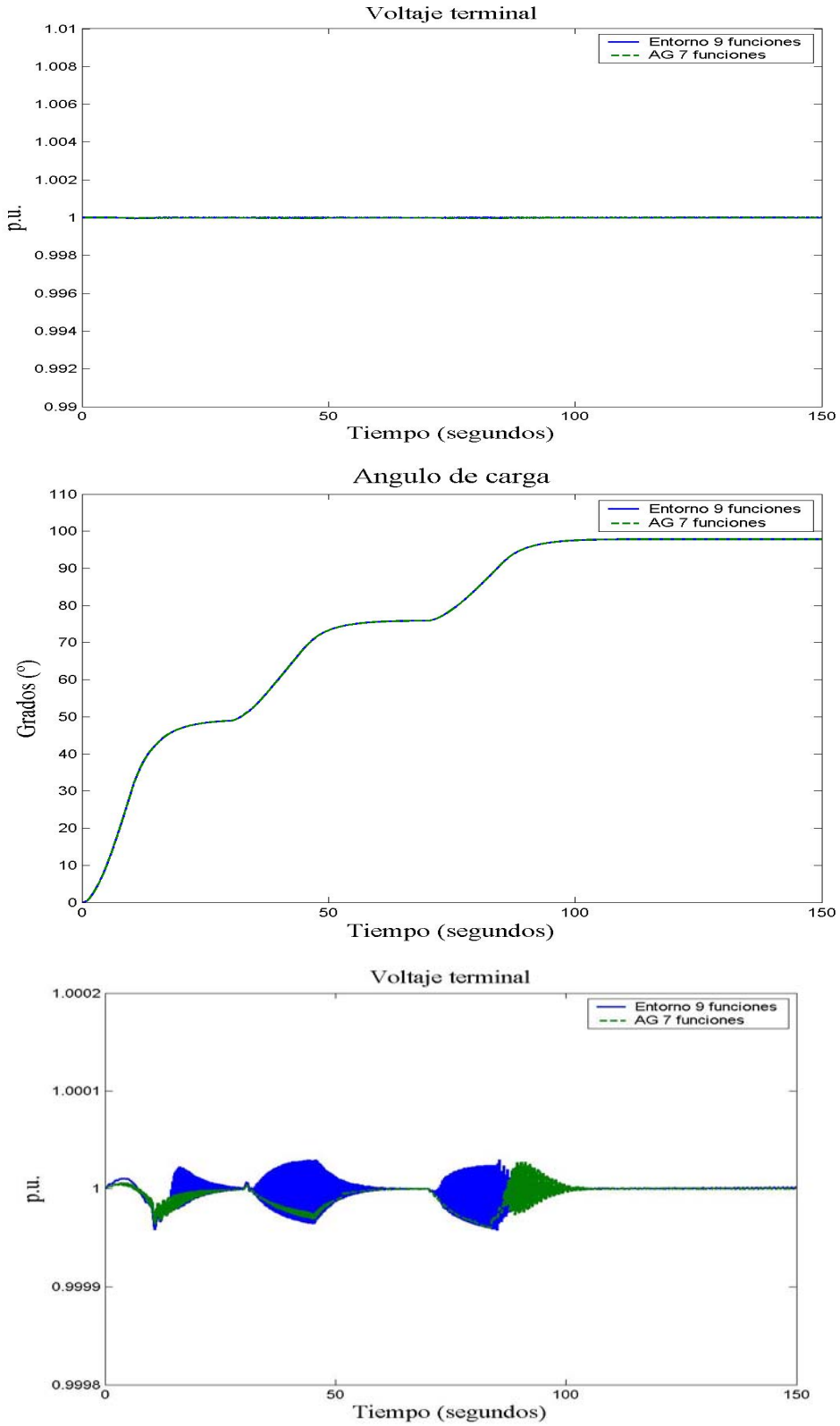
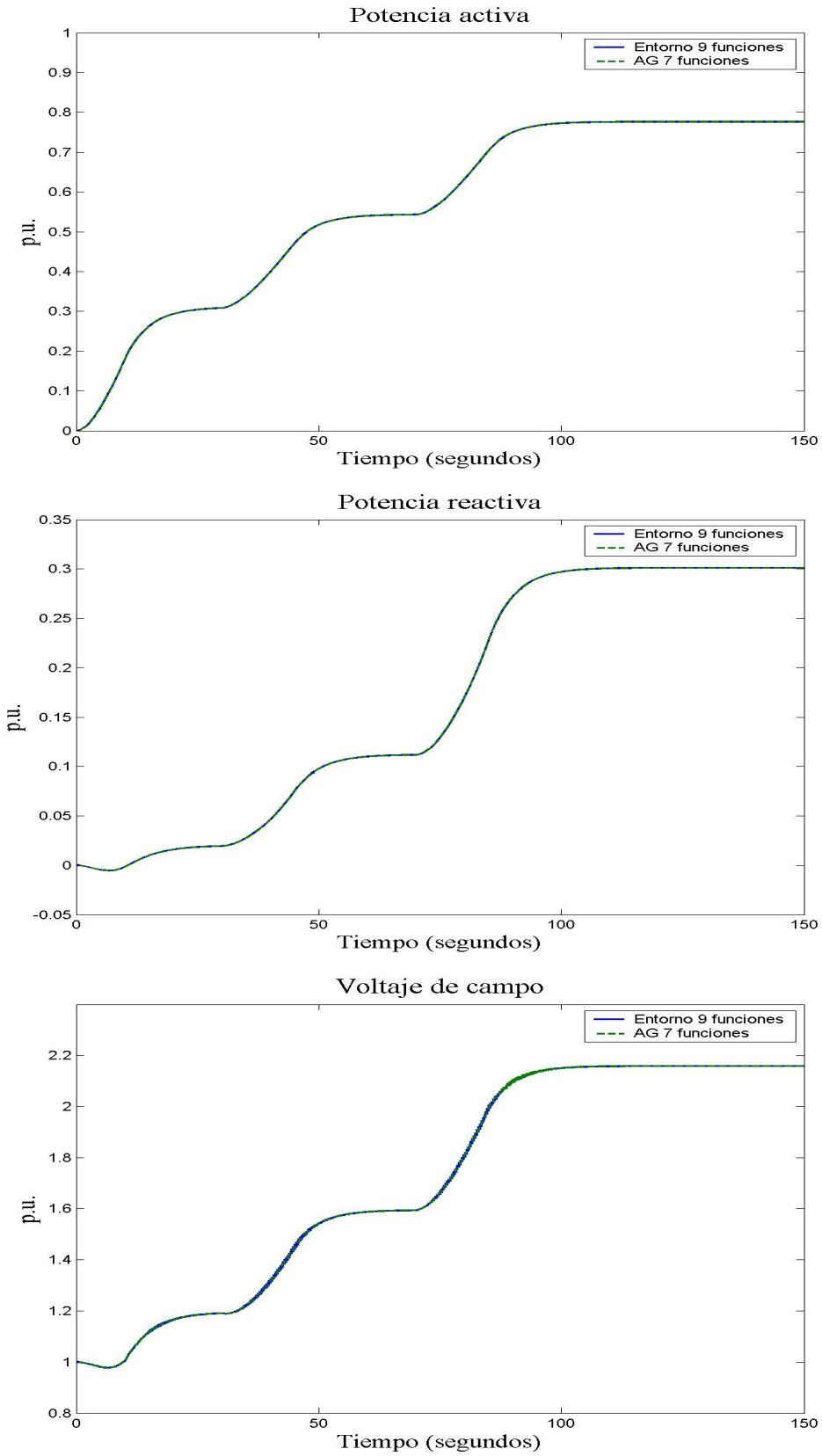
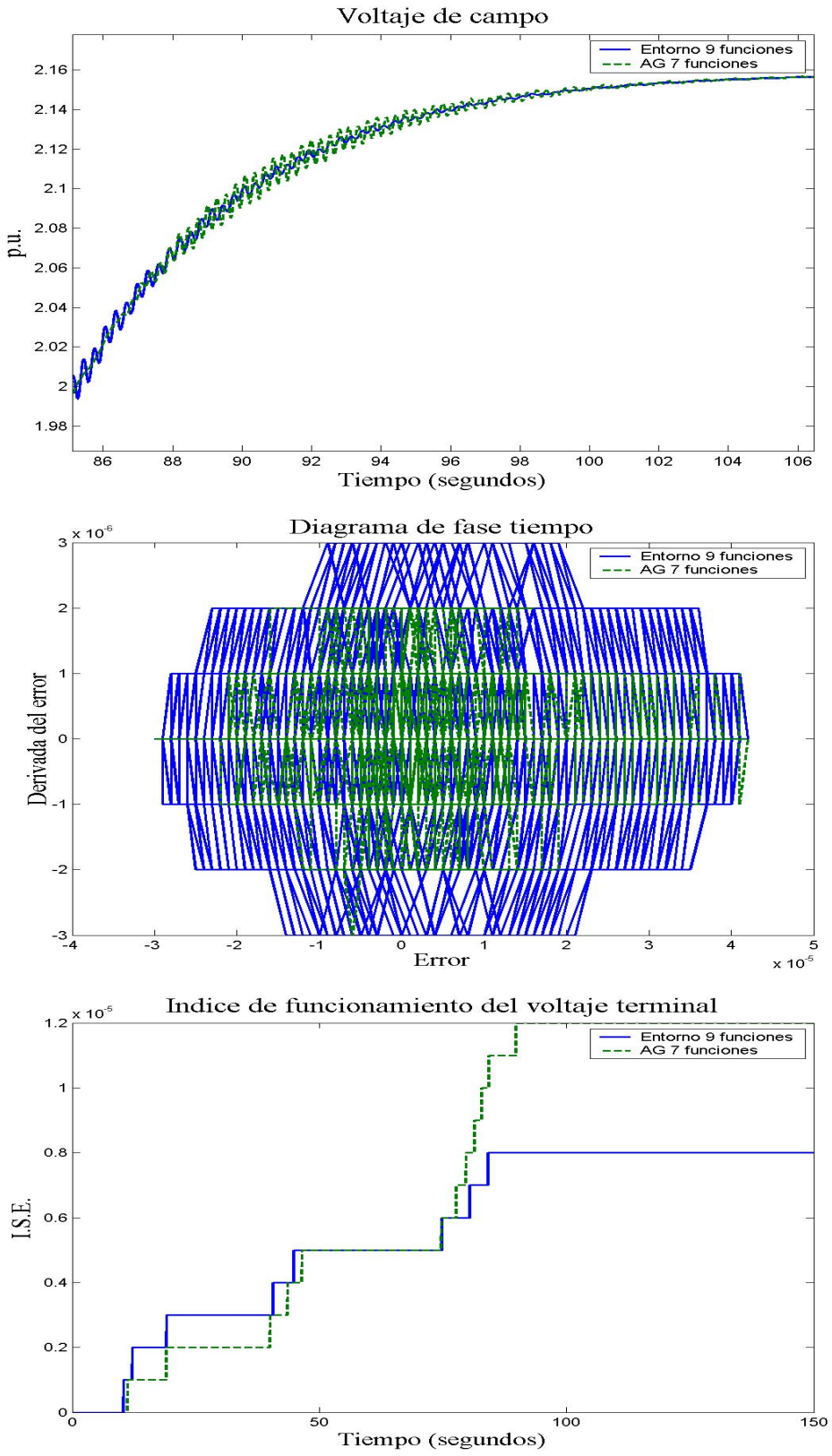



Figura 5.160 (a). Comportamiento del generador síncrono con una duración de simulación de 150 segundos empleando un control difuso estático con una tabla de 81 reglas lingüísticas y la aplicación de los AG para la sintonización de un controlador difuso de 7 funciones de membresía.




5.160 (b). Comportamiento de la potencia y voltaje en el generador síncrono.




5.162. (c) Diagrama de fase y comportamiento del voltaje terminal.

**Figura 5.160** Comportamiento del generador empleando 9 y 7 funciones de membresía realizando una comparación gráfica entre la optimización hecha por los algoritmos genéticos y la búsqueda por tabú.

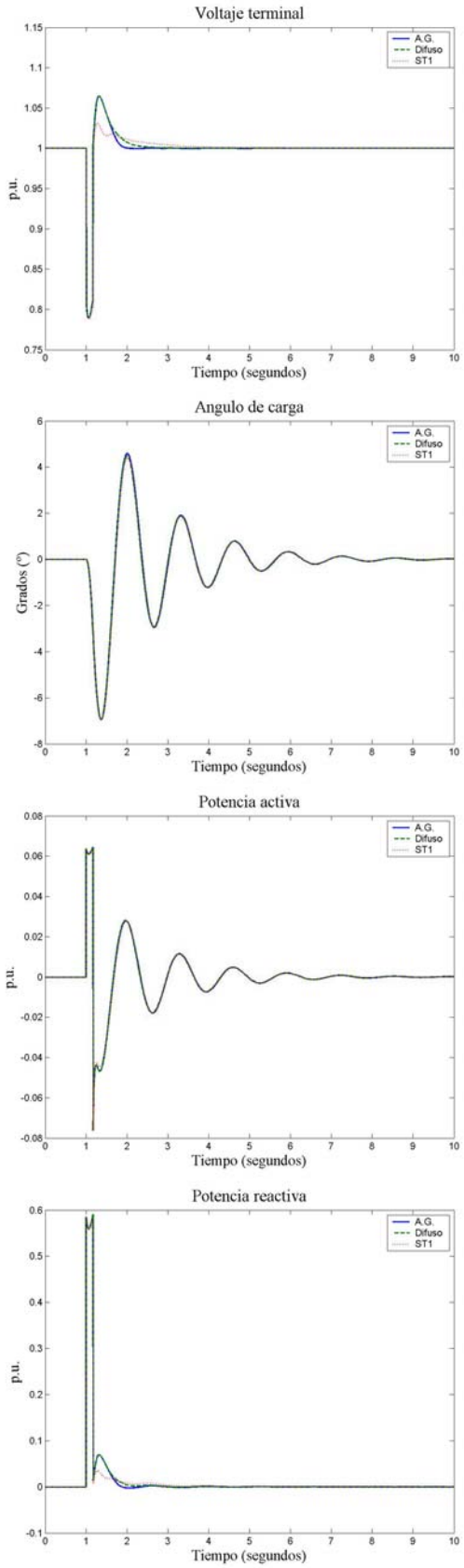



**Figura 5.161** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con AG, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: *10 ciclos*
No. de generaciones: *500*
$\theta$ = **0º**, $v_T$ = **1 p.u.**
$\Delta e = 0.001$, $\Delta de = 0.0001$

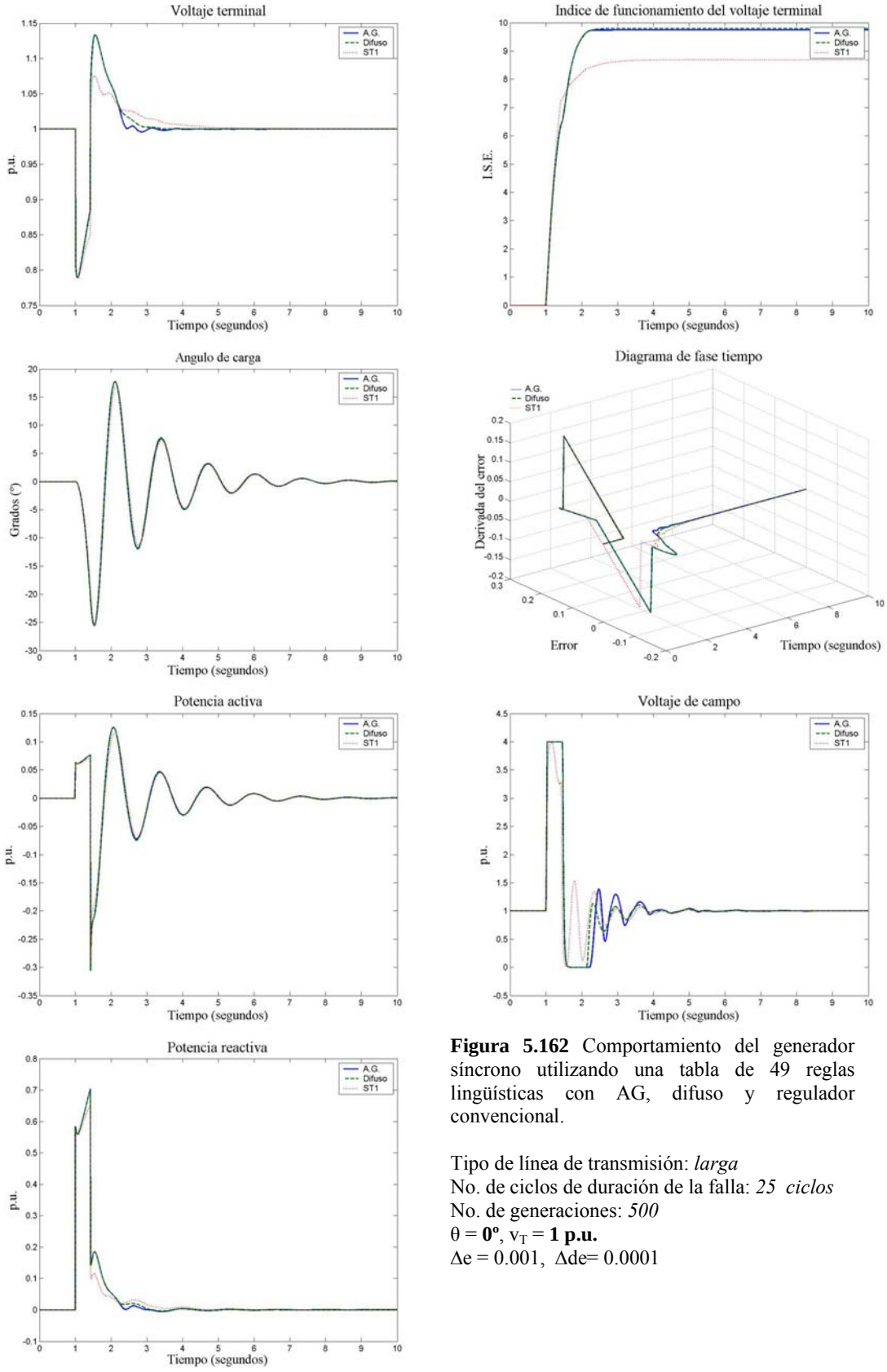



**Figura 5.162** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con AG, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: *25 ciclos*
No. de generaciones: *500*
$\theta$ = **0º**, $v_T$ = **1 p.u.**
$\Delta e$ = 0.001, $\Delta de$= 0.0001

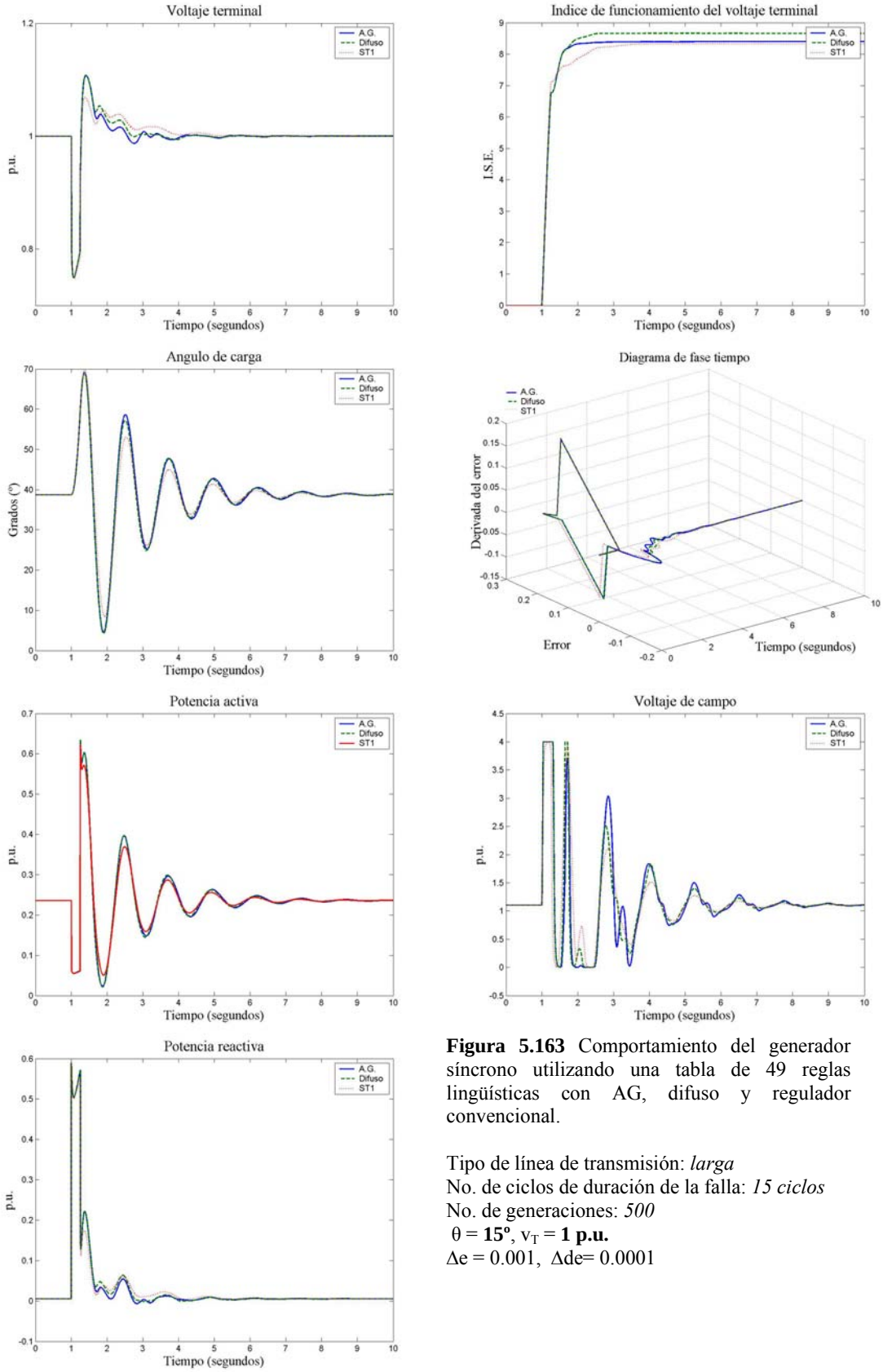



**Figura 5.163** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con AG, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: *15 ciclos*
No. de generaciones: *500*
$\theta$ = **15°**, $v_T$ = **1 p.u.**
$\Delta e$ = 0.001, $\Delta de$= 0.0001

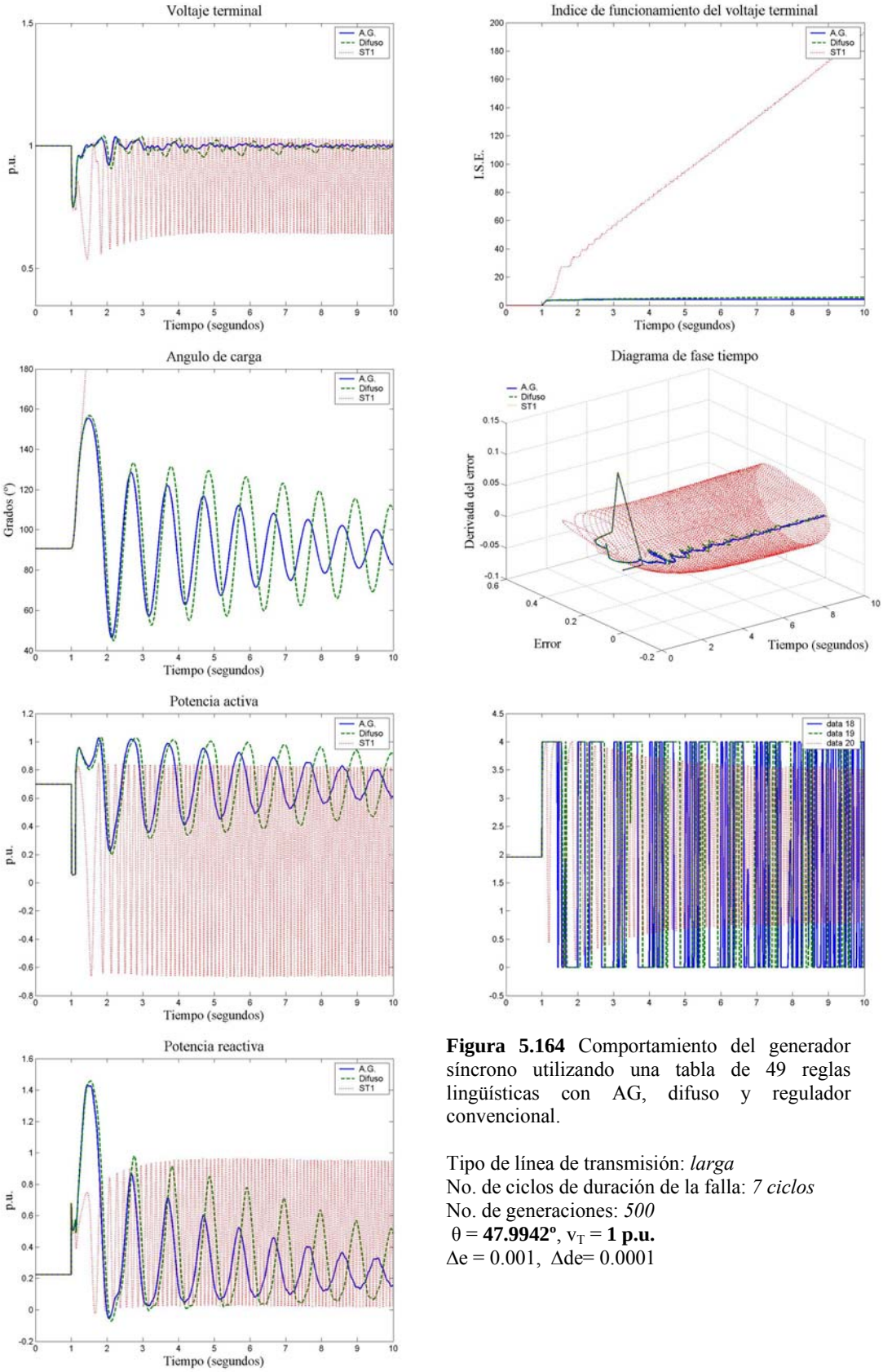



**Figura 5.164** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con AG, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: *7 ciclos*
No. de generaciones: *500*
$\theta$ = **47.9942º**, $v_T$ = **1 p.u.**
$\Delta e$ = 0.001, $\Delta de$= 0.0001

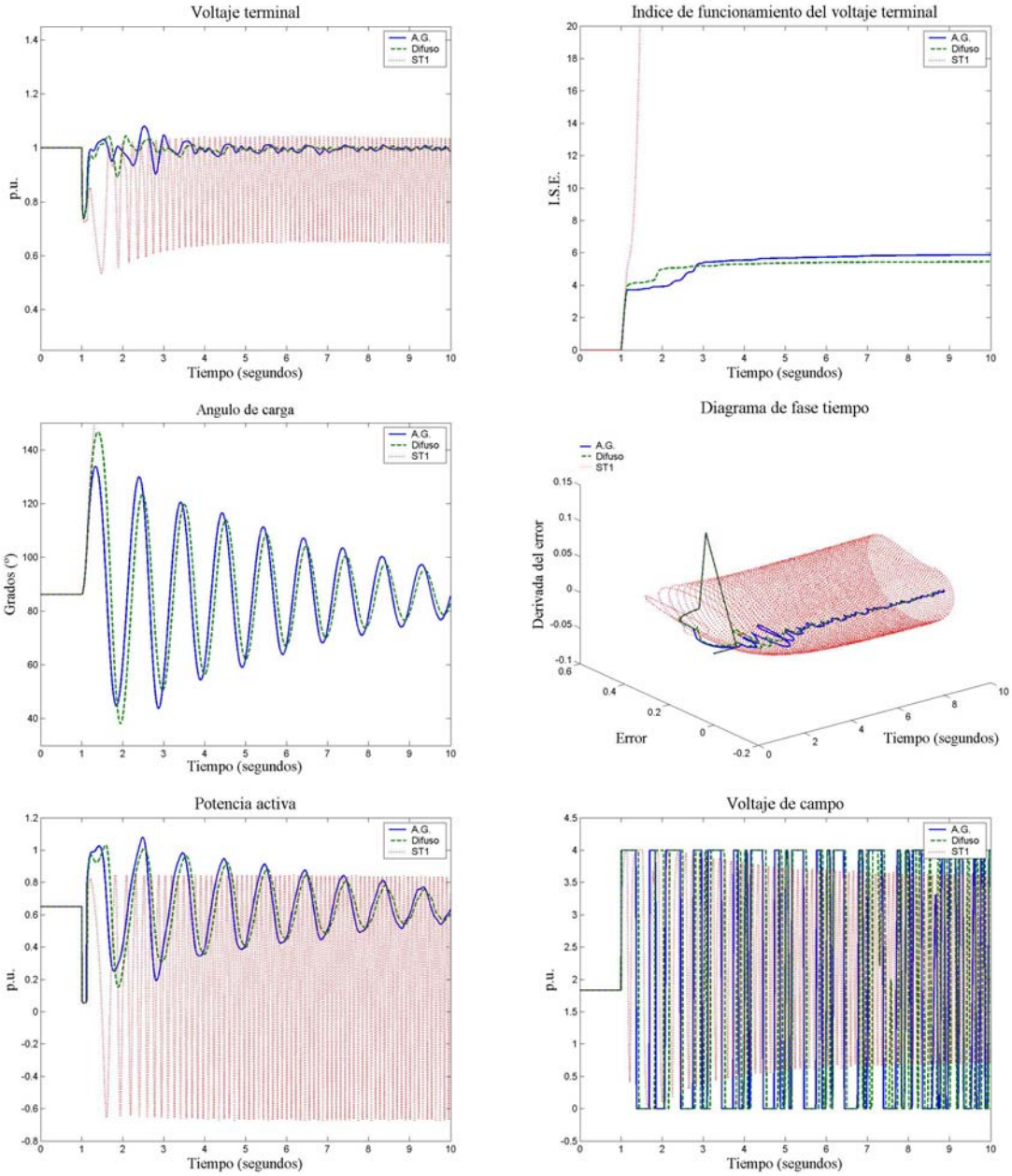



**Figura 5.165** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con AG, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: *8 ciclos*
No. de generaciones: *500*
$\theta$ = **43.8728º**, $v_T$ = **1 p.u.**
$\Delta e$ = 0.001, $\Delta de$= 0.0001

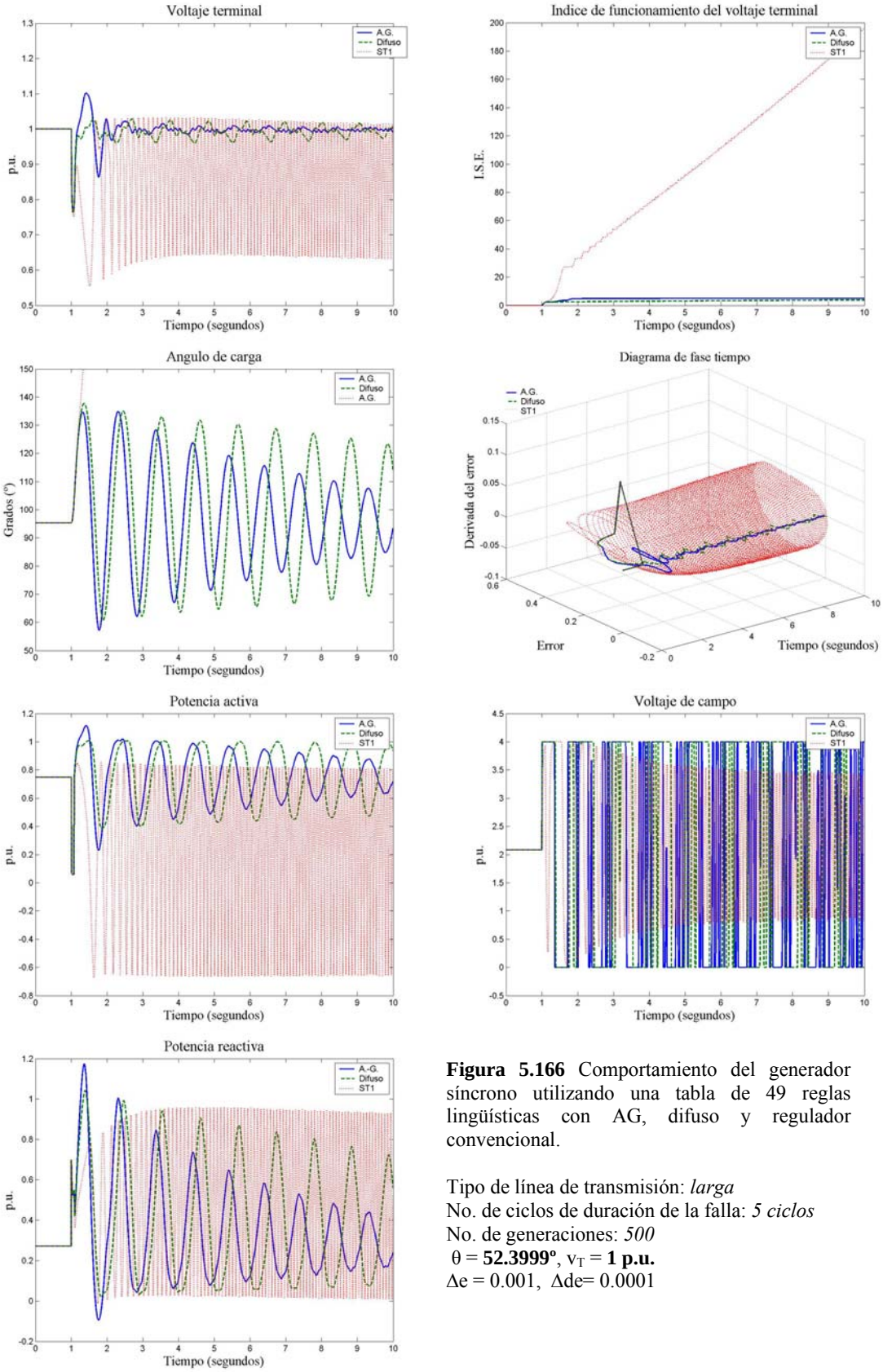



**Figura 5.166** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con AG, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: *5 ciclos*
No. de generaciones: *500*
$\theta$ = **52.3999º**, $v_T$ = **1 p.u.**
$\Delta e$ = 0.001, $\Delta de$= 0.0001

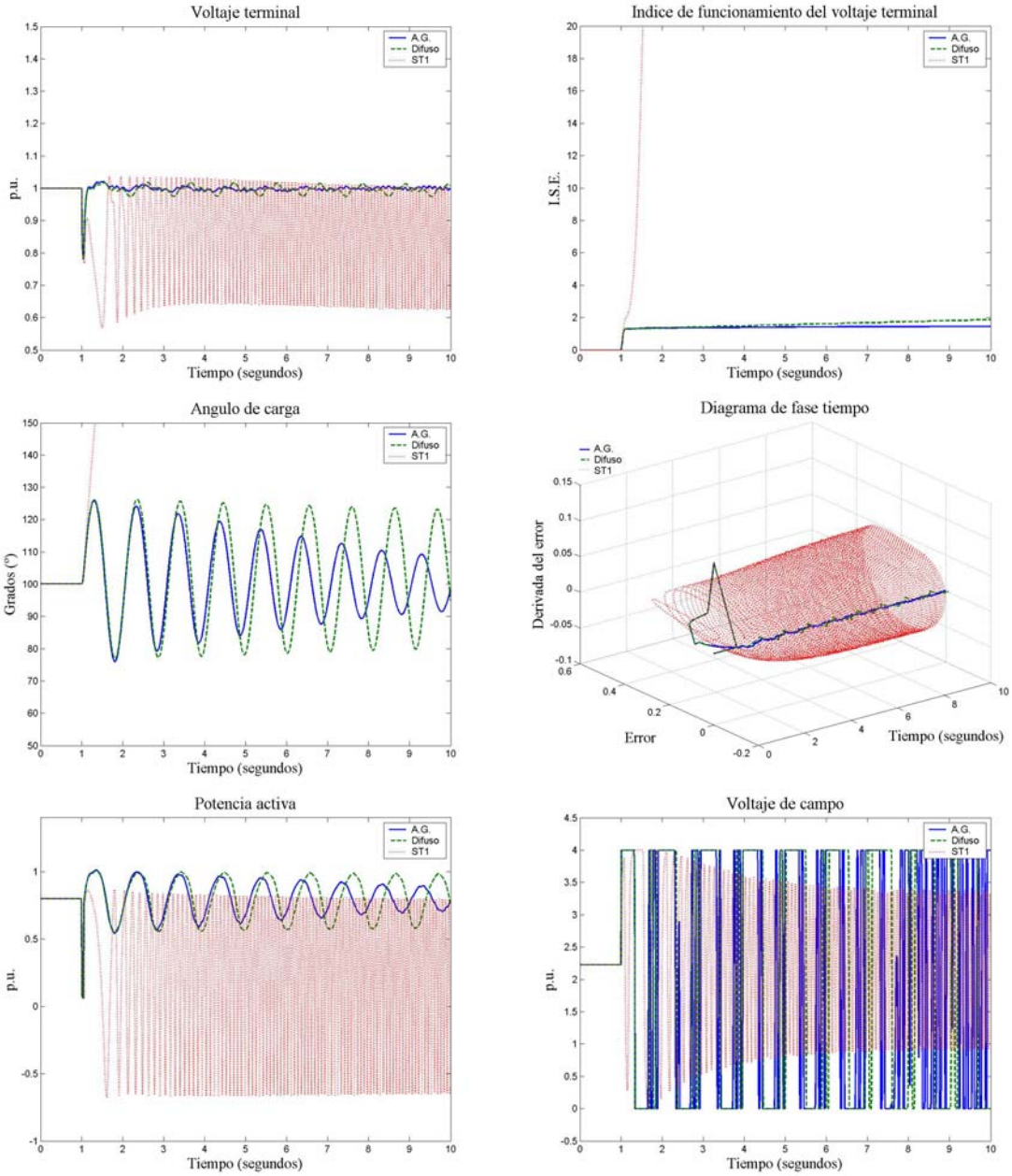



**Figura 5.167** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con AG, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: *3 ciclos*
No. de generaciones: *500*
$\theta$ = **57.19º**, $v_T$ = **1 p.u.**
$\Delta e$ = 0.001, $\Delta de$= 0.0001

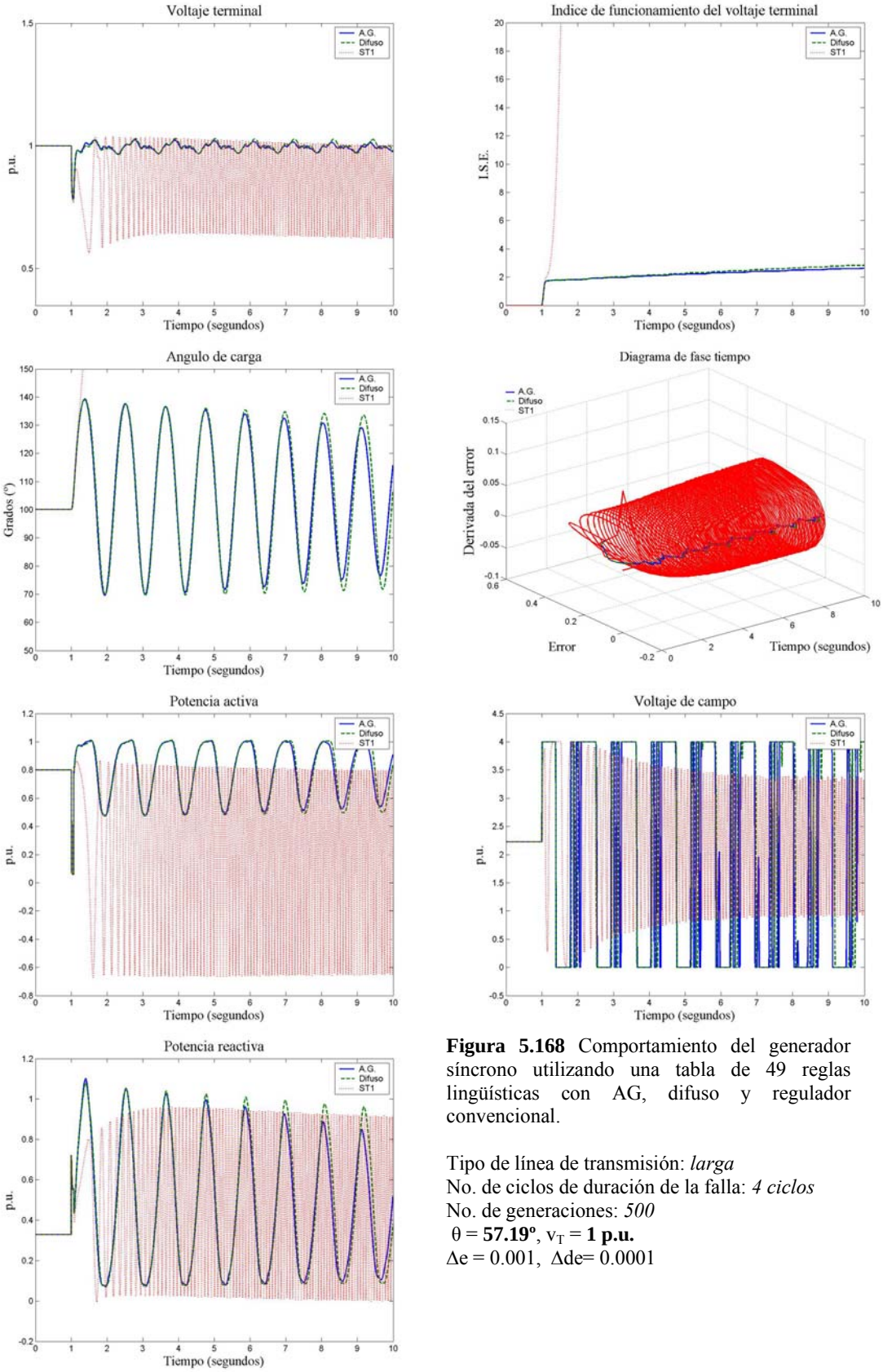


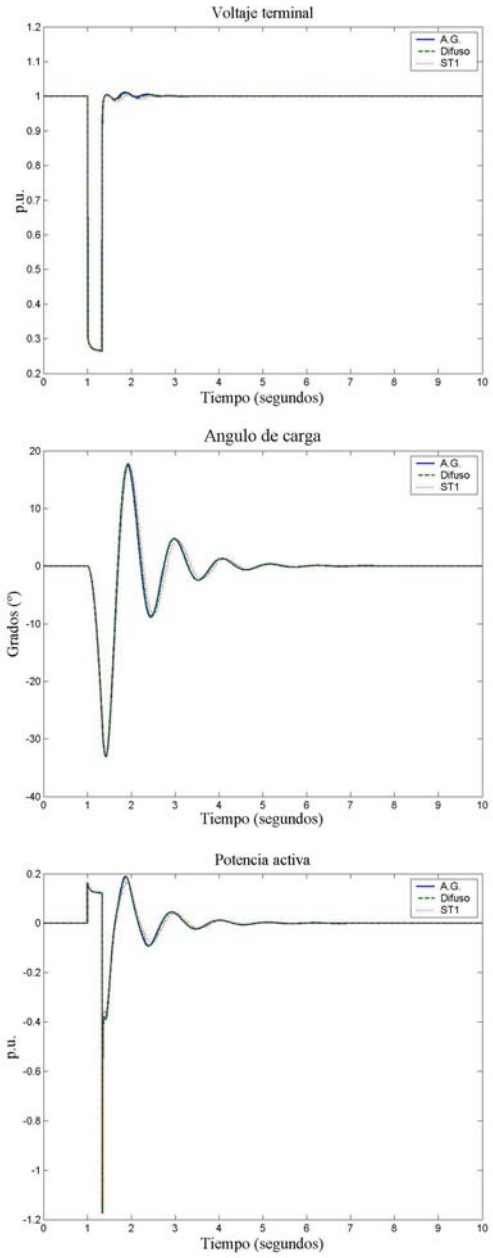

**Figura 5.168** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con AG, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: *4 ciclos*
No. de generaciones: *500*
$\theta$ = **57.19º**, $v_T$ = **1 p.u.**
$\Delta e$ = 0.001, $\Delta de$= 0.0001

### 5.6.3.2 RESULTADOS OBTENIDOS DESPUÉS DE LA APLICACIÓN DE LOS ALGORITMOS GENÉTICOS SOBRE LA SINTONIZACIÓN DE 7 FUNCIONES DE MEMBRESÍA DE UN CONTROLADOR DIFUSO EMPLEANDO UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN CORTA.

**Datos de la prueba:**

- Tipo de línea de transmisión: Corta
- Número de generaciones: 500
- Tipo de Falla: Corto circuito(Trifásica)
- No. de ciclos de Falla: Indicados en cada figura.



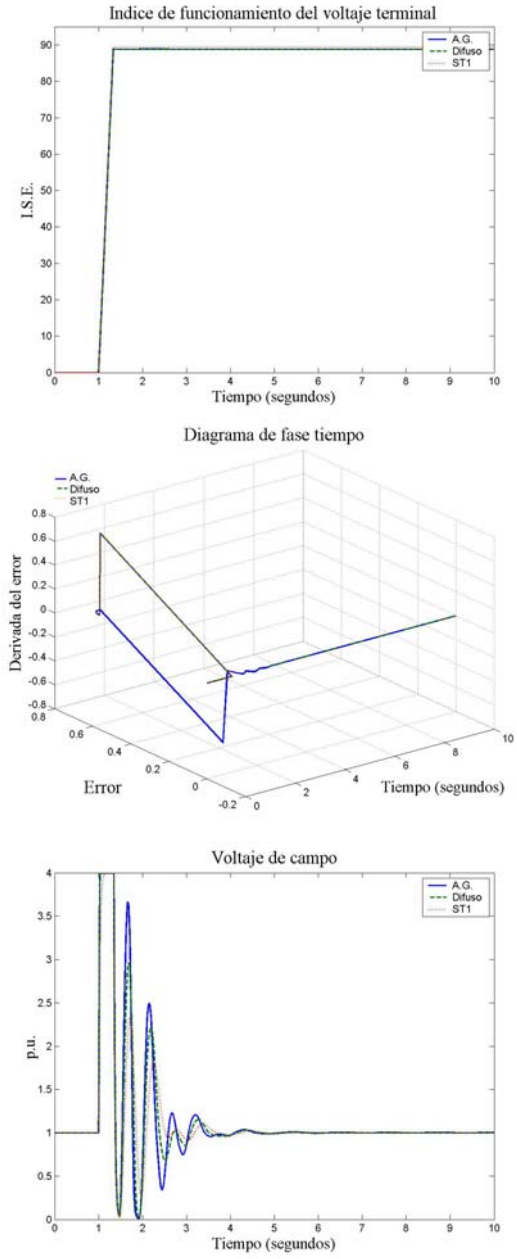




**Figura 5.169** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con AG, difuso y regulador convencional.
Tipo de línea de transmisión: **corta**
No. de ciclos de duración de la falla: ***20 ciclos***
No. de generaciones: ***500***
$\theta$ = **0º**, $v_T$ = **1 p.u.**
$\Delta e$ = 0.001, $\Delta de$= 0.0001

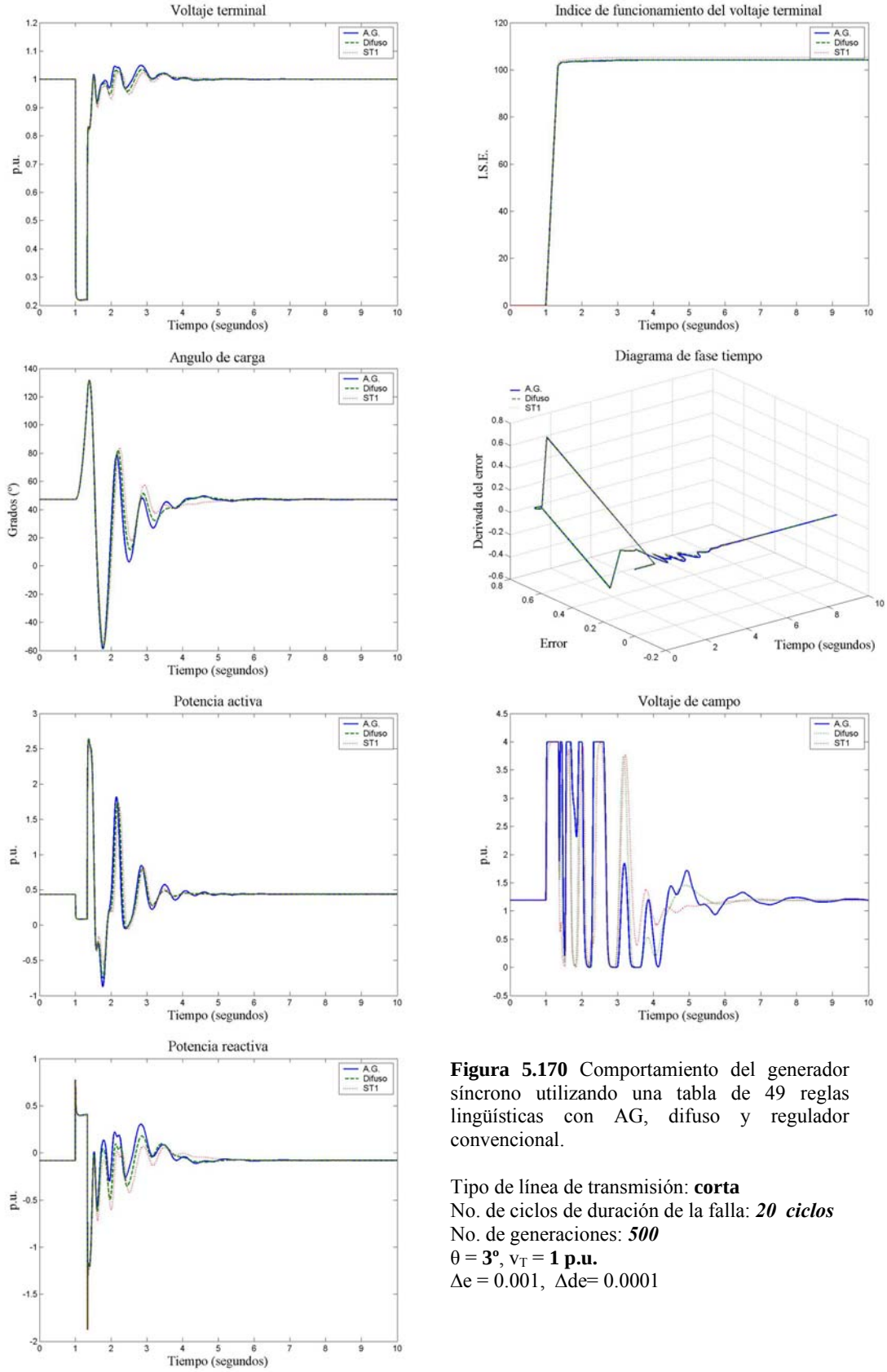



**Figura 5.170** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con AG, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: **corta**
No. de ciclos de duración de la falla: ***20 ciclos***
No. de generaciones: ***500***
$\theta$ = **3º**, $v_T$ = **1 p.u.**
$\Delta e$ = 0.001, $\Delta de$= 0.0001

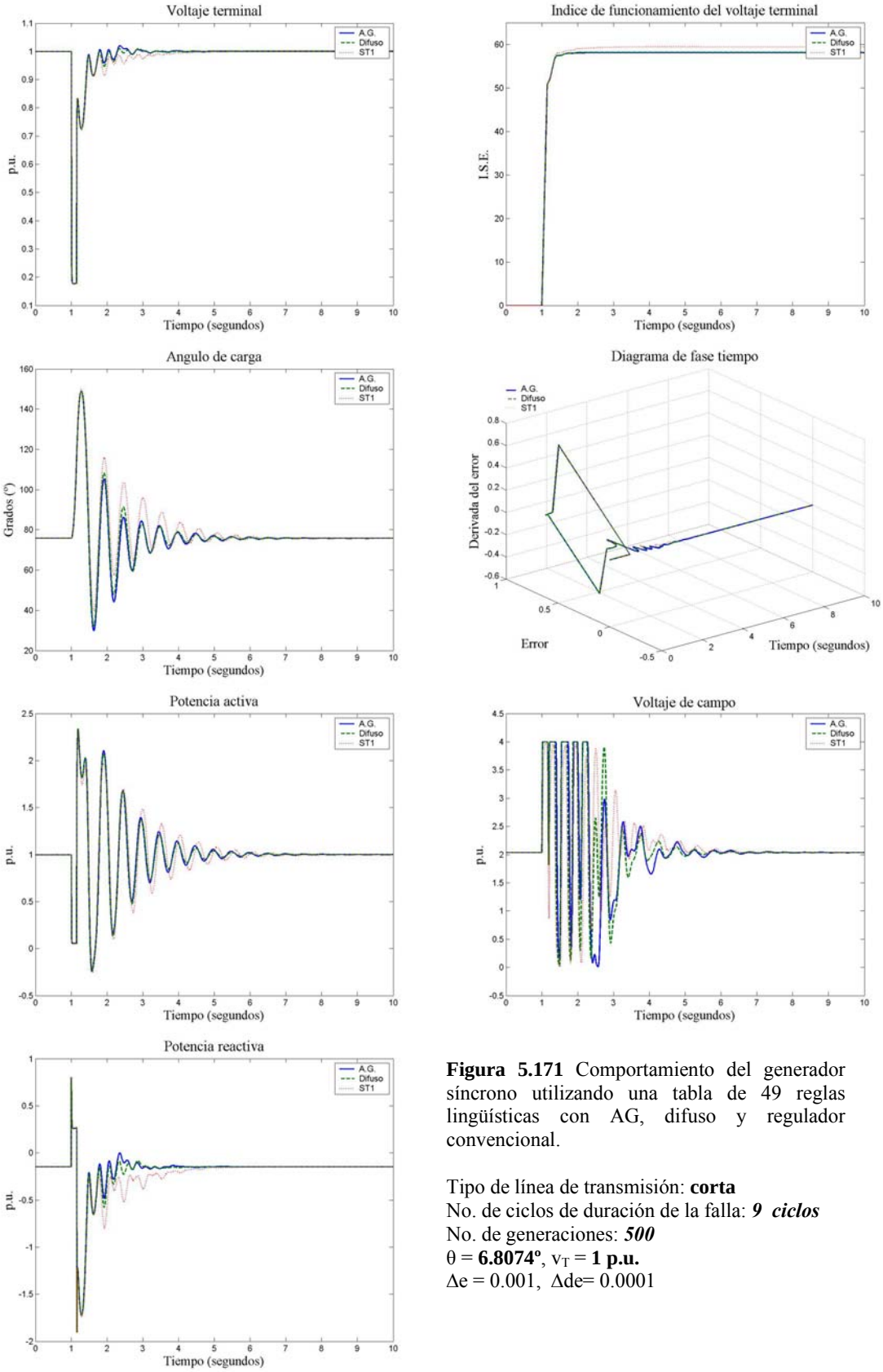


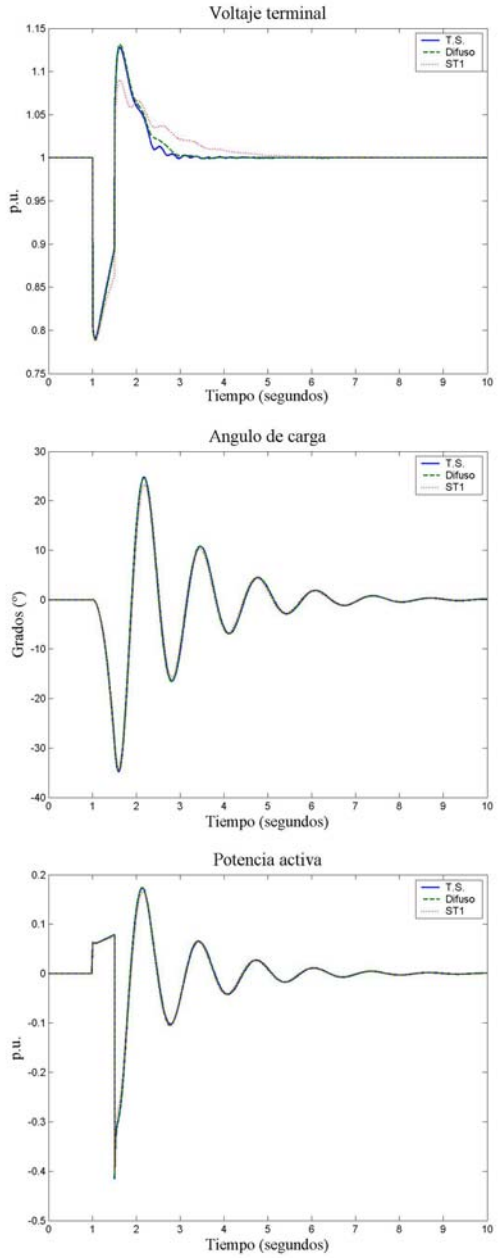

**Figura 5.171** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con AG, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: **corta**
No. de ciclos de duración de la falla: ***9 ciclos***
No. de generaciones: ***500***
$\theta$ = **6.8074º**, $v_T$ = **1 p.u.**
$\Delta e$ = 0.001, $\Delta de$= 0.0001

### *5.6.4 RESULTADOS OBTENIDOS DESPUÉS DE SINTONIZAR UN CONTROLADOR DIFUSO DE 5 FUNCIONES DE MEMBRESÍA POR ALGORITMOS GENÉTICOS SIMULANDO 300 GENERACIONES EMPLEANDO UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN LARGA.*

**Datos de la prueba:**

- Tipo de línea de transmisión: Larga
- Sintonización: AGS, 300 generaciones
- Tipo de Falla: Corto circuito(Trifásica)
- No. de ciclos de Falla: Indicados



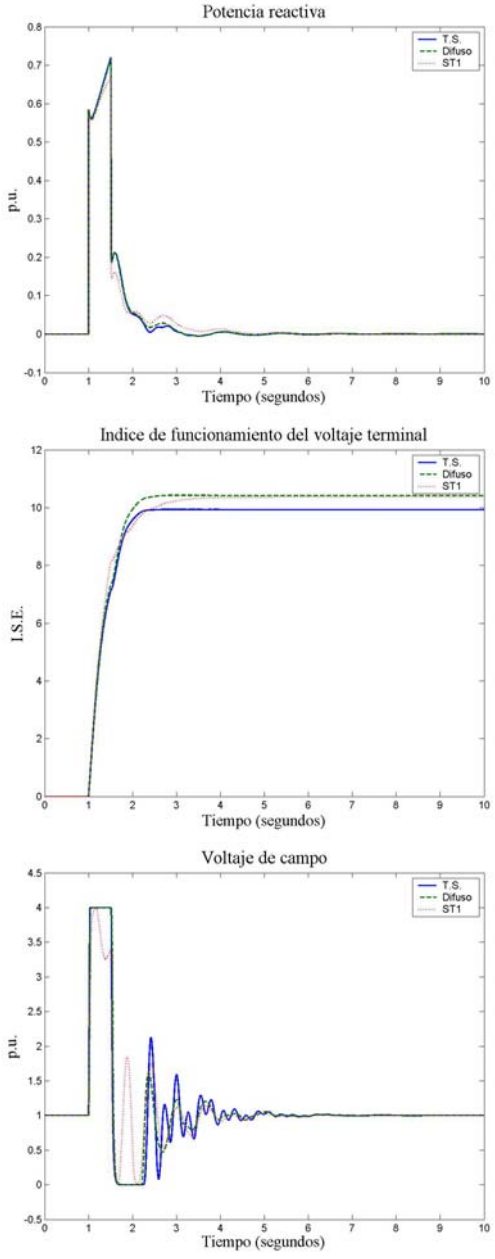




**Figura 5.172** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con AG, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: *30 ciclos*
No. de generaciones: *300*
$\theta$ = **0º**, $v_T$ = **1 p.u.**
$\Delta e = 0.01$, $\Delta de = 0.0005$

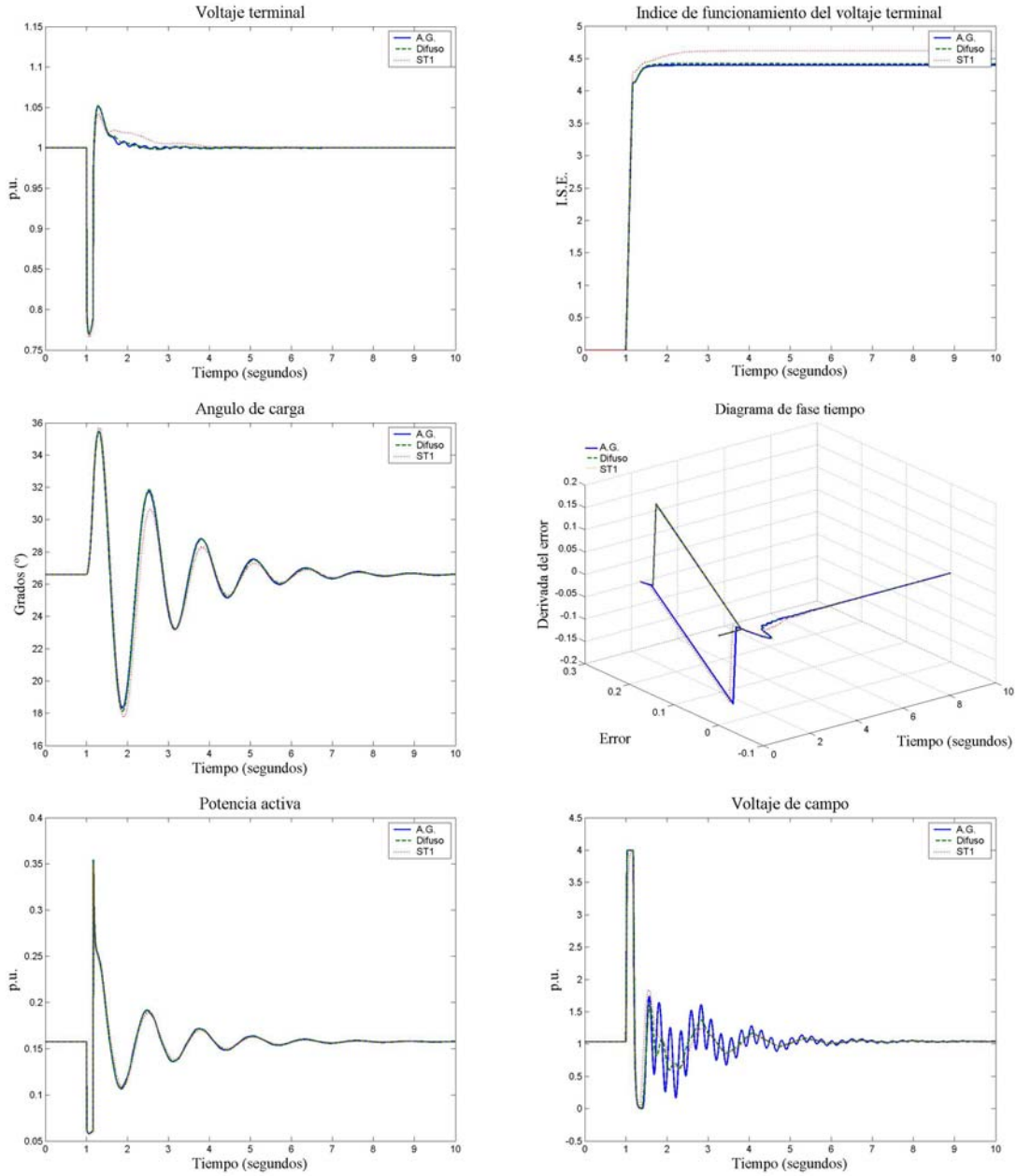



**Figura 5.173** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con AG, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: *10 ciclos*
No. de generaciones: *300*
$\theta$ = **10º**, $v_T$ = **1 p.u.ç**
$\Delta e = 0.01$, $\Delta de = 0.0005$

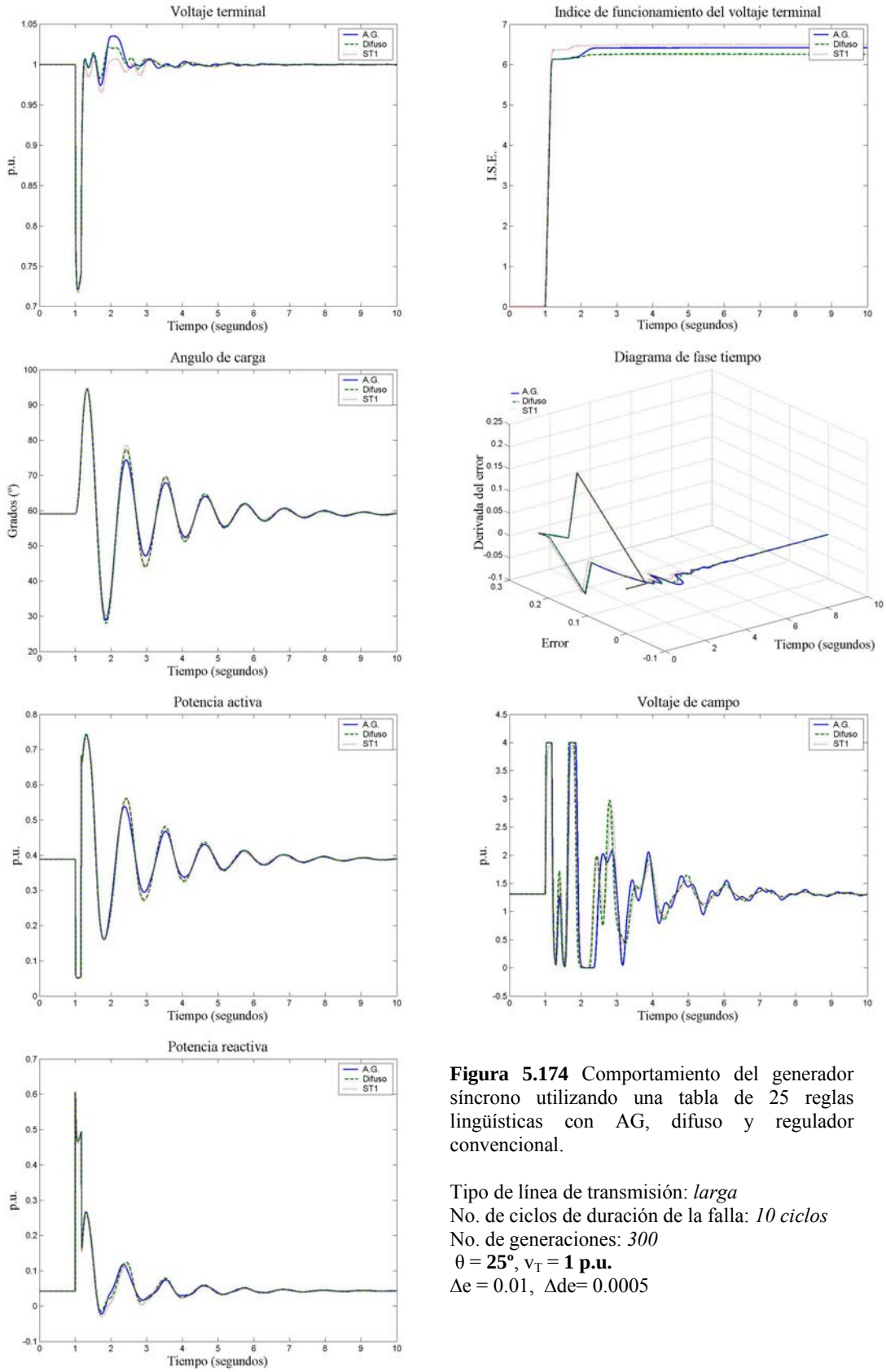



**Figura 5.174** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con AG, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: *10 ciclos*
No. de generaciones: *300*
$\theta$ = **25º**, $v_T$ = **1 p.u.**
$\Delta e$ = 0.01, $\Delta de$= 0.0005

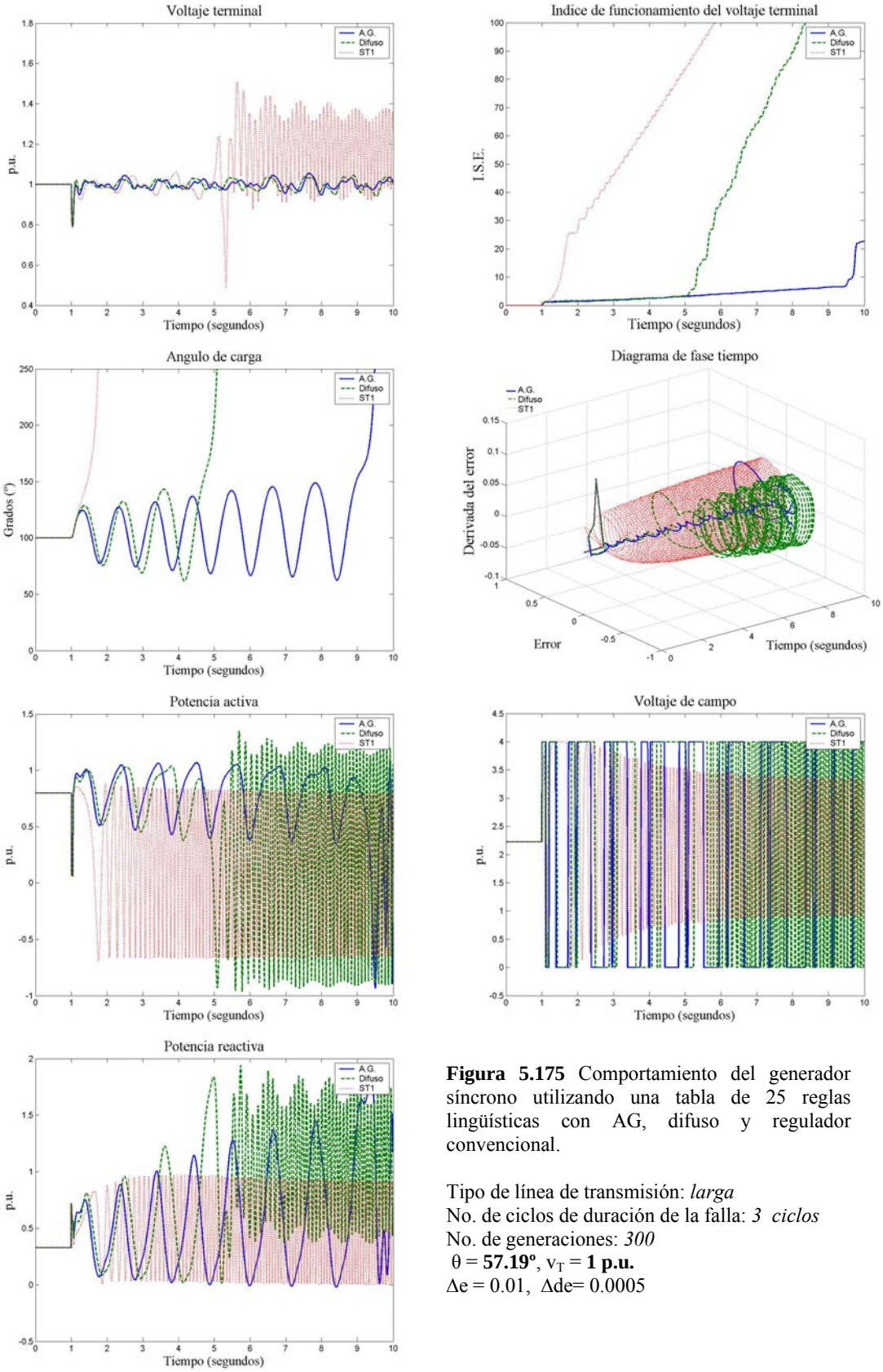


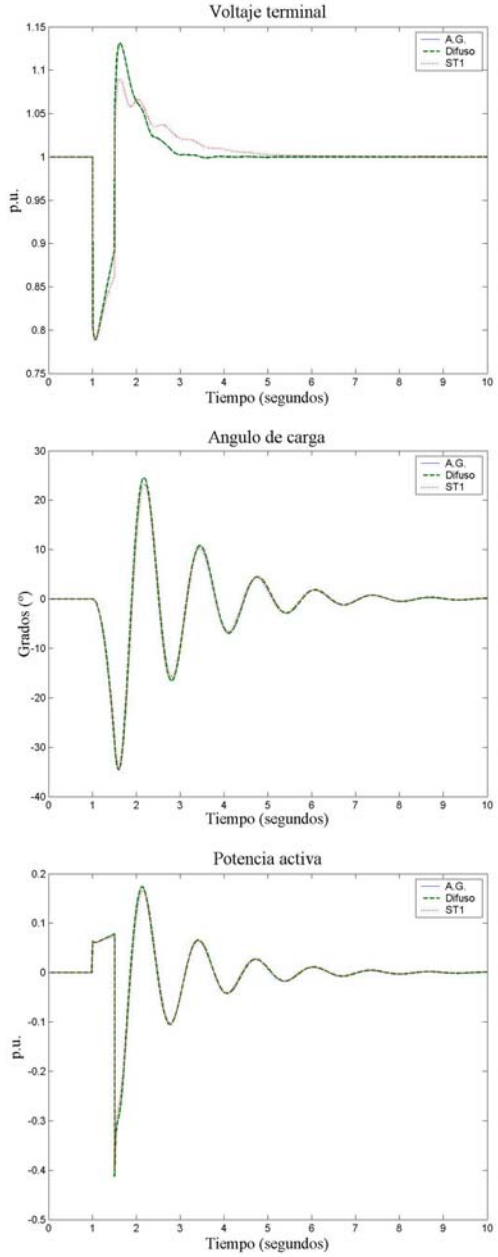

**Figura 5.175** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con AG, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: *3 ciclos*
No. de generaciones: *300*
$\theta$ = **57.19º**, $v_T$ = **1 p.u.**
$\Delta e = 0.01$, $\Delta de = 0.0005$

### *5.6.5 RESULTADOS OBTENIDOS DESPUÉS DE SINTONIZAR UN CONTROLADOR DIFUSO DE 7 FUNCIONES DE MEMBRESÍA POR ALGORITMOS GENÉTICOS SIMULANDO 300 GENERACIONES EMPLEANDO UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN LARGA.*

**Datos:**

- Tipo de línea de transmisión: Larga
- Sintonización: AGS, 300 generaciones
- Tipo de Falla: Corto circuito(Trifásica)
- No. de ciclos de Falla: Indicados



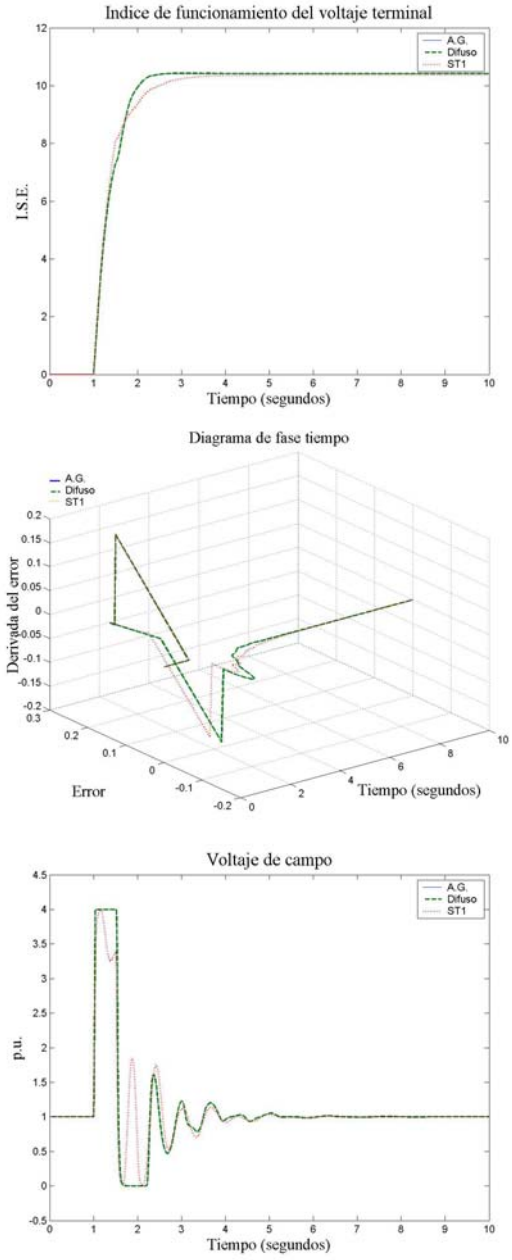




**Figura 5.176** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con AG, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: *30 ciclos*
No. de generaciones: *300*
$\theta = \mathbf{0^o}$, $v_T = \mathbf{1\ p.u.}$
$\Delta e = 0.001$, $\Delta de = 0.0001$

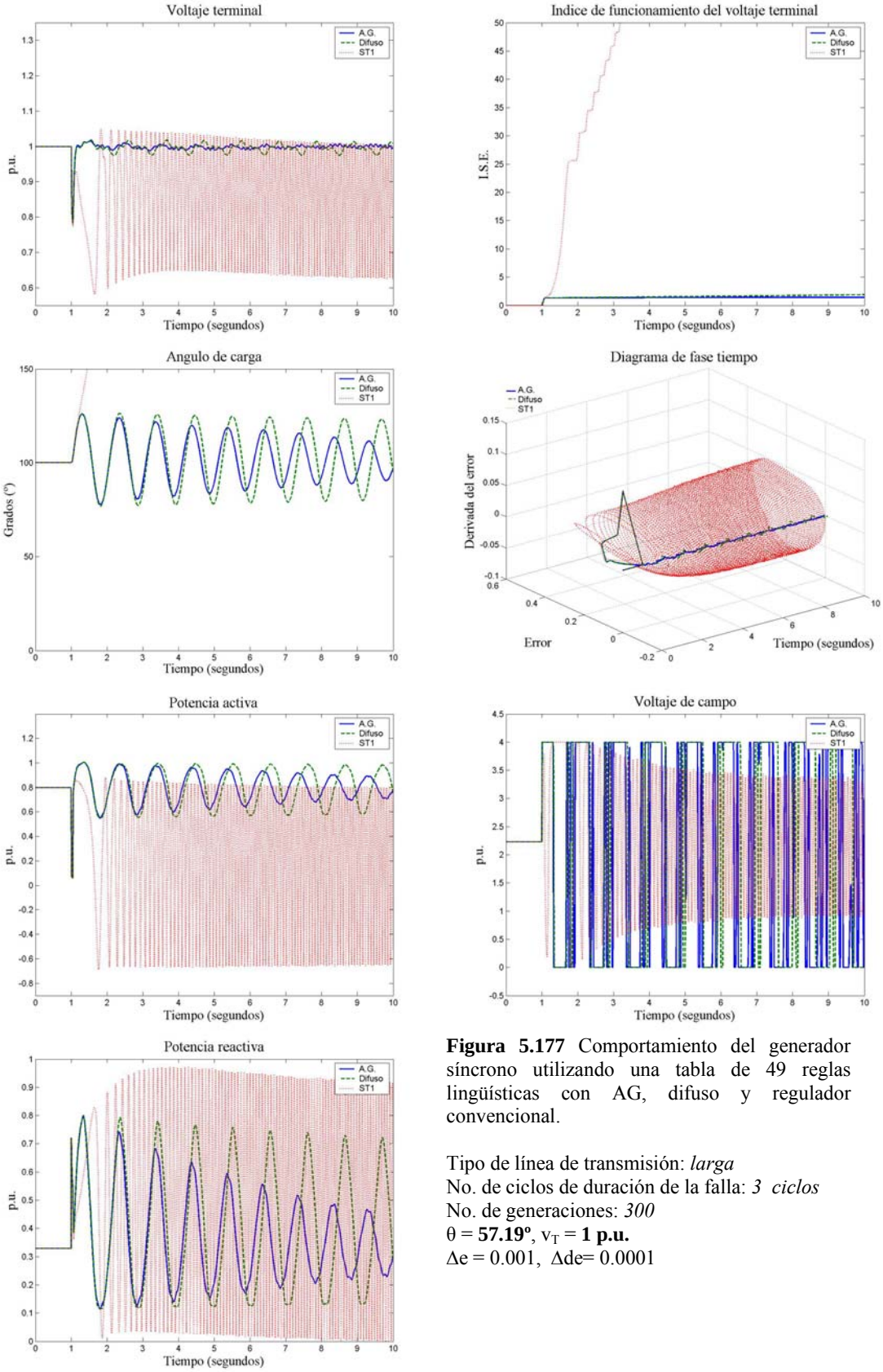



**Figura 5.177** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con AG, difuso y regulador convencional.

Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: *3 ciclos*
No. de generaciones: *300*
$\theta$ = **57.19º**, $v_T$ = **1 p.u.**
$\Delta e$ = 0.001, $\Delta de$= 0.0001

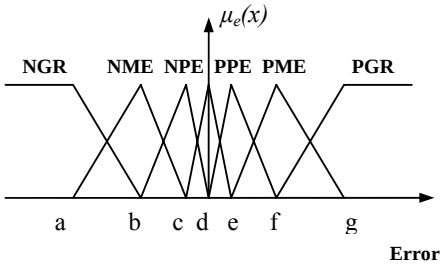
### *5.6.6 FUNCIONES DE MEMBRESÍA RESULTANTES DESPUÉS DE REALIZAR UNA PRUEBA DE SINTONIZACIÓN SOBRE LAS FUNCIONES DE MEMBRESIA DE UN CONTROL DIFUSO CON 7 FUNCIONES DE MEMBRESÍA EMPLEANDO UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN LARGA PARA 300 Y 500 GENERACIONES.*

A continuación se muestran las funciones de membresía resultantes correspondientes a la sección 5.6.3 y 5.6.5 después de aplicar AG con 500 y 300 generaciones:

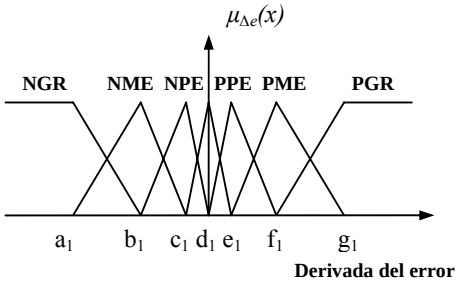
**Datos de la prueba:**

- Tipo de línea de transmisión: Larga
- Tipo de Falla: Corto circuito(Trifásica)
- No. de ciclos de Falla: Indicados en cada figura.

A continuación se presentan las funciones de membresía resultantes después de la aplicación de AG.



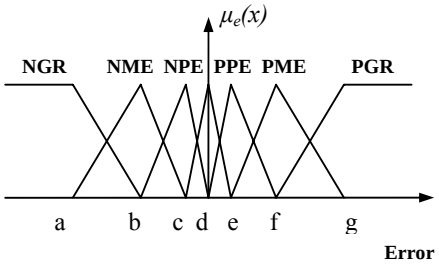

5.81 (a) Funciones de membresía del error.



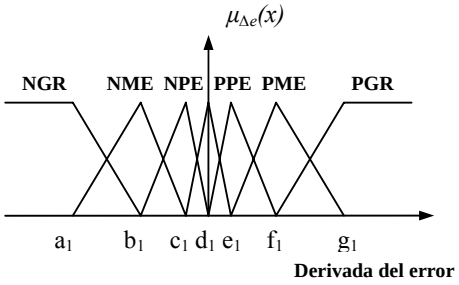

5.181 (b) Funciones de membresía de la derivada del error.

a =-0.09, b =-0.004, c =-0.003, d = 0, e = 0.0035, f = 0.04, g = 0.09
$a_1$ = -0.0025, $b_1$ = -0.0007, $c_1$= -0.0004, $e_1$= 0, $d_1$= 0.0004, $f_1$= 0.0007, $g_1$= 0.0025

**Figura 5.178** Funciones de membresía resultantes después de aplicar AG por selección de rueda-ruleta:
Δe = **0.0001**, Δde=**0.00001**
No. De generaciones: **500,** pc: **0.987,** pm: **0.123**
Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: *30 ciclos*
θ = **0º**, $v_T$ = **1 p.u**.




5.182 (a) Funciones de membresía del error.



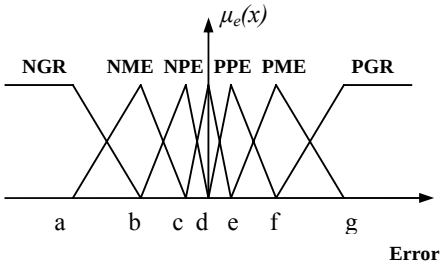

5.182 (b) Funciones de membresía de la derivada del error.

a =-0.09, b =-0.004, c =-0.003, d = 0, e = 0.0035, f = 0.04, g = 0.09

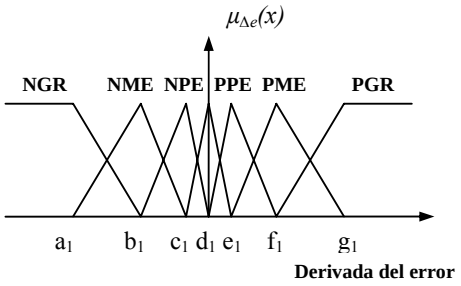
$a_1$ = -0.0025, $b_1$ = -0.0007, $c_1$= -0.0004, $e_1$= 0, $d_1$= 0.0004, $f_1$= 0.0007, $g_1$= 0.0025

**Figura 5.179** Funciones de membresía resultantes después de aplicar AG por selección de rueda-ruleta:

Δe = **0.0001**, Δde=**0.00001**
No. De generaciones: **500,** pc: **0.987,** pm: **0.123**
Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: *15 ciclos*
θ = **15º**, $v_T$ = **1 p.u**.




5.183 (a) Funciones de membresía del error.



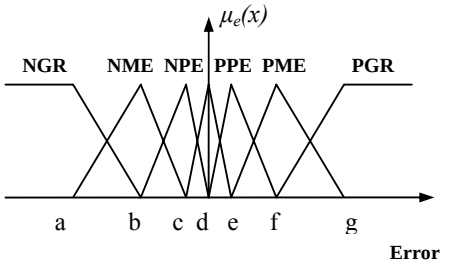

5.183 (b) Funciones de membresía de la derivada del error.

A =-0.1205, b =-0.0505, c =-0.00355, d = 0, e = 0.0035, f = 0.0505, g = 0.1205

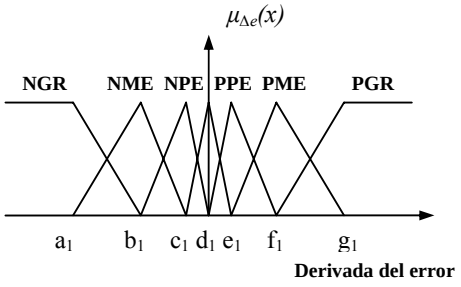
$a_1$ = -0.0022, $b_1$ = -0.0009, $c_1$= -0.0006, $e_1$= 0, $d_1$= 0.0006, $f_1$= 0.0009, $g_1$= 0.0022

**Figura 5.180** Funciones de membresía resultantes después de aplicar AG por selección de rueda-ruleta:

Δe = **0.0001**, Δde=**0.00001**
Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. De generaciones: **500,** pc: **0.987,** pm: **0.123**
No. de ciclos de duración de la falla: *7 ciclos*
θ = **47.9942º**, $v_T$ = **1 p.u**.




5.184 (a) Funciones de membresía del error.



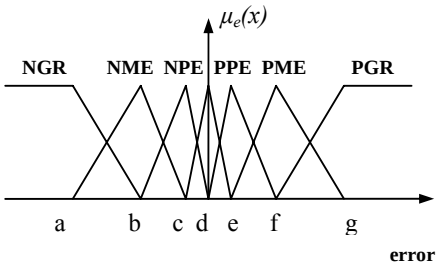

5.184 (b) Funciones de membresía de la derivada del error.

a = -0.1204, b =-0.0504, c =-0.003540, d = 0, e = 0.003540, f = 0.0504, g = 0.1204

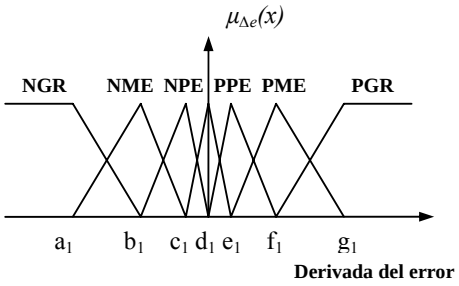
$a_1$ = -0.0009, $b_1$ = -0.0006, $c_1$= -0.0004, $e_1$= 0, $d_1$= 0.0004, $f_1$= 0.0006, $g_1$= 0.0009

**Figura 5.181** Funciones de membresía resultantes después de aplicar AG por selección de rueda-ruleta:

Δe = **0.0001**, Δde=**0.00001**
No. De generaciones: **500,** pc: **0.987,** pm: **0.123**
Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: *5 ciclos*
θ = **52.3999º**, $v_T$ = **1 p.u**.




5.185 (a) Funciones de membresía del error.



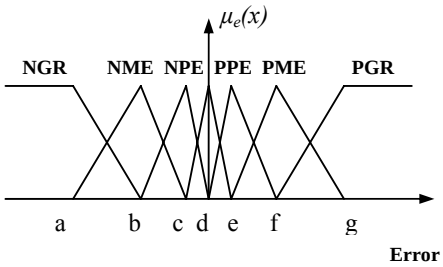

5.185 (b) Funciones de membresía de la derivada del error.

a =-0.1214, b =-0.0514, c =-0.003640, d = 0, e = 0.003640, f = 0.0514, g = 0.1214

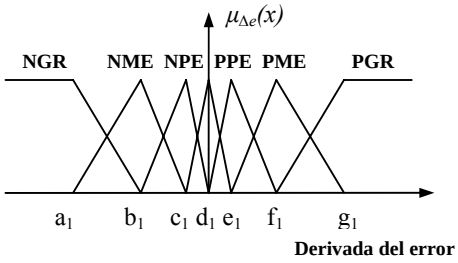
$a_1$ = -0.0009, $b_1$ = -0.0007, $c_1$= -0.0004, $e_1$= 0, $d_1$= 0.0004, $f_1$= 0.0007, $g_1$= 0.0009

**Figura 5.182** Funciones de membresía resultantes después de aplicar AG por selección de rueda-ruleta:

Δe = **0.0001**, Δde=**0.00001**
No. De generaciones: **500,** pc: **0.987,** pm: **0.123**
Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: *4 ciclos*
θ = **57.19º**, $v_T$ = **1 p.u**.




5.186 (a) Funciones de membresía del error.

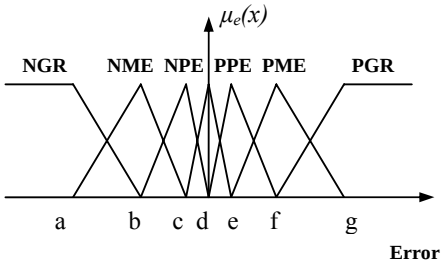



5.186 (b) Funciones de membresía de la derivada del error.

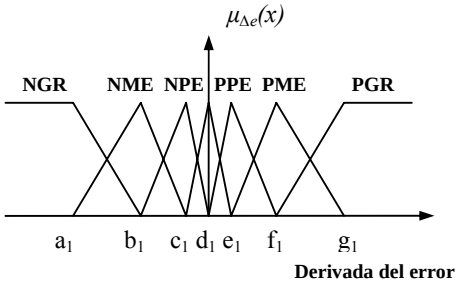
a =-0.09, b =-0.004, c =-0.003, d = 0, e = 0.0035, f = 0.04, g = 0.09
$a_1$ = -0.0025, $b_1$ = -0.0007, $c_1$= -0.0004, $e_1$= 0, $d_1$= 0.0004, $f_1$= 0.0007, $g_1$= 0.0025

**Figura 5.183** Funciones de membresía resultantes después de aplicar AG por selección de rueda-ruleta:

Δe = **0.0001**, Δde=**0.00001**
No. De generaciones: **300,** pc: **0.987,** pm: **0.123**
Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: *30 ciclos*
θ = **0º**, $v_T$ = **1 p.u**.



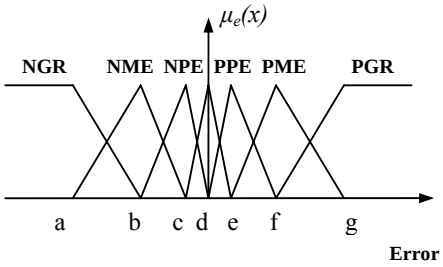

5.187 (a) Funciones de membresía del error.



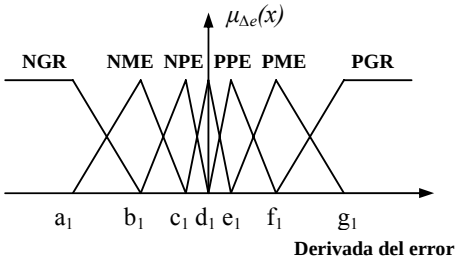

5.187 (b) Funciones de membresía de la derivada del error.
a =-0.09, b =-0.004, c =-0.003, d = 0, e = 0.0035, f = 0.04, g = 0.09
$a_1$ = -0.0020, $b_1$ = -0.0009, $c_1$= -0.0004, $e_1$= 0, $d_1$= 0.0004, $f_1$= 0.0009, $g_1$= 0.0022

**Figura 5.184** Funciones de membresía resultantes después de aplicar AG por selección de rueda-ruleta:

Δe = **0.0001**, Δde=**0.00001**
No. De generaciones: **300,** pc: **0.987,** pm: **0.123**
Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: *15 ciclos*
θ = **15º**, $v_T$ = **1 p.u**.



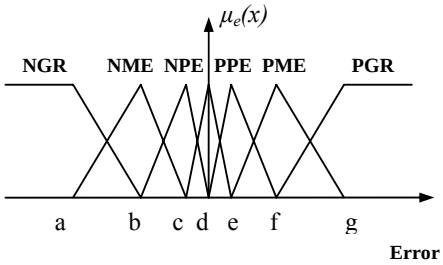

5.188 (a) Funciones de membresía del error.



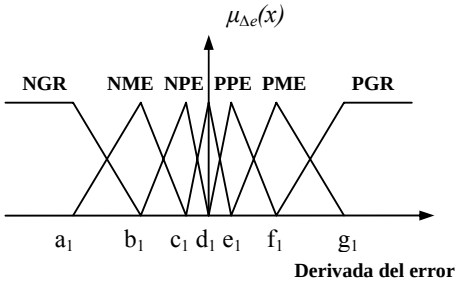

5.188 (b) Funciones de membresía de la derivada del error.
a =-0.09, b = -0.044, c =-0.003, d = 0, e = 0.003, f = 0.04, g = 0.09
$a_1$ = -0.0025, $b_1$ = -0.0007, $c_1$= -0.0004, $e_1$= 0, $d_1$= 0.0004, $f_1$= 0.0007, $g_1$= 0.0025

**Figura 5.185** Funciones de membresía resultantes después de aplicar AG por selección de rueda-ruleta:

Δe = **0.0001**, Δde=**0.00001**
Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. De generaciones: **300,** pc: **0.987,** pm: **0.123**
No. de ciclos de duración de la falla: *7 ciclos*
θ = **47.9942º**, $v_T$ = **1 p.u**.




5.189 (a) Funciones de membresía del error.



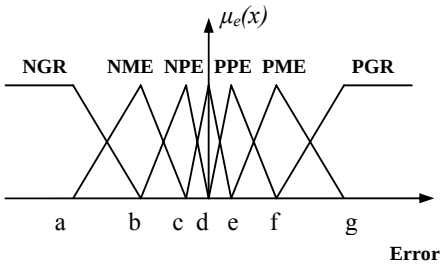

5.189 (b) Funciones de membresía de la derivada del error.

a =-0.1204, b =-0.0504, c =-0.003540, d = 0, e = 0.003540, f = 0.0504, g = 0.1204

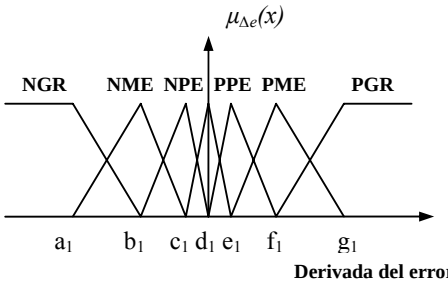
$a_1$ = -0.0009, $b_1$ = -0.0007, $c_1$= -0.0004, $e_1$= 0, $d_1$= 0.0004, $f_1$= 0.0007, $g_1$= 0.0009

**Figura 5.186** Funciones de membresía resultantes después de aplicar AG por selección de rueda-ruleta:

$\Delta e$ = **0.0001**, $\Delta de$=**0.00001**
No. De generaciones: **300,** pc: **0.987,** pm: **0.123**
Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: *5 ciclos*
$\theta$ = **52.3999º**, $v_T$ = **1 p.u**.




5.189 (a) Funciones de membresía del error.




5.189 (b) Funciones de membresía de la derivada del error.

a =-0.1207, b =-0.0507, c =-0.003570, d = 0, e = 0.003570, f = 0.0507, g = 0.1207

$a_1$ = -0.0009, $b_1$ = -0.0007, $c_1$= -0.0004, $e_1$= 0, $d_1$= 0.0004, $f_1$= 0.0007, $g_1$= 0.0009

**Figura 5.187** Funciones de membresía resultantes después de aplicar AG por selección de rueda-ruleta:

$\Delta e$ = **0.0001**, $\Delta de$=**0.00001**
No. De generaciones: **300,** pc: **0.987,** pm: **0.123**
Tipo de línea de transmisión: *larga*
No. de ciclos de duración de la falla: *4 ciclos*
$\theta$ = **57.19º**, $v_T$ = **1 p.u**.

### *5.6.7 ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LOS ALGORITMOS GENÉTICOS SOBRE LA OPTIMIZACIÓN DEL CONTROL DIFUSO.*

En esta sección se presentaron varias figuras correspondientes al comportamiento del generador después de simular un disturbio, dos en particular que muestran el comportamiento del generador partiendo desde un punto de operación en vacío hasta un punto donde la potencia activa esta cercana a 0.8 p.u. La figura 5.148 y 5.168 ambas simulaciones describen un comportamiento óptimo cuando es aplicada la técnica de optimización algoritmos genéticos. La convergencia de la solución con respecto a AG es debida principalmente a la explotación/exploración que produce la mutación y el cruzamiento y el espacio de búsqueda manejado en este trabajo permite que ($G_{máx}$) sea lo más grande posible evitando que los individuos $C_{\mu}$ sean los menos aptos por la convergencia prematura de AG. Se propone manejar dos tamaños de número de generaciones 300 y 500 generaciones, la principal razón es que cuando se simulo el generador en vacío con una duración de falla de 30 ciclos los AG siempre convergen cuando el número de generaciones es mayor a 250 y menor 500 generaciones, permitiendo que *P* sea los intervalos adecuados para el control difuso.

El algoritmo genético simple empleado en esta tesis propone una selección tipo rueda-ruleta [8] proporcional al comportamiento de cada individuo, AG resulto ser una técnica efectiva en descifrar los intervalos óptimos necesarios en cada punto de operación. Los resultados mostrados en 5.6.3 observan varios puntos de trabajo del generador similares en los valores de cada intervalo, no necesariamente AG proyecta una convergencia temprana a un valor en los intervalos, esto se debe al valor establecido para la probabilidad de mutación y el espacio de búsqueda. Una desventaja que permite un mal funcionamiento de AG es trabajar sobre un dominio pequeño las estructuras empleadas en este trabajo son de un tamaño mediano ya que se cuentan con 192 elementos de prueba como posibles combinaciones entre las funciones del error y de la derivada del error, se cuentan 192 porque se tienen 64 para cada variable de la base de cada función triangular, por lo tanto P es igual a 64x3 en cada simulación de AG. Se debe tener precaución en la elección del tipo de función de membresía y la forma de recorrer hacia la izquierda o derecha las variables que describen los intervalos de la base de las funciones.

AG no puede ser enfocado sobre la tabla de reglas lingüísticas debido a la complejidad del dominio y principalmente al tamaño del espacio de búsqueda X, aventajado por TS, AG limita su capacidad a espacios relativamente grandes en el control difuso planteado aquí, razón por la cual AG es solo aplicado a la optimización de las funciones de membresía y no a tabla de reglas lingüísticas.

Se proponen 2 tamaños del número de generaciones para poder observar que tan rápido converge AG a la solución óptima, una forma de saber si tal valor de intervalo es el correcto es probar el valor proporcionado por AG al final de la simulación si es un valor incorrecto ocurre lo siguiente:

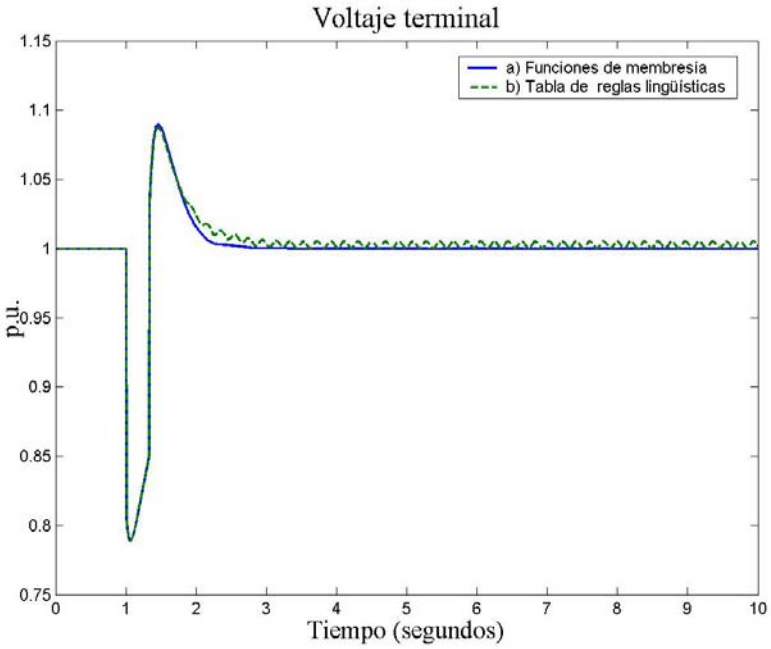



**Figura 5.188** Comparación del comportamiento del voltaje terminal cuando se aplica una optimización sobre las funciones de membresía y una optimización sobre la tabla de reglas.

En la figura 5.188 se muestran dos simulaciones ambas utilizaron los mismos valores en las funciones de membresía pero diferentes valores sobre las acciones lingüísticas en la tabla de reglas, en la simulación (a) se aplica AG y en la simulación (b) no se aplica AG, la optimización sobre las funciones de membresía logra establecer los intervalos adecuados al momento de la falla y después de la falla permitiendo saber cuales serán los intervalos más cercanos a los óptimos. Los valores propuestos aquí son para la probabilidad de cruzamiento de 0.987 (pc) y para la probabilidad de mutación de 0.123 (pm), la pm no se establece más pequeña debido a pretender mayor diversificación sobre rutas de soluciones vecinas que permitan acercarse más al control difuso a la mejor solución. La sintonización sobre funciones no logra ser más efectiva que la sintonización sobre la tabla de reglas esto se debe a que existen muchas más opciones en las funciones de membresía para cada iteración que las proporcionadas en una tabla de reglas. En la figura 5.184 y 5.189 las funciones de membresía, ambas corresponden al mismo punto de operación pero la optimización aplicada difiere en el número de iteraciones, para la primera se estableció de 500 generaciones para la segunda 300, se puede ver que el resultado final de las funciones de membresía fueron algo diferente debido a que los AG no habían aún convergido en una solución, dependiendo principalmente de los parámetros establecidos para AG. Cuando se emplea una optimización por funciones de membresía los valores establecidos en cada muestreo son más flexibles que los valores optimizados por TS esta característica permite que AG y TS dirigidos a las funciones de membresía sean más eficientes en vacío que TS enfocado a la tabla de reglas lingüísticas. Cuando se emplean dos tipos de líneas de transmisión se puede observar que el regulador convencional se comporta de una manera muy semejante en la regulación de voltaje cuando se trata de una línea de transmisión corta; esto se debe a las características propias de la línea y del generador.

## *5.7 RESULTADOS OBTENIDOS DESPUÉS DE APLICAR LOS ALGORITMOS GENÉTICOS Y LA BÚSQUEDA POR TABÚ PARA LA SINTONIZACIÓN DE LAS FUNCIONES DE MEMBRESÍA Y LA TABLA DE REGLAS LINGÜÍSTICAS.*

### *5.7.1 INTRODUCCIÓN.*

La forma de aplicar ambas técnicas es tal como se muestra en el capítulo 4, el primer paso lo dará AG sobre la optimización de las funciones de membresía y seguirá TS sobre la tabla de reglas lingüísticas, la principal razón de establecer esta secuencia es evitar que ambas técnicas conviertan el control difuso en un control difuso inconsistente lo cual se refleja en pequeñas oscilaciones del voltaje terminal tal como se muestra en la figura 5.210 de esta sección, se considerarán para las simulaciones de esta sección 5 y 7 funciones de membresía. La sección 5.7.2 se muestran todos aquellos resultados obtenidos utilizando una sintonización por algoritmos genéticos y búsqueda por tabú sobre diversos puntos de operación. Se muestran resultados acerca del comportamiento del generador trabajando desde un punto de operación en vacío hasta alcanzar una potencia activa igual a 0.788 p.u. con una duración de la simulación de 150 segundos.

### *5.7.2 RESULTADOS OBTENIDOS DURANTE LA APLICACIÓN DE ALGORITMOS GENÉTICOS Y BÚSQUEDA POR TABÚ SOBRE UNA TABLA DE 25 REGLAS LINGÜÍSTICAS Y 5 FUNCIONES DE MEMBRESÍA.*

#### *5.7.2.1 INTRODUCCIÓN.*

En esta sección se presentan los resultados obtenidos después de aplicar los algoritmos genéticos y la búsqueda por tabú en diversos puntos de operación como prueba empleando solo un criterio de aspiración para la búsqueda por tabú y 5 funciones de membresía para el controlador difuso. A continuación se presenta una prueba incrementado la carga desde un punto de vacío observando el comportamiento en el voltaje en terminales con los siguientes datos:

La prueba contiene los siguientes parámetros con respecto TS y AG:

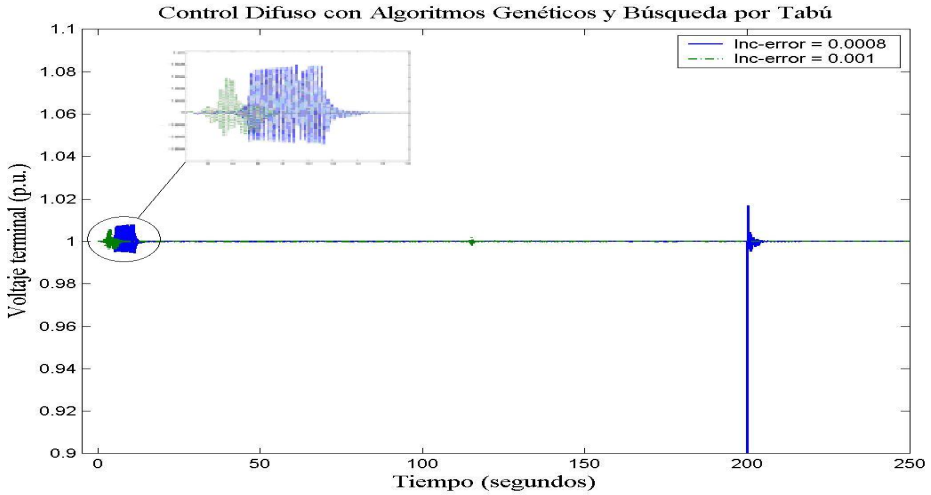
**Datos referentes a la búsqueda por tabú:**

Plazo de término corto: **0.125 seg**.
Plazo de término largo: **0.64 seg.**
Tabú-sumado: **0.125 seg.**
Tabú-eliminado: **1 seg.**
Criterio de Influencia: **Alta.**
No. de funciones de membresía: **5**

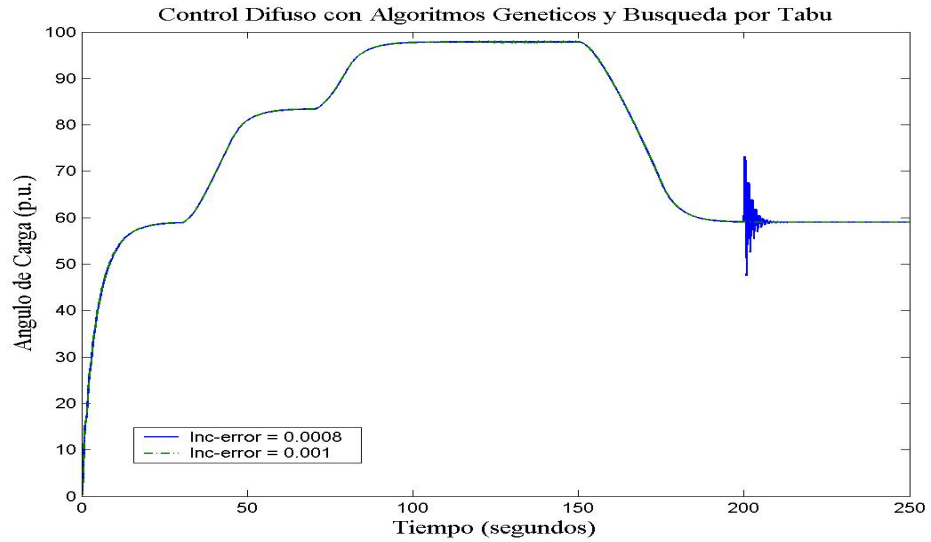
**Datos referentes a los algoritmos genéticos:**

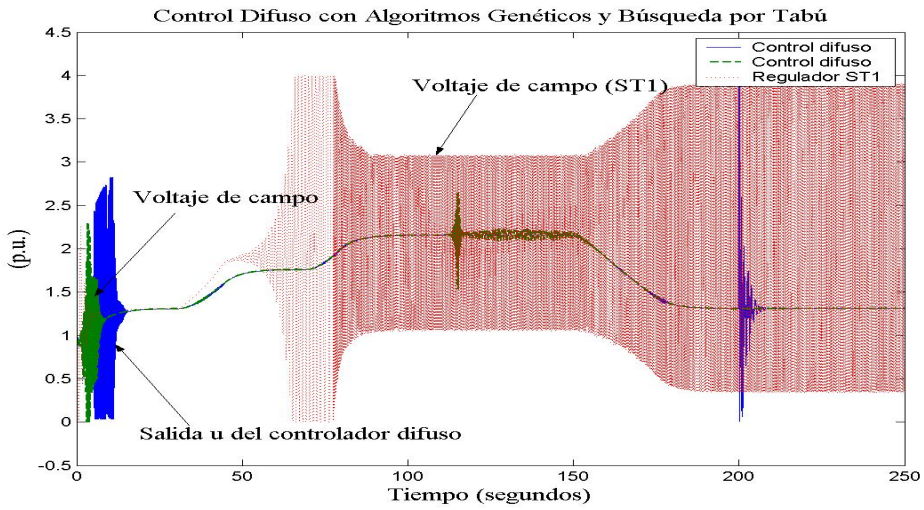
No. de Generaciones: **50000**
Tamaño de población: **6**
Longitud del cromosoma: **18**
Criterio de selección: Rueda-ruleta
$\Delta de$ = **0.0001**

$\Delta e$ = **0.0008**
pc (probabilidad de cruzamiento)= **0.987**
pm (probabilidad de mutación) = **0.123**

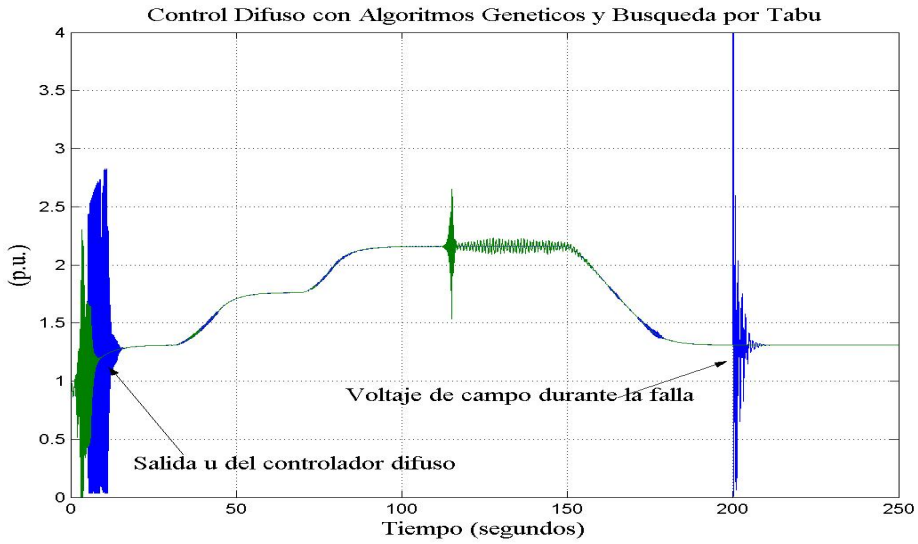


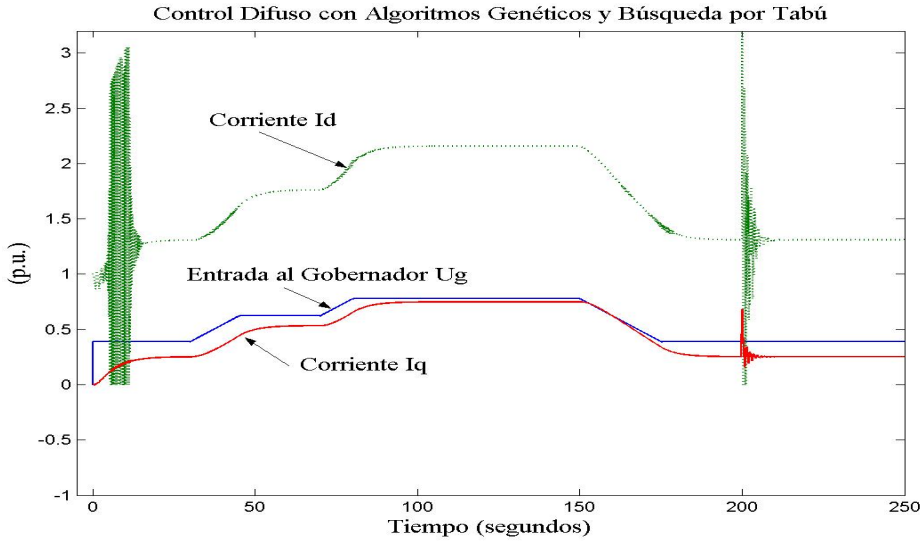

Comportamiento del voltaje en terminales empleando dos incrementos (Δe) diferentes en la sintonización de funciones.

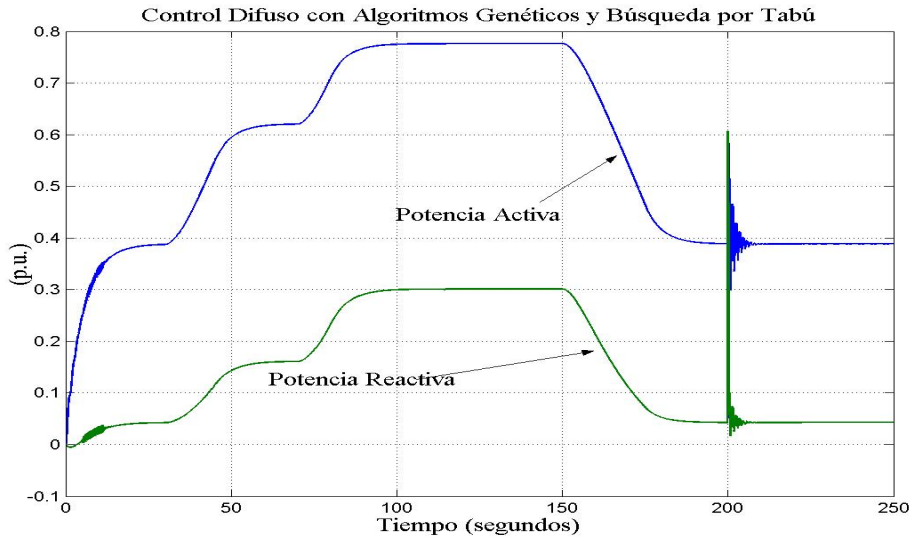


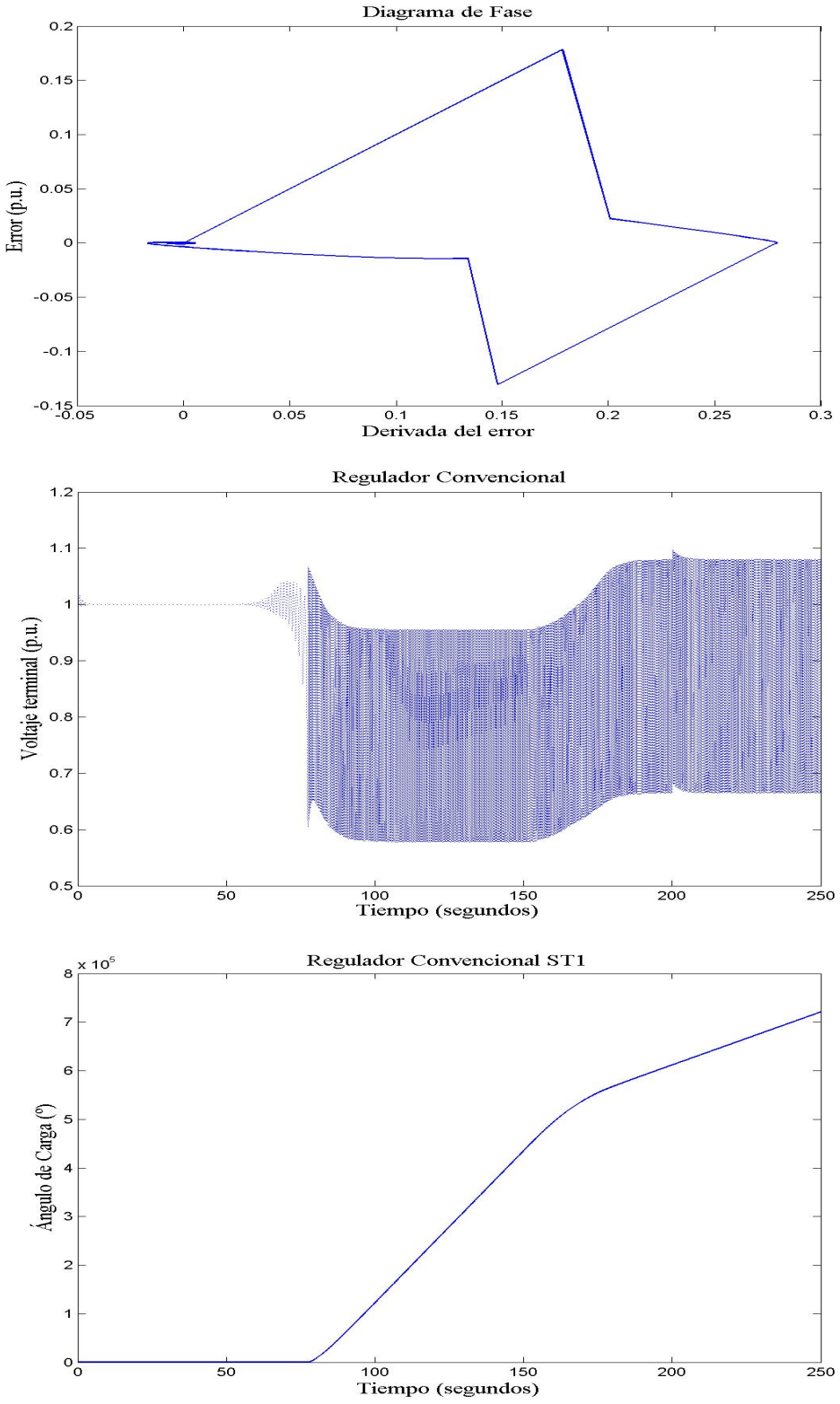

5.189 (a) Comportamiento del generador síncrono empleando AG y TS simulando una falla cuando t = 200s.



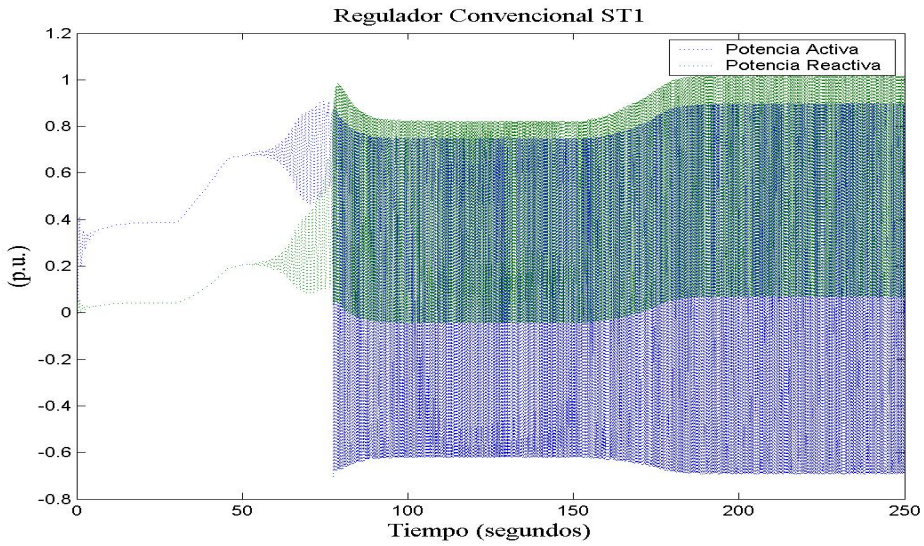



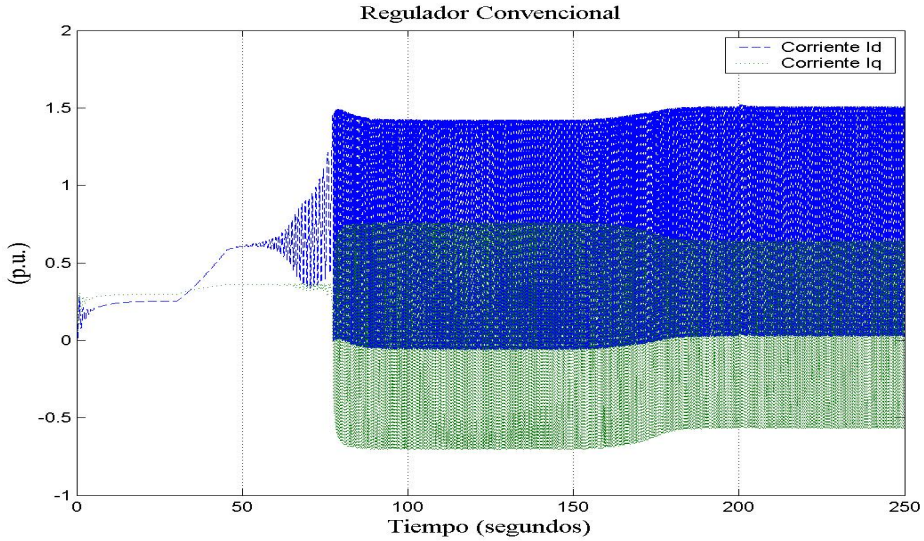

5.189 (b) Comportamiento del generador síncrono empleando AG y TS.

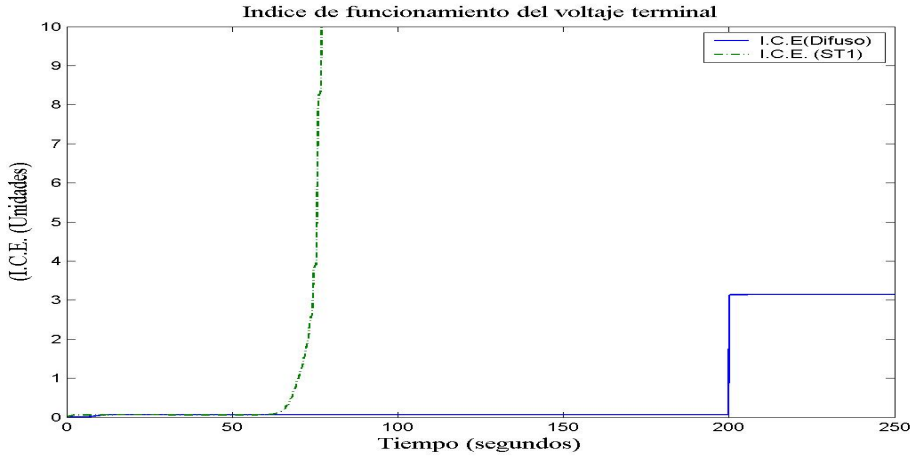



5.189 (c) Comportamiento del generador síncrono empleando AG y TS.

Las funciones de membresía y la tabla de reglas lingüísticas finales son presentadas en la figura 5.192 ya que se trata de la misma prueba, una vez alcanzado cierto valor en la potencia activa y se decremento la carga no existe una mejor solución que la considerada por la lógica difusa.




5.189 (d) Comportamiento del generador síncrono empleando AG y TS.

**Figura 5.189** Comportamiento del generador síncrono aplicando AG y TS

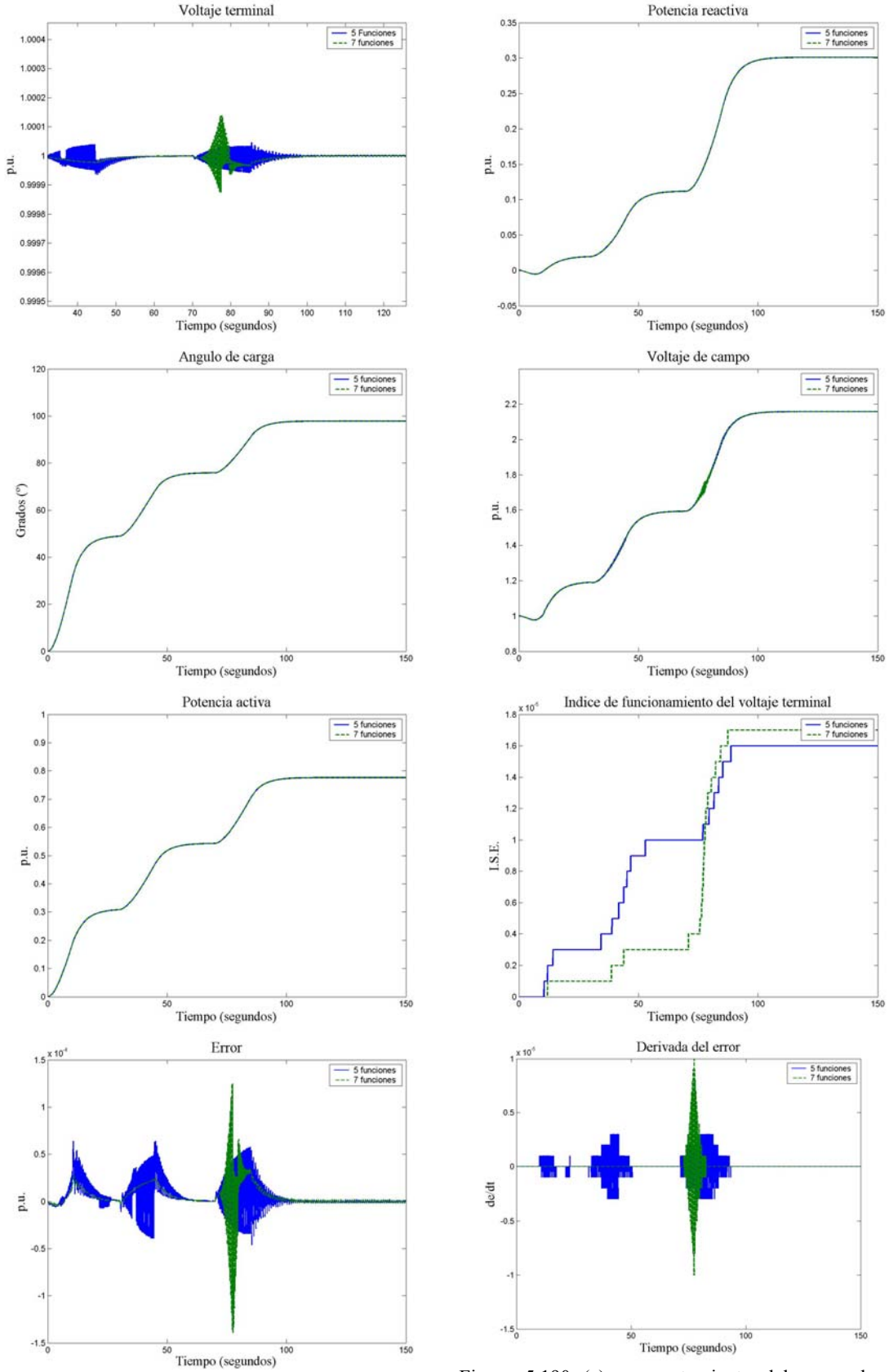
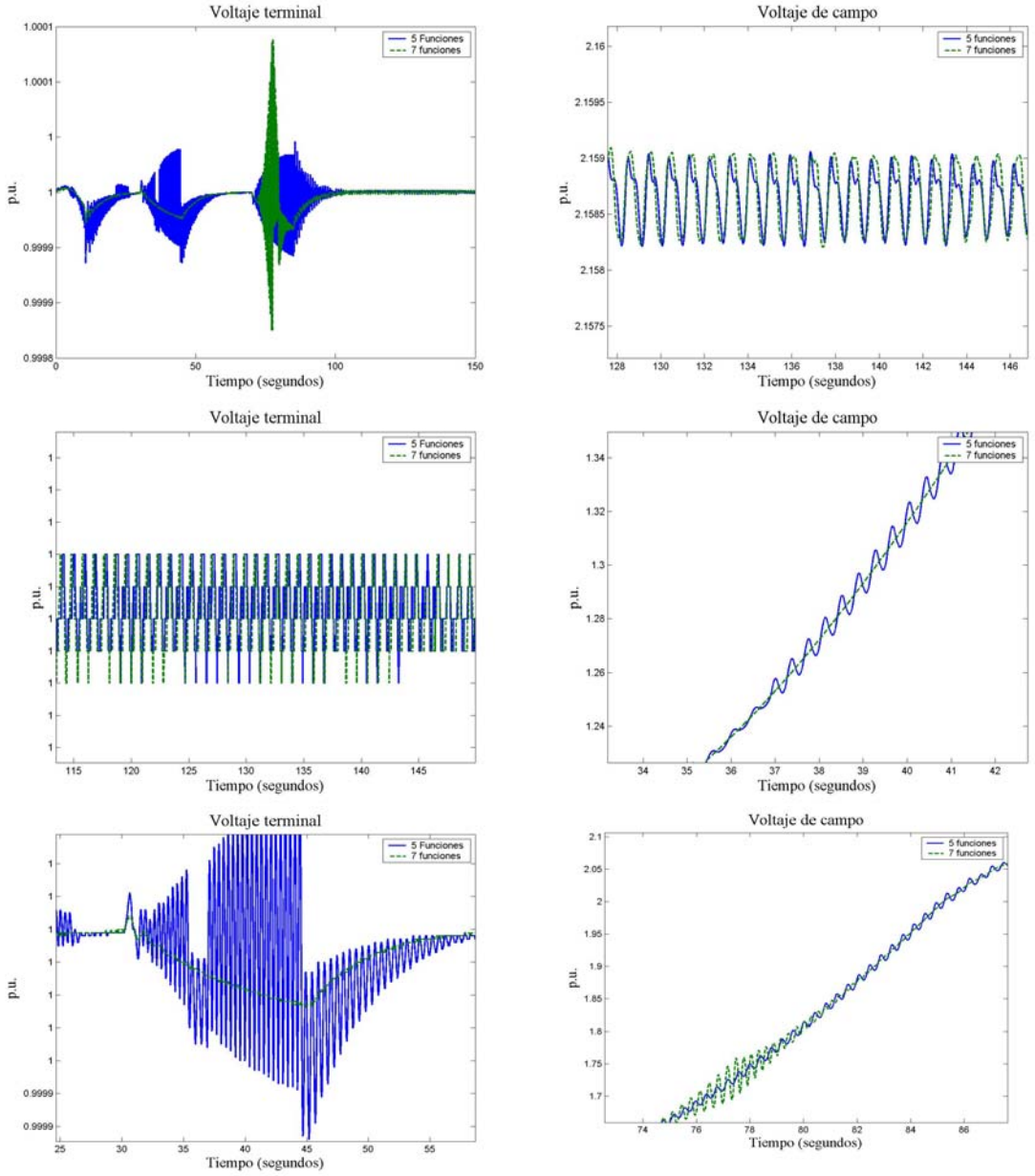


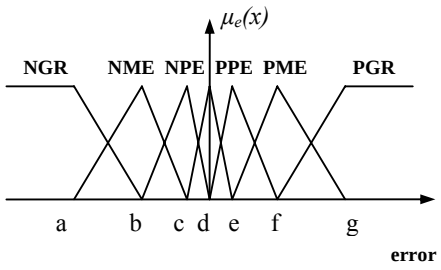

Figura 5.190 (a) comportamiento del generador síncrono utilizando AG y TS.




5.190 (b) Comportamiento del generador síncrono empleando TS y AG con una duración de la simulación de 150 segundos.

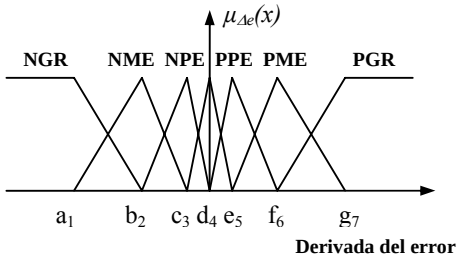
**Figura 5.190** Comportamiento del generador síncrono empleando AG/TS con 5 y 7 funciones de membresía.

Los intervalos propuestos para la simulación en base a la aplicación de TS y AG de una forma individual son para 7 funciones de membresía como se muestra en la figura 5.191 (a) y (b):




5.191 (a) Funciones de membresía para el error

Donde $a_1 = -0.005$, $b_1 = -0.0016$, $c_1 = -0.00085$, $d_1 = 0$, $e_1 = 0.00085$, $f_1 = 0.0016$, $g_1 = 0.005$




5.191 (b) Funciones de membresía para la derivada del error.

**Figura 5.191** Funciones de membresía iniciales para el controlador difuso con 49 reglas lingüísticas correspondientes a la prueba de la figura 5.190

Donde: $a = -0.3$, $b = -0.2$, $c = -0.1$, $d = 0$, $e = 0.1$, $f = 0.2$, $g = 0.3$

Donde las funciones de membresía resultantes son

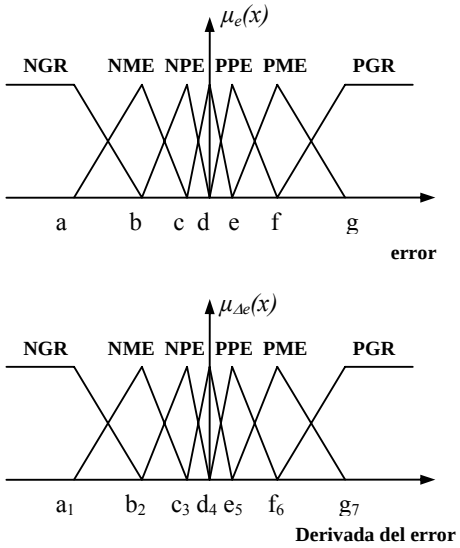
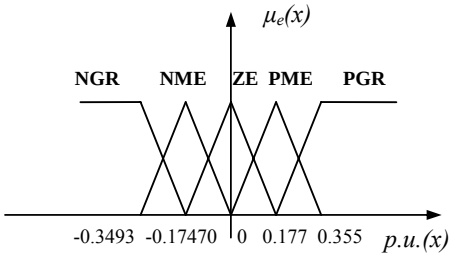


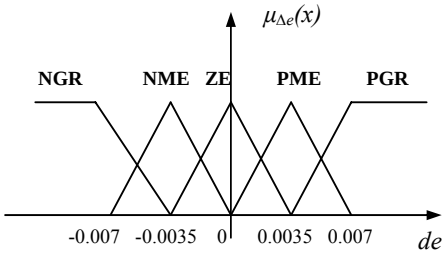

Figura 5.192 (a) Funciones de membresía resultante para un controlador difuso de 49 reglas lingüísticas

Donde los valores correspondientes a los intervalos son los siguientes:

$a = -0.124$, $b = -0.0540$, $c = -0.039$, $d = 0$, $e = 0.039$, $f = 0.0540$, $g = 0.124$
$a_1 = -0.0012$, $b_1 = -0.0010$, $c_1 = -0.0008$, $d_1 = 0$, $e_1 = 0.0008$, $f_1 = 0.0010$, $g_1 = 0.0012$




Funciones de membresía del error para un control difuso de 25 reglas lingüísticas.
5.192 (b) Funciones de membresía utilizadas durante la prueba.




5.192 (c) Funciones de membresía de la derivada del error

- Las tablas de reglas lingüísticas resultante son:

| ***Δe*** \| ***e*** | **NGR** | **NME** | **ZE** | **PME** | **PGR** |
|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | NG | NG | NG | NM | CE |
| **NME** | NG | NM | NP | CE | AP |
| **ZE** | NG | NP | CE | **AG** | AG |
| **PME** | NM | CE | AM | AM | AG |
| **PGR** | CE | AM | AG | AG | AG |

Tabla de 25 reglas lingüísticas resultantes y funciones de membresía resultantes para 5 y 7 funciones después de simular el generador síncrono durante 150 segundos ante un incremento de UG.

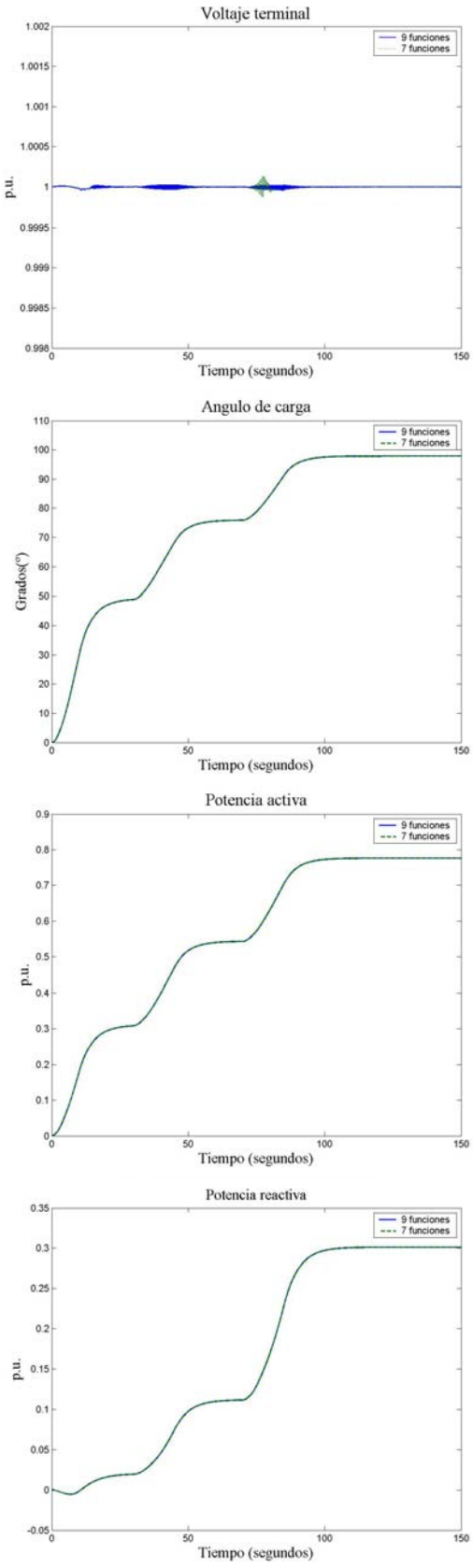
| ***Δe*** \| ***e*** | **NGR** | **NME** | **NPE** | **ZE** | **PPE** | **PME** | **PGR** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | BG | BG | BG | BM | BM | BP | **CE** |
| **NME** | BG | BG | BM | BM | BP | **CE** | AM |
| **NPE** | BG | BM | BM | **BM** | **CE** | AP | AM |
| **ZE** | BM | BM | BM | **CE** | **AM** | AM | AM |
| **PPE** | BM | BP | CE | **AM** | AM | AM | AG |
| **PME** | BP | **CE** | AP | AM | AM | AG | AG |
| **PGR** | **CE** | AP | AM | AM | AG | AG | AG |

Tablas de reglas lingüísticas resultantes para 49 reglas lingüísticas.

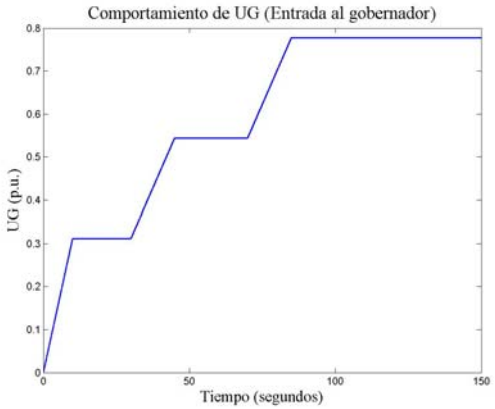
5.192 (d) Funciones de membresía y tabla de reglas resultantes después de aplicar TS y AG.

**Figura 5.192.** Resultados obtenidos después de aplicar TS y AG desde un punto de vacío hasta un valor de la potencia activa de 0.788 p.u. en menos de 100 segundos de simulación para 5 y 7 funciones de membresía.

Los resultados mostrados en la figura 5.192 resaltan el mejoramiento causado por AG y TS aplicados conjuntamente para la sintonización de las funciones de membresía; la figura 5.193 se muestra el comportamiento de un controlador difuso sintonizado por la búsqueda por tabú (para 9 funciones de membresía) y se puede observar que al alcanzar un punto cercano donde la potencia activa es igual a 0.788 p.u. y con mas segundos de simulación el voltaje describe oscilaciones que son eliminadas con la aplicación de AG y TS tal como se muestra en la figura 5.193 en menor tiempo de simulación.




5.193 (a) Comportamiento del generador empleando AG/TS para la sintonización de un controlador difuso con 7 funciones de membresía.




Incremento de UG.

| $\Delta e$ \| $e$ | **NGR** | **NME** | **NPE** | **ZE** | **PPE** | **PME** | **PGR** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | BG | BG | BG | BM | BM | BP | **CE** |
| **NME** | BG | BG | BM | BM | BP | **CE** | AM |
| **NPE** | BG | BM | BM | **BM** | **CE** | AP | AM |
| **ZE** | BM | BM | BM | **CE** | **AM** | AM | AM |
| **PPE** | BM | BP | CE | **AM** | AM | AM | AG |
| **PME** | BP | **CE** | AP | AM | AM | AG | AG |
| **PGR** | **CE** | AP | AM | AM | AG | AG | AG |

Tablas de reglas lingüísticas resultantes para 49 reglas lingüísticas.
49 reglas lingüísticas.

| $\Delta e$ \| $e$ | **NGR** | **NME** | **NPE** | **ZE** | **PPE** | **PME** | **PGR** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | BG | BG | BG | BM | BM | BP | **CE** |
| **NME** | BG | BG | BM | BM | BP | **CE** | AM |
| **NPE** | BG | BM | BM | **BM** | **CE** | AP | AM |
| **ZE** | BM | BM | BM | **CE** | **AM** | AM | AM |
| **PPE** | BM | BP | CE | **AM** | AM | AM | AG |
| **PME** | BP | **CE** | AP | AM | AM | AG | AG |
| **PGR** | **CE** | AP | AM | AM | AG | AG | AG |

Diagrama de fase-lingüístico.

5.193 (b) Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 y 81 reglas lingüísticas con TS/AG, TS por entorno partiendo desde vacío hasta un punto donde la potencia activa es igual a 0.788 p.u.

**Figura 5.193.** Resultados comparativos entre un controlador difuso de 7 funciones de membresía sintonizado por AG/TS y un controlador difuso de 81 reglas lingüísticas sintonizado por TS por entorno con las siguientes características:

Tipo de línea de transmisión: **larga**
Criterio de aspiración: ***Alta influencia***.
No. De generaciones: **50000**
Tipo de selección: **Rueda-ruleta**
Pc=**0.987**, pm = **0.123**
$\Delta$de = **0.0001**
$\Delta$e = **0.0008**

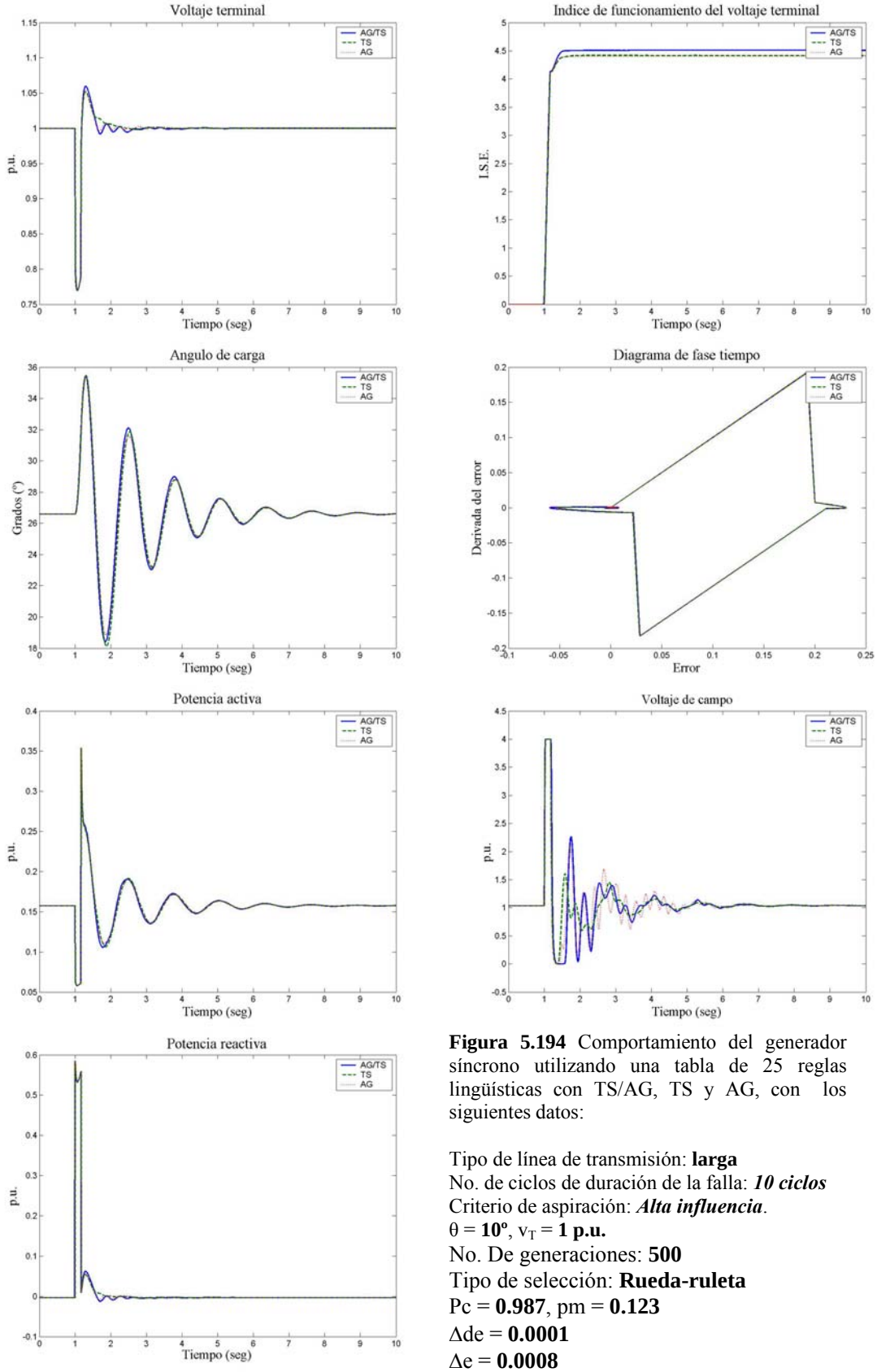



**Figura 5.194** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con TS/AG, TS y AG, con los siguientes datos:

Tipo de línea de transmisión: **larga**
No. de ciclos de duración de la falla: ***10 ciclos***
Criterio de aspiración: ***Alta influencia***.
$\theta$ = **10º**, $v_T$ = **1 p.u.**
No. De generaciones: **500**
Tipo de selección: **Rueda-ruleta**
Pc = **0.987**, pm = **0.123**
$\Delta$de = **0.0001**
$\Delta$e = **0.0008**

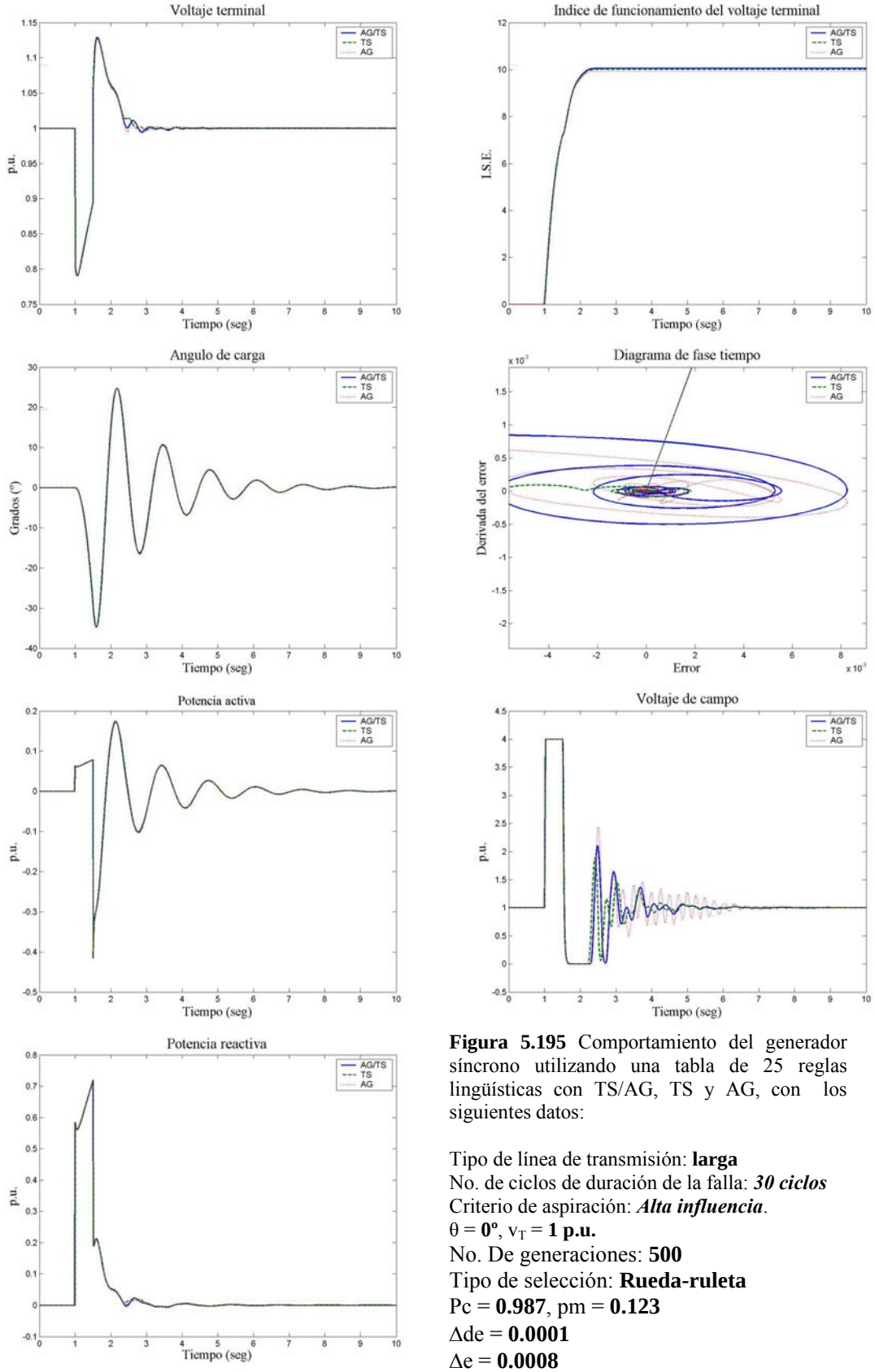



**Figura 5.195** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con TS/AG, TS y AG, con los siguientes datos:

Tipo de línea de transmisión: **larga**
No. de ciclos de duración de la falla: ***30 ciclos***
Criterio de aspiración: ***Alta influencia***.
$\theta$ = **0º**, $v_T$ = **1 p.u.**
No. De generaciones: **500**
Tipo de selección: **Rueda-ruleta**
Pc = **0.987**, pm = **0.123**
$\Delta de$ = **0.0001**
$\Delta e$ = **0.0008**

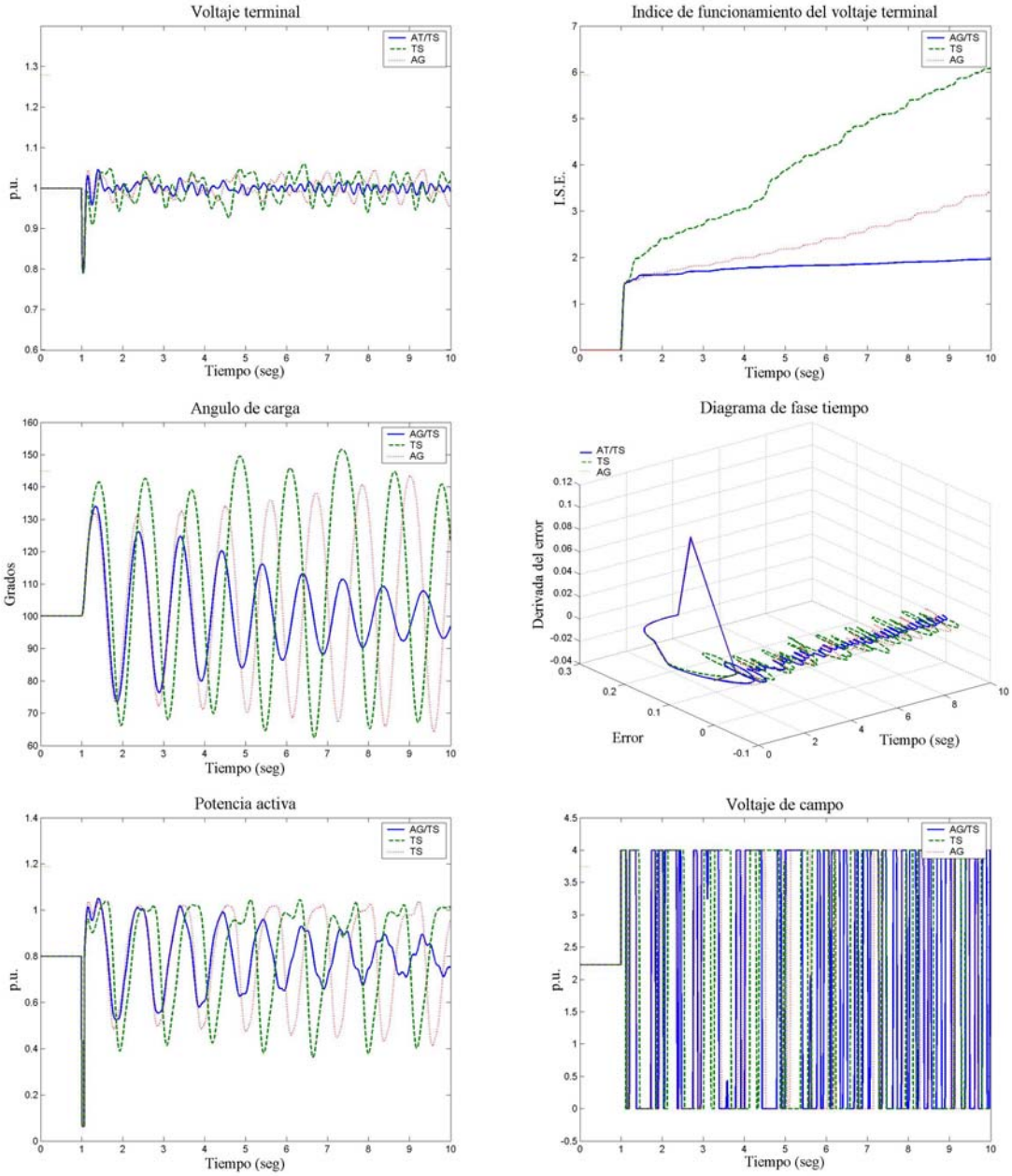



**Figura 5.196** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con TS/AG, TS y AG, con los siguientes datos:

Tipo de línea de transmisión: **larga**
No. de ciclos de duración de la falla: ***4 ciclos***
Criterio de aspiración: ***Alta influencia***.
$\theta$ = **57.19º**, $v_T$ = **1 p.u.**
No. De generaciones: **500**
Tipo de selección: **Rueda-ruleta**
Pc = **0.987**, pm = **0.123**
$\Delta$de = **0.0001**
$\Delta$e = **0.0008**

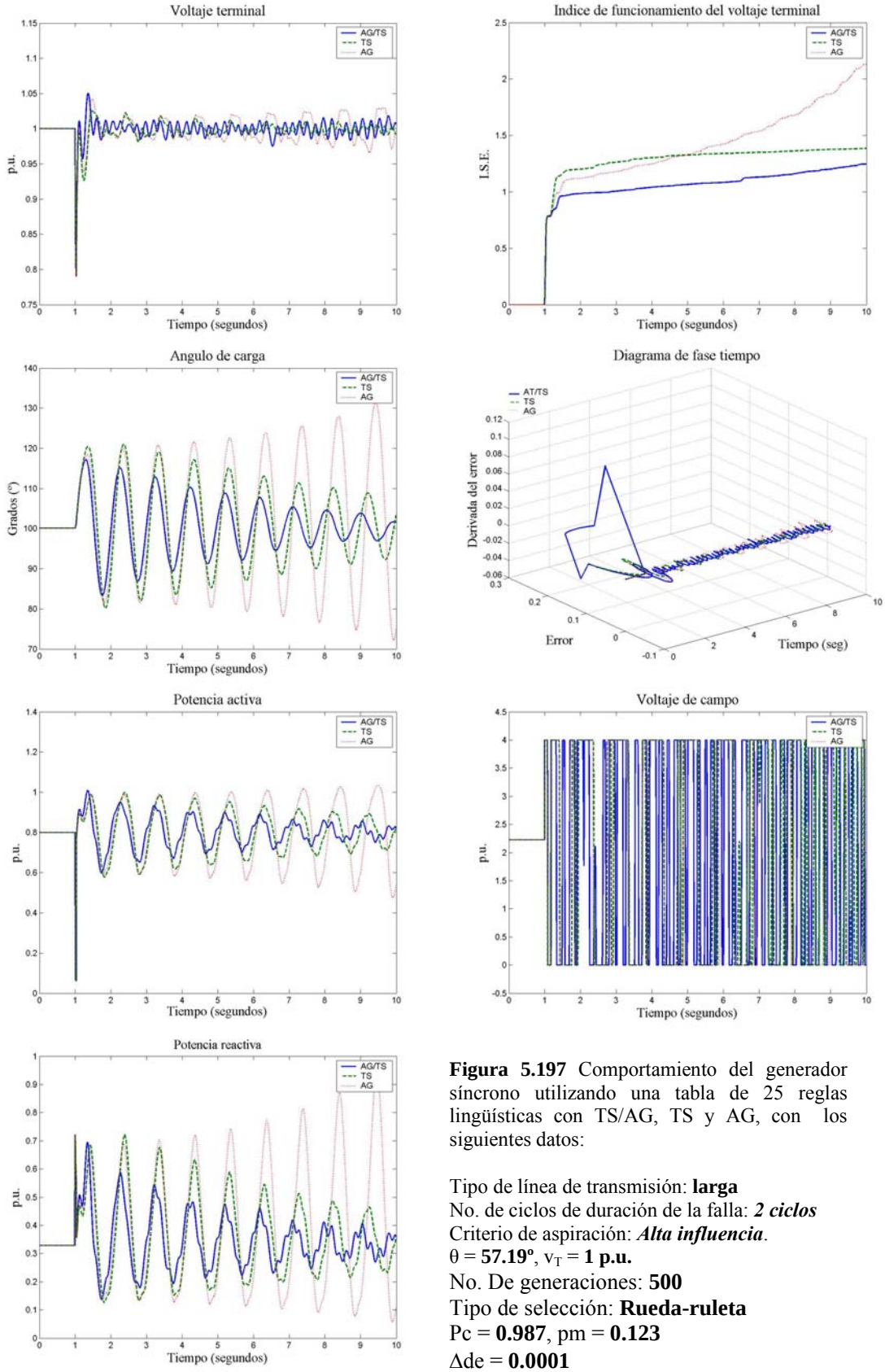



**Figura 5.197** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con TS/AG, TS y AG, con los siguientes datos:

Tipo de línea de transmisión: **larga**
No. de ciclos de duración de la falla: ***2 ciclos***
Criterio de aspiración: ***Alta influencia***.
$\theta$ = **57.19º**, $v_T$ = **1 p.u.**
No. De generaciones: **500**
Tipo de selección: **Rueda-ruleta**
Pc = **0.987**, pm = **0.123**
$\Delta de$ = **0.0001**
$\Delta e$ = **0.0008**

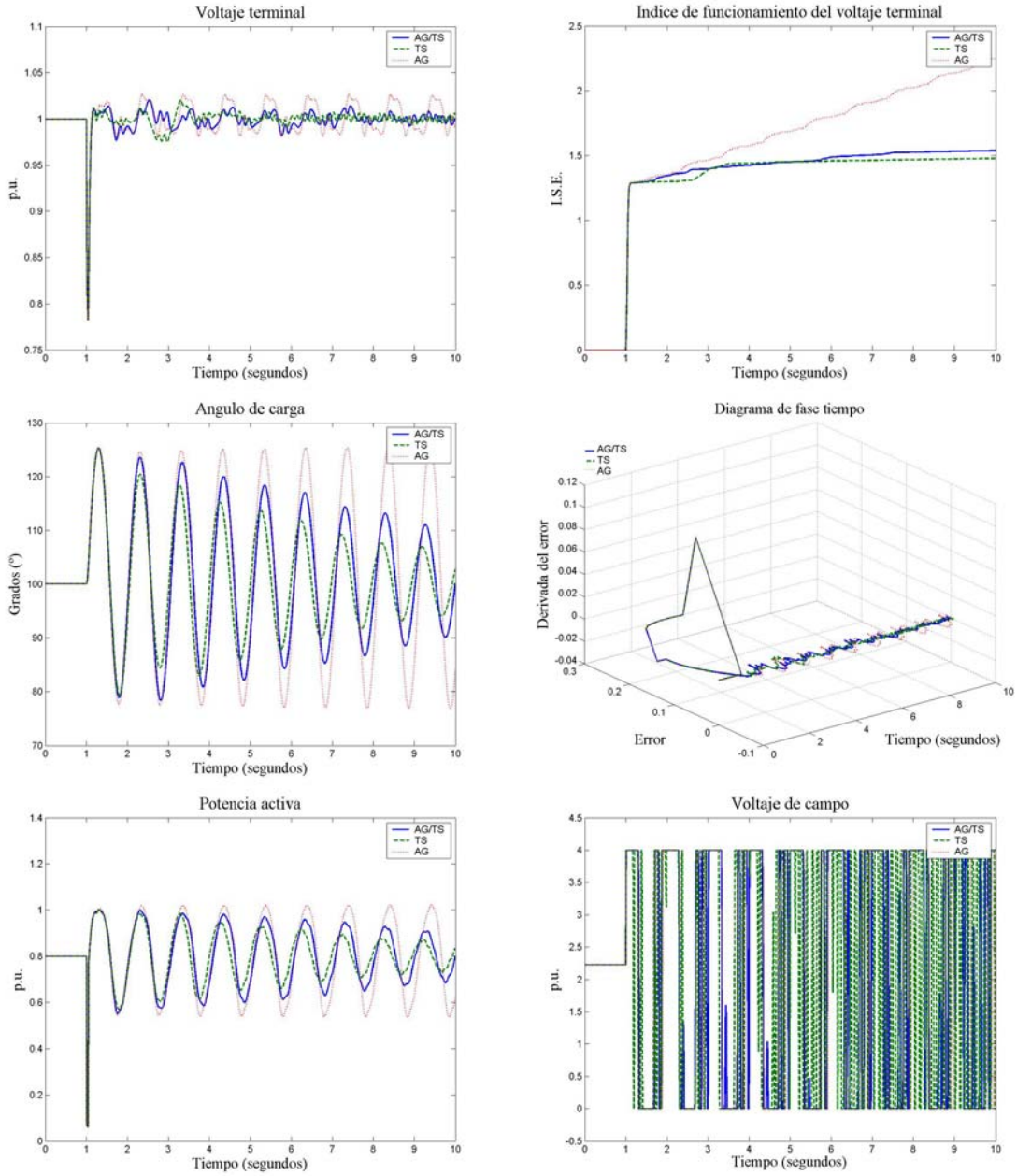



**Figura 5.198** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 25 reglas lingüísticas con TS/AG, TS y AG, con los siguientes datos:

Tipo de línea de transmisión: **larga**
No. de ciclos de duración de la falla: **3 *ciclos***
Criterio de aspiración: ***Alta influencia***.
$\theta$ = **57.19º**, $v_T$ = **1 p.u.**
No. De generaciones: **500**
Tipo de selección: **Rueda-ruleta**
Pc = **0.987**, pm = **0.123**
$\Delta$de = **0.0001**
$\Delta$e = **0.0008**

### *5.7.3 RESULTADOS OBTENIDOS DURANTE LA APLICACIÓN DE ALGORITMOS GENÉTICOS Y BÚSQUEDA POR TABÚ SOBRE UNA TABLA DE 49 REGLAS LINGÜÍSTICAS Y 7 FUNCIONES DE MEMBRESÍA.*

#### *5.7.3.1 INTRODUCCIÓN.*

En esta sección se presentarán todos aquellos resultados encontrados después de realizar una prueba sobre el generador síncrono en diferentes puntos de operación simulando una falla trifásica con AG y TS por el criterio de alta influencia empleando 7 funciones de membresía. La primera prueba es mostrada en la figura 5.199.

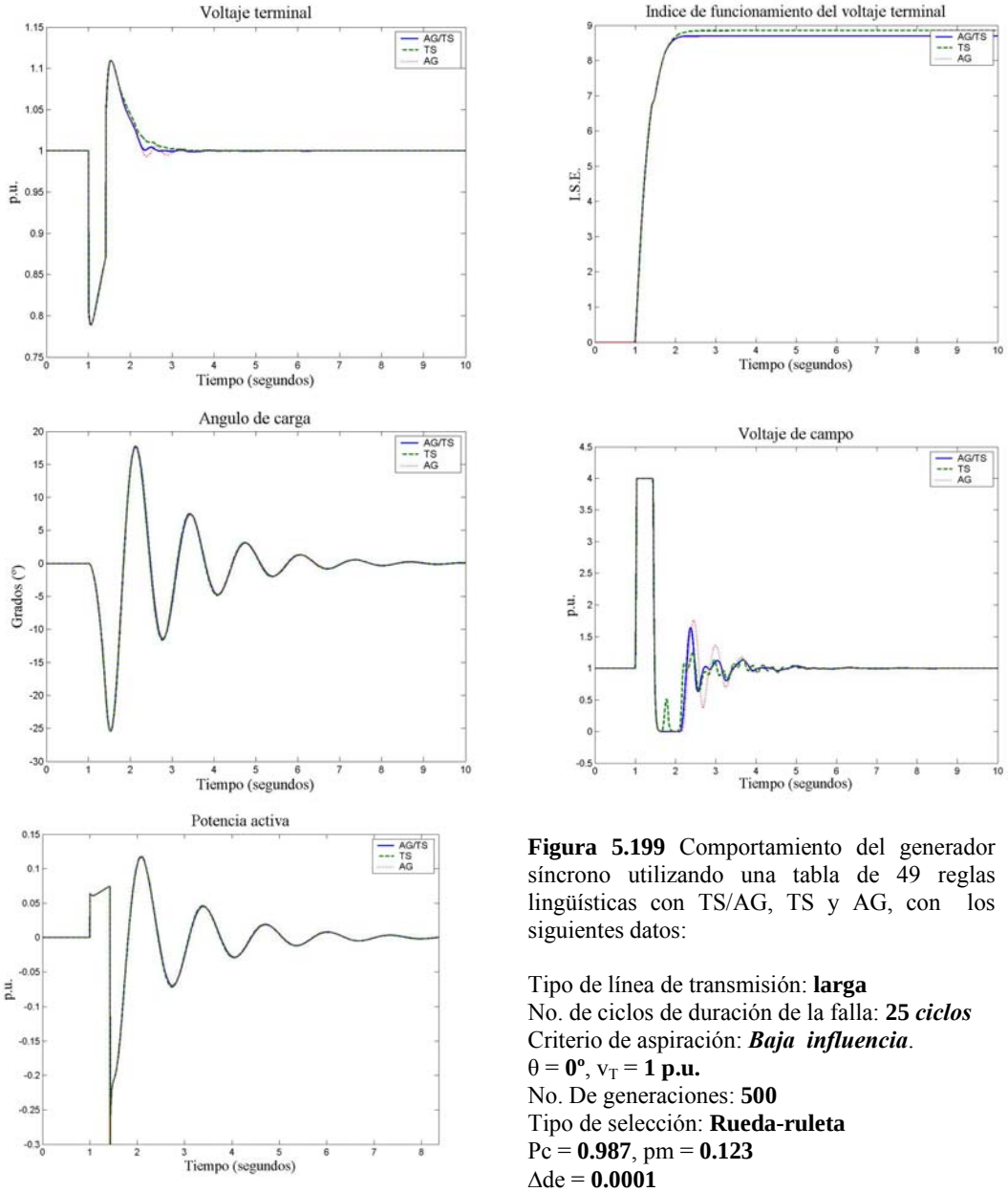



**Figura 5.199** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con TS/AG, TS y AG, con los siguientes datos:

Tipo de línea de transmisión: **larga**
No. de ciclos de duración de la falla: **25** ***ciclos***
Criterio de aspiración: ***Baja influencia***.
$\theta$ = **0º**, $v_T$ = **1 p.u.**
No. De generaciones: **500**
Tipo de selección: **Rueda-ruleta**
Pc = **0.987**, pm = **0.123**
$\Delta$de = **0.0001**
$\Delta$e = **0.00001**

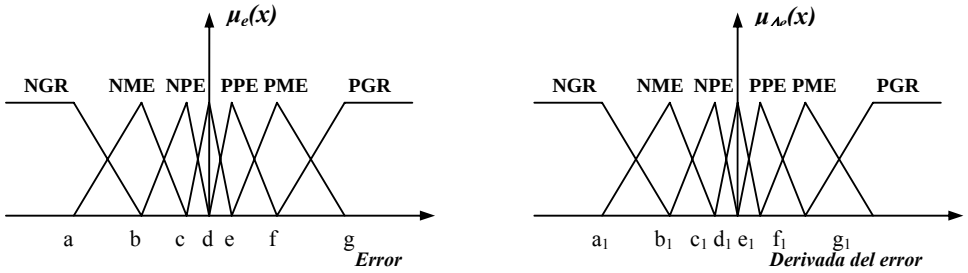
- Resultados obtenidos después de aplicar AG y TS para el punto de operación donde:

Tipo de línea de transmisión: **larga**
No. de ciclos de duración de la falla: **25 *ciclos***
$\theta$ = **0º**, $v_T$ = **1 p.u.**

Criterio de aspiración: ***Baja influencia***.
No. De generaciones: **500**
Tipo de selección: **Rueda-ruleta**
Pc=**0.987**, pm = **0.123**
$\Delta$de = **0.0001**
$\Delta$e = **0.00001**

| $\Delta e$ \ $e$ | NGR | NME | NPE | ZE | PPE | PME | PGR |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | BG | BG | BG | BM | BM | BP | **CE** |
| **NME** | BG | BG | BM | BM | BP | **CE** | AP |
| **NPE** | BG | BM | BM | BP | CE | AP | AP |
| **ZE** | BM | BM | BP | **CE** | AP | AM | AM |
| **PPE** | BM | BP | **CE** | AP | AP | AM | AG |
| **PME** | BP | **CE** | AP | AM | AM | AG | AG |
| **PGR** | **CE** | AP | AM | AM | AG | AG | AG |

Tabla de reglas lingüísticas resultante.




Donde:

Intervalos de funciones de membresía del error

a = -0.12 b = -0.05, c = -0.035, d = 0,e = 0.0350, f = 0.05, g =0.12

Intervalos de funciones de membresía de la derivada del error

$a_1$ =-0.0009, $b_1$ = -0.0006, $c_1$ = -0.0003, $d_1$ =0, $e_5$ = 0.0003, $f_1$ = 0.0006, $g_1$ = 0.0009

**Figura 5.200.** Tabla de reglas lingüísticas y funciones de membresía resultantes correspondiente a la figura 5.218 después de aplicar AG/TS para un punto donde $\theta$ = **0º**, $v_T$ = **1 p.u.** y una simulación de falla de 25 ciclos de duración en t = 1 segundo por el criterio de baja influencia y con 500 generaciones.

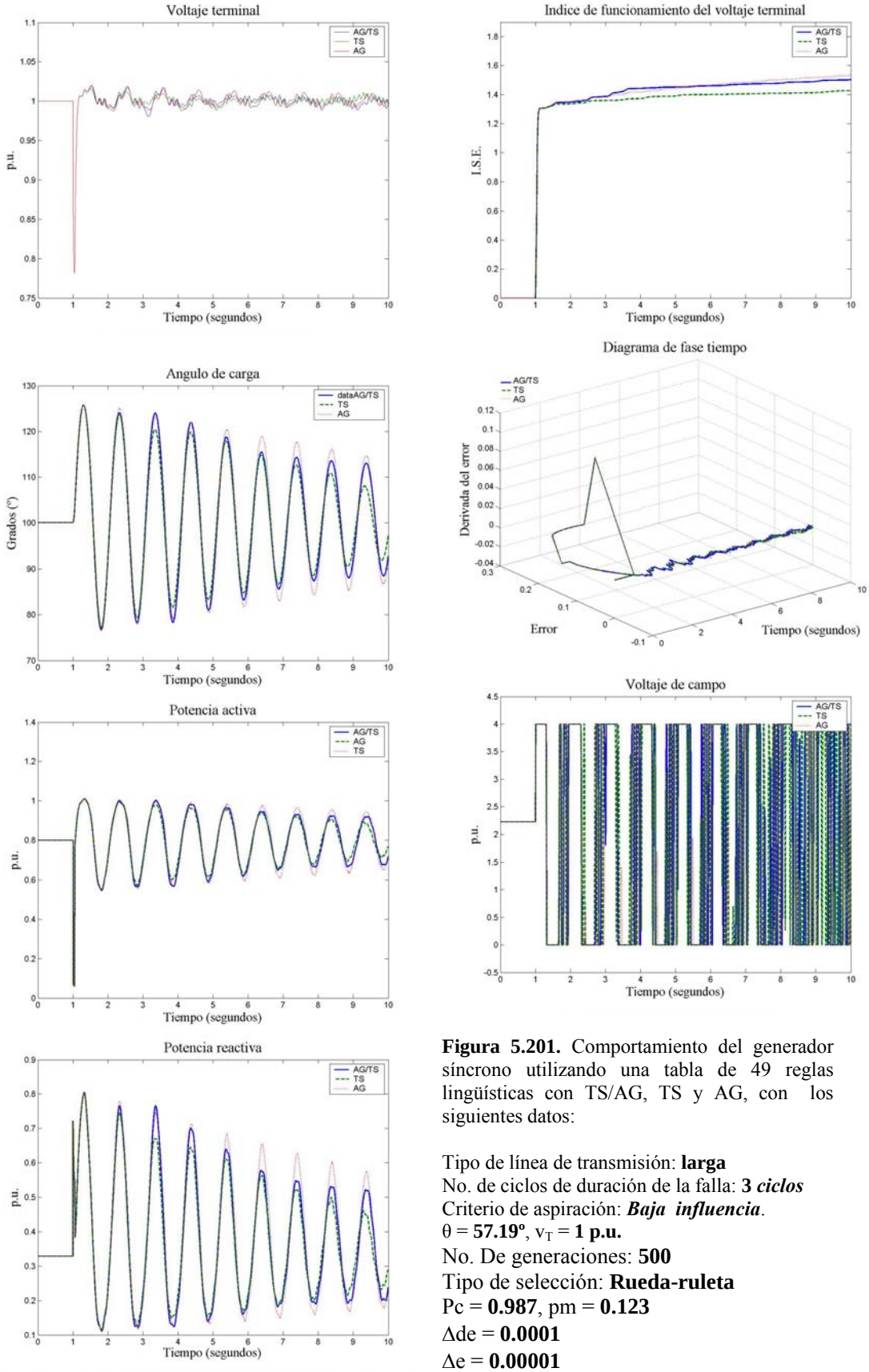
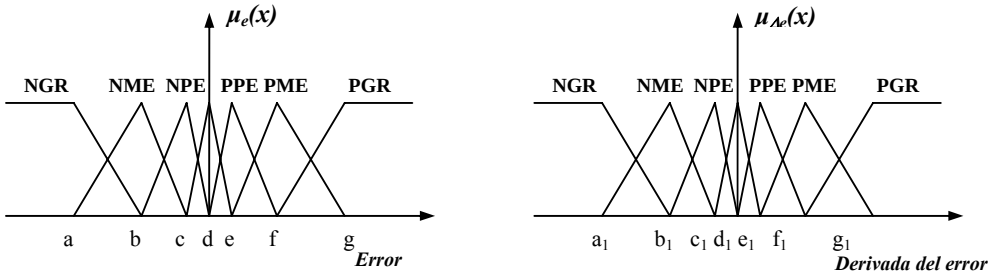



**Figura 5.201.** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con TS/AG, TS y AG, con los siguientes datos:

Tipo de línea de transmisión: **larga**
No. de ciclos de duración de la falla: **3** ***ciclos***
Criterio de aspiración: ***Baja influencia***.
$\theta$ = **57.19º**, $v_T$ = **1 p.u.**
No. De generaciones: **500**
Tipo de selección: **Rueda-ruleta**
Pc = **0.987**, pm = **0.123**
$\Delta$de = **0.0001**
$\Delta$e = **0.00001**

| $\Delta e$ \ $e$ | NGR | NME | NPE | ZE | PPE | PME | PGR |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | BG | BG | BG | BG | BM | BP | **AP** |
| **NME** | BG | BG | BG | BG | BP | **CE** | AP |
| **NPE** | BG | BM | BG | CE | CE | AP | AP |
| **ZE** | BM | BM | BG | **CE** | AP | AM | AG |
| **PPE** | BP | BP | **BG** | AM | AM | AM | AG |
| **PME** | BP | **CE** | AG | AG | AM | AG | AG |
| **PGR** | **CE** | AP | AM | AG | AG | AG | AG |

Tabla de reglas lingüísticas resultante.




Donde:

Intervalos de funciones de membresía del error

$$a = -0.1240,\ b = -0.0540,\ c = -0.039,\ d = 0, e = 0.037,\ f = 0.0520,\ g = 0.1240$$

Intervalos de funciones de membresía de la derivada del error

$$a_1 = -0.0015,\ b_1 = -0.0013,\ c_1 = -0.001,\ d_1 = 0,\ e_1 = 0.001,\ f_1 = 0.0013,\ g_1 = 0.0015$$

Donde los datos relacionados a la maquina y a los parámetros del control son:

Tipo de línea de transmisión: **larga**
No. de ciclos de duración de la falla: **3 *ciclos***
Criterio de aspiración: ***Baja influencia***.
$\theta$ = **57.19º**, $v_T$ = **1 p.u.**
No. De generaciones: **500**
Tipo de selección: **Rueda-ruleta**
Pc = **0.987**, pm = **0.123**
$\Delta de$ = **0.0001**
$\Delta e$ = **0.00001**

**Figura 5.202.** Tabla de reglas lingüísticas y funciones de membresía resultantes correspondiente a la figura 5.210 después de aplicar AG/TS para un punto donde $\theta$ = **57.19º**, $v_T$ = **1 p.u.** y una simulación de falla de 3 ciclos de duración en t = 1 segundo por el criterio de baja influencia y con 500 generaciones.

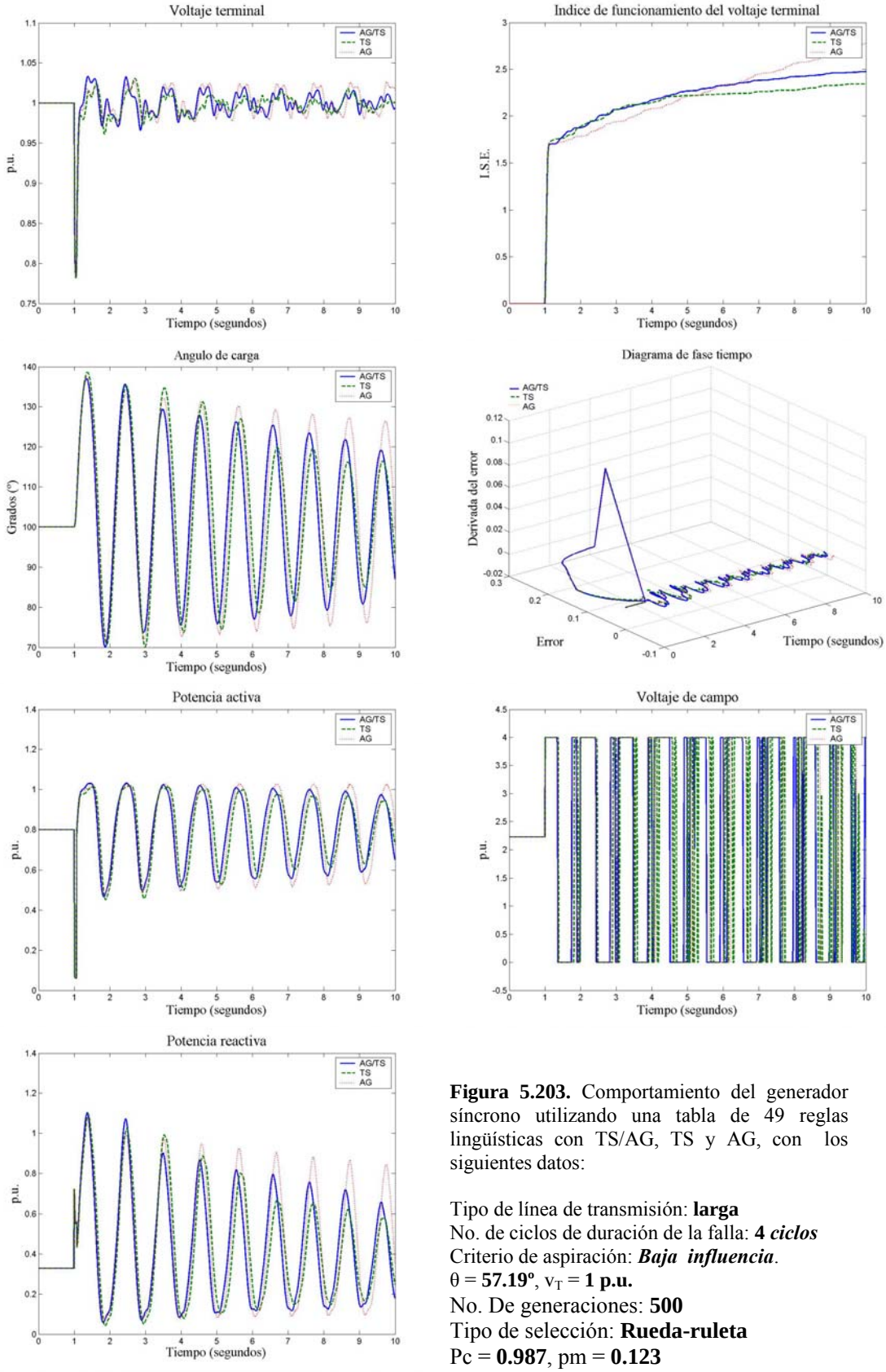



**Figura 5.203.** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con TS/AG, TS y AG, con los siguientes datos:

Tipo de línea de transmisión: **larga**
No. de ciclos de duración de la falla: **4 *ciclos***
Criterio de aspiración: ***Baja influencia***.
$\theta$ = **57.19º**, $v_T$ = **1 p.u.**
No. De generaciones: **500**
Tipo de selección: **Rueda-ruleta**
Pc = **0.987**, pm = **0.123**
$\Delta$de = **0.0001**
$\Delta$e = **0.00001**

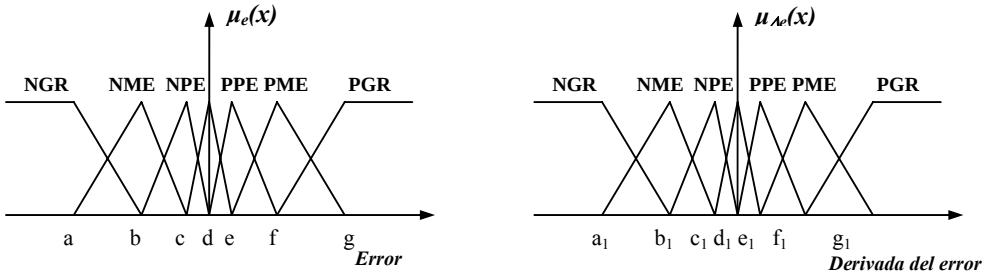
- Resultados obtenidos después de aplicar AG y TS para el punto donde:

Tipo de línea de transmisión: **larga**
No. de ciclos de duración de la falla: **3 *ciclos***
$\theta$ = **5º**, $v_T$ = **1 p.u.**

Criterio de aspiración: ***Baja influencia***.
No. De generaciones: **500**
Tipo de selección: **Rueda-ruleta**
Pc=**0.987**, pm = **0.123**
$\Delta$de = **0.0001**
$\Delta$e = **0.00001**

| $\Delta e$ \ $e$ | NGR | NME | NPE | ZE | PPE | PME | PGR |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | BG | BG | BG | BM | CE | BP | **CE** |
| **NME** | BG | BG | BM | BM | CE | **CE** | AP |
| **NPE** | BG | BM | BM | BM | CE | AP | AP |
| **ZE** | BM | BM | BP | **CE** | AM | AM | AM |
| **PPE** | BM | BP | **BP** | AP | AM | AM | AG |
| **PME** | BP | **CE** | CE | AM | AM | AG | AG |
| **PGR** | **CE** | AP | AM | AM | AG | AG | AG |

Tabla de reglas lingüísticas resultante.




Donde:

Intervalos de funciones de membresía del error

a = -0.12 b = -0.05, c = -0.035, d = 0,e = 0.0350, f = 0.0520, g = 0.124

Intervalos de funciones de membresía de la derivada del error

$a_1$ = -0.0015, $b_1$ = -0.0013, $c_1$ = -0.001, $d_1$ =0, $e_5$ = 0.001, $f_1$ = 0.0013, $g_1$ = 0.0015

**Figura 5.204.** Tabla de reglas lingüísticas y funciones de membresía resultantes correspondiente a la figura 5.212 después de aplicar AG/TS para un punto donde $\theta$ = **57.19º**, $v_T$ = **1 p.u.** y una simulación de falla de 4 ciclos de duración en t = 1 segundo por el criterio de baja influencia y con 500 generaciones.

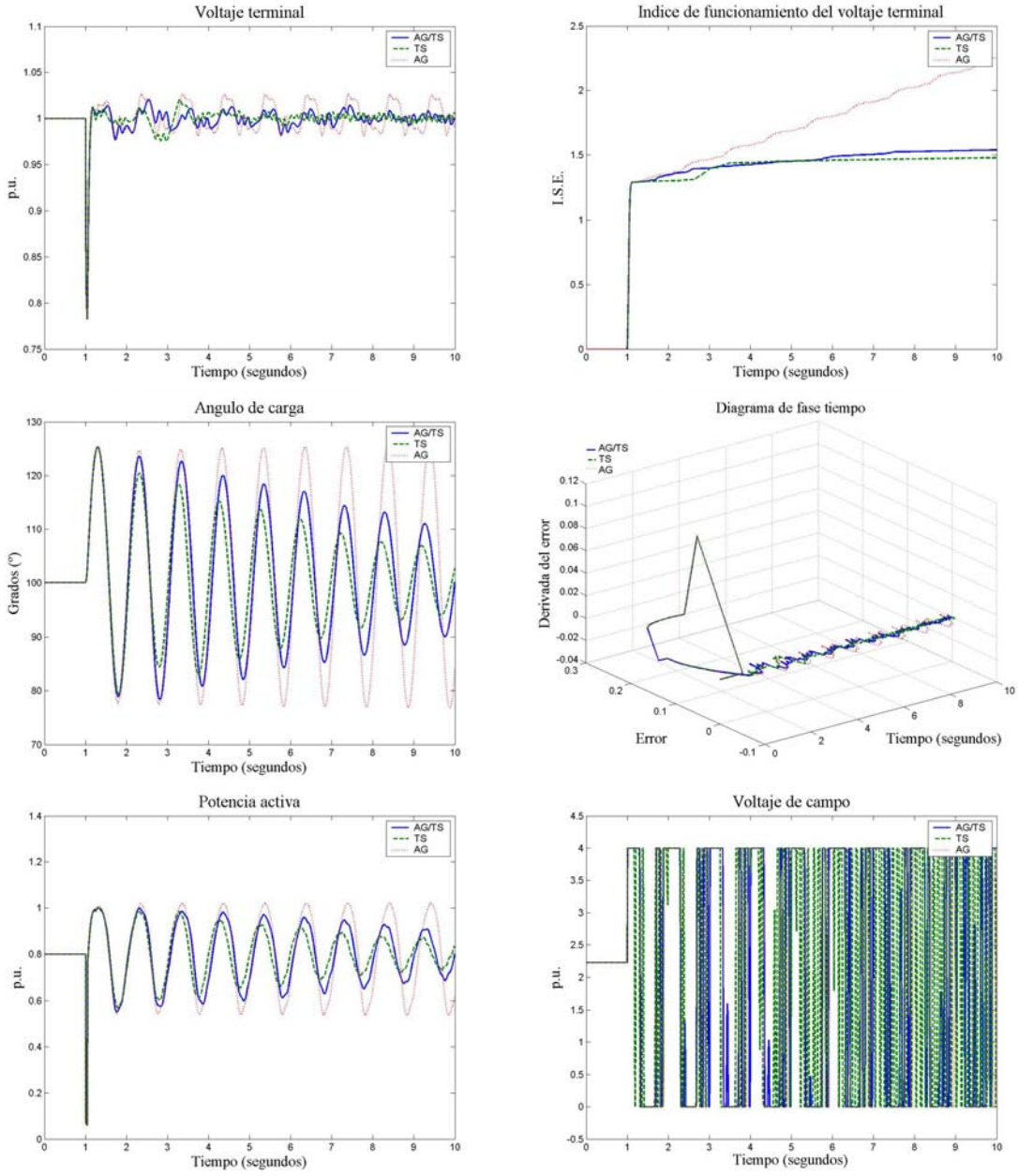



**Figura 5.205.** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con TS/AG, TS y AG, con los siguientes datos:

Tipo de línea de transmisión: **larga**
No. de ciclos de duración de la falla: **3** ***ciclos***
Criterio de aspiración: ***Alta influencia***.
$\theta$ = **57.19º**, $v_T$ = **1 p.u.**
No. De generaciones: **500**
Tipo de selección: **Rueda-ruleta**
Pc=**0.987**, pm = **0.123**
$\Delta$de = **0.0001**
$\Delta$e = **0.00001**

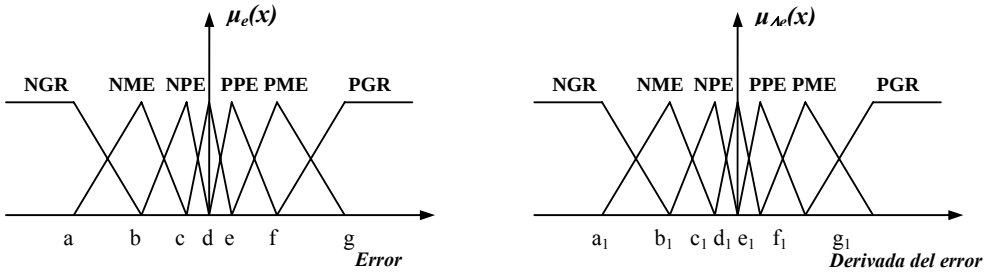
- Resultados obtenidos después de aplicar AG y TS para el punto donde:

Tipo de línea de transmisión: **larga**
No. de ciclos de duración de la falla: **3 *ciclos***
$\theta$ = **57.19º**, $v_T$ = **1 p.u.**

Criterio de aspiración: ***alta influencia***.
No. De generaciones: **500**
Tipo de selección: **Rueda-ruleta**
Pc = **0.987**, pm = **0.123**
$\Delta$de = **0.0001**
$\Delta$e = **0.00001**

| $\Delta e$ \| $e$ | NGR | NME | NPE | ZE | PPE | PME | PGR |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | BG | BG | BG | BG | CE | BP | **CE** |
| **NME** | BG | BG | BM | BM | BM | **CE** | AM |
| **NPE** | BG | BM | BG | BM | AP | AP | AM |
| **ZE** | BM | BM | BP | **CE** | AP | AM | AM |
| **PPE** | BM | BP | **BP** | AP | AG | AG | AG |
| **PME** | BP | **CE** | AP | AG | AG | AG | AG |
| **PGR** | **CE** | AP | AP | AG | AG | AG | AG |

Tabla de reglas lingüísticas resultante.




Donde:

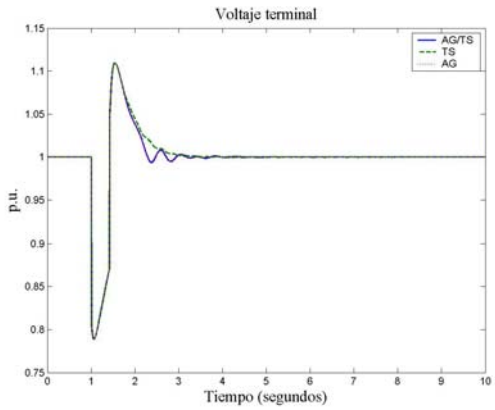
Intervalos de funciones de membresía del error

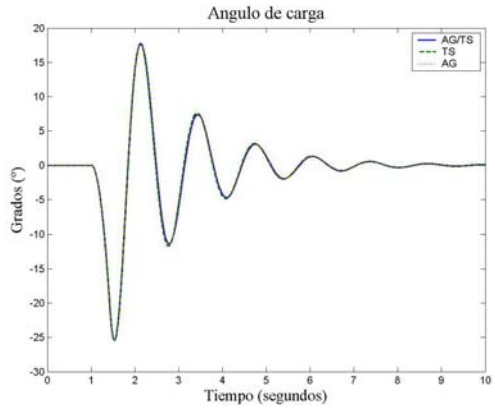
a = -0.1203, b = -0.0503, c = -0.03530, d = 0,e = 0.0353, f = 0.0503, g = 0.1203

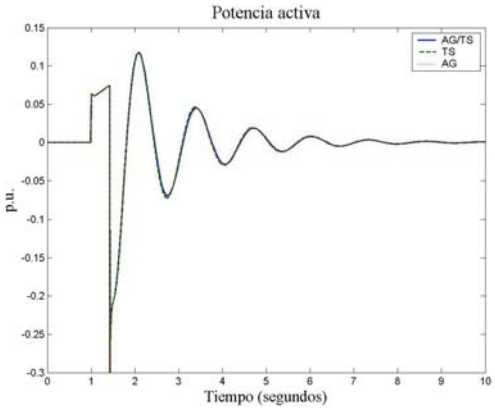
Intervalos de funciones de membresía de la derivada del error

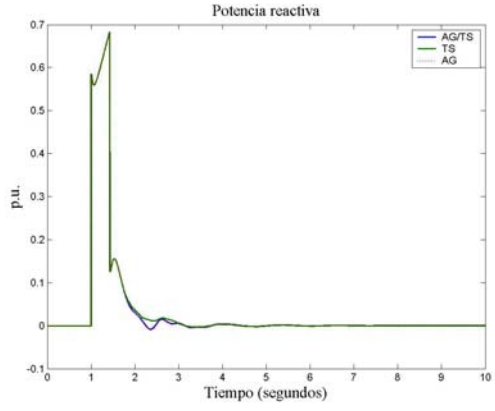
$a_1$ =-0.0009, $b_1$ = -0.0006, $c_1$ =-0.0003, $d_1$ =0, $e_5$ =0.0003, $f_1$ =0.0006, $g_1$ =0.0009

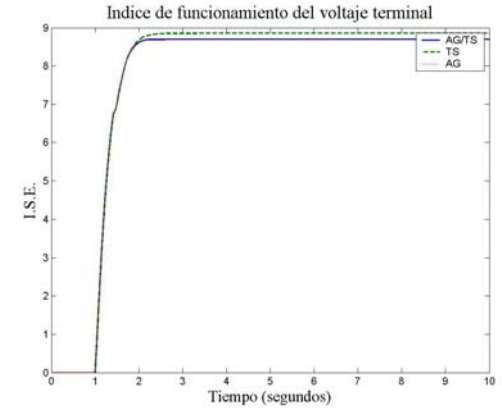
**Figura 5.206.** Tabla de reglas lingüísticas y funciones de membresía resultantes correspondiente a la figura 5.214 después de aplicar AG/TS para un punto donde $\theta$ = **57.19º**, $v_T$ = **1 p.u.** y una simulación de falla de 3 ciclos de duración en t = 1 segundo por el criterio de alta influencia y con 500 generaciones.

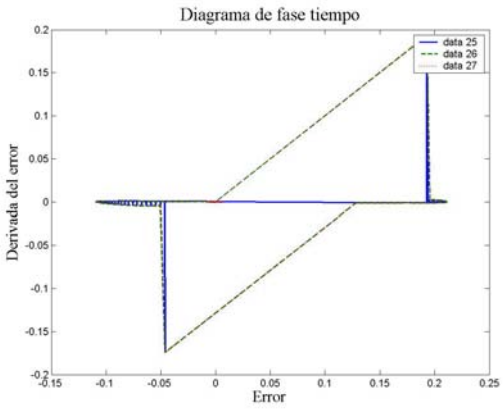


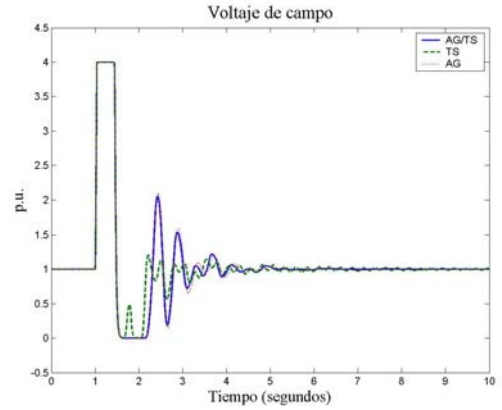




**Figura 5.207.** Comportamiento del generador síncrono utilizando una tabla de 49 reglas lingüísticas con TS/AG, TS y AG, con los siguientes datos:

Tipo de línea de transmisión: **larga**
No. de ciclos de duración de la falla: **25** ***ciclos***
Criterio de aspiración: ***Alta influencia***.
$\theta$ = **0º**, $v_T$ = **1 p.u.**
No. De generaciones: **500**
Tipo de selección: **Rueda-ruleta**
Pc = **0.987**, pm = **0.123**
$\Delta$de = **0.0001**
$\Delta$e = **0.00001**

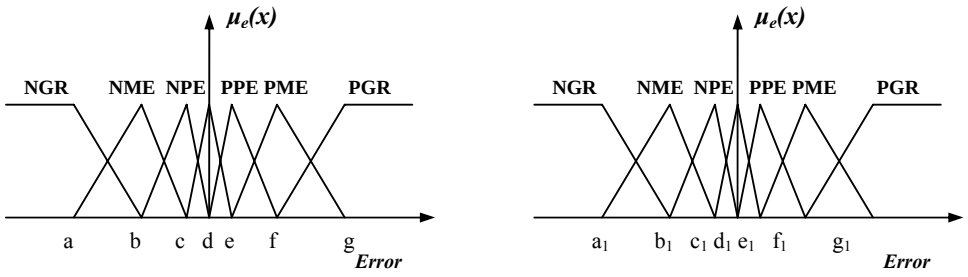
- Resultados obtenidos después de aplicar AG y TS para el punto donde:

Tipo de línea de transmisión: **larga**
No. de ciclos de duración de la falla: **25 *ciclos***
$\theta$ = **0º**, $v_T$ = **1 p.u.**

Criterio de aspiración: ***alta influencia***.
No. De generaciones: **500**
Tipo de selección: **Rueda-ruleta**
Pc=**0.987**, pm = **0.123**
$\Delta$de = **0.0001**
$\Delta$e = **0.00001**

| $\Delta e$ \| $e$ | **NGR** | **NME** | **NPE** | **ZE** | **PPE** | **PME** | **PGR** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | BG | BG | BG | BM | BM | BP | **CE** |
| **NME** | BG | BG | BM | BM | BP | **CE** | AP |
| **NPE** | BG | BM | BM | BP | CE | AP | AP |
| **ZE** | BM | BM | BP | **CE** | AP | AM | AM |
| **PPE** | BM | BP | **CE** | AP | AP | AM | AG |
| **PME** | BP | **CE** | AP | AM | AM | AG | AG |
| **PGR** | **CE** | AP | AM | AM | AG | AG | AG |

Tabla de reglas lingüísticas resultante.




Donde:

Intervalos de funciones de membresía del error

a = -0.09 b = -0.04, c = -0.03, d = 0,e = 0.03, f = 0.04, g =0.09

Intervalos de funciones de membresía de la derivada del error

$a_1$ = -0.0025, $b_1$ = -0.0007, $c_1$ =-0.0004, $d_1$ =0, $e_5$ =0.0004, $f_1$ =0.0007, $g_1$ =0.0025

**Figura 5.208** Tabla de reglas lingüísticas y funciones de membresía resultantes correspondiente a la figura 5.216 después de aplicar AG/TS para un punto donde $\theta$ = **0º**, $v_T$ = **1 p.u.** y una simulación de falla de 25 ciclos de duración en t = 1 segundo por el criterio de alta influencia y con 500 generaciones.

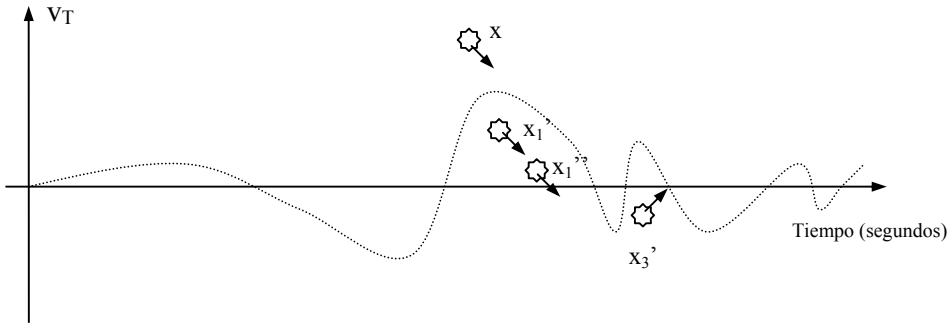
### *5.7.4 ANÁLISIS DEL TRABAJO DE ALGORITMOS GENÉTICOS Y BÚSQUEDA POR TABÚ.*

Los resultados mostrados hasta el momento se han establecido de tal forma que arrojen los mejores resultados en base a los mejores parámetros encontrados por TS y AG individualmente, el unir ambas técnicas como una sola técnica de optimización resulta ser agresiva, para delimitar esta característica bloqueamos cinco elementos del centro de la tabla de reglas lingüísticas que nos permitirán desenvolver adecuadamente ambas técnicas:

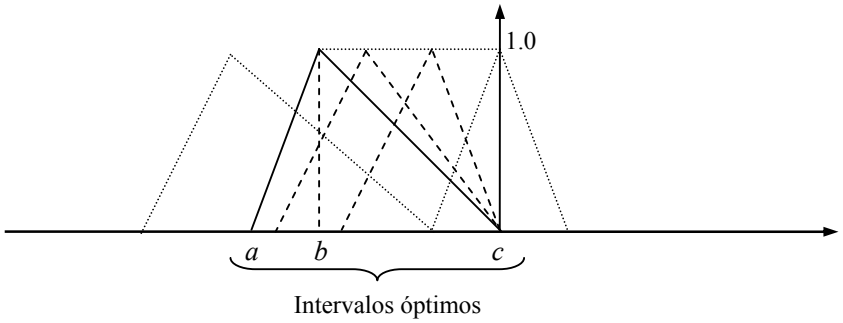
| $\Delta e$ \| $e$ | **NGR** | **NME** | **NPE** | **ZE** | **PPE** | **PME** | **PGR** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | BG | BG | BG | BM | BP | BP | **CE** |
| **NME** | BG | BG | BM | BM | BP | **CE** | AP |
| **NPE** | BG | BM | BM | BP | **CE** | AP | AP |
| **ZE** | BM | BM | BP | **CE** | AP | AM | AM |
| **PPE** | BP | BP | **CE** | AP | AM | AM | AG |
| **PME** | BP | **CE** | AP | AP | AM | AG | AG |
| **PGR** | **CE** | AP | AP | AM | AG | AG | AG |

Esta limitación se debe principalmente a que AG pretende encontrar (Figura 5.210 (b)) las variables a, b y c que mejor resultado proporcionen, una vez que TS entra ocurre lo siguiente:

La solución proporcionada por AG es suficiente, TS logra una solución más próxima al cero y esto perjudica a las generaciones futuras de los AG. X1' es la solución encontrada por AG y x1'' es la solución encontrada por TS pero la pendiente del error es alto y pretendemos que la derivada del error al estar cercano al cero sea mucho menor al error, esta característica provocaría una oscilación alrededor de la referencia del voltaje terminal.




(a) Soluciones establecidas por AG y TS en una iteración




(b) Intervalos encontrados por AG

**Figura 5.209** Optimización por AG y TS

Si no se limitan dichas acciones ocurre tal como se muestra en la figura 5.210:

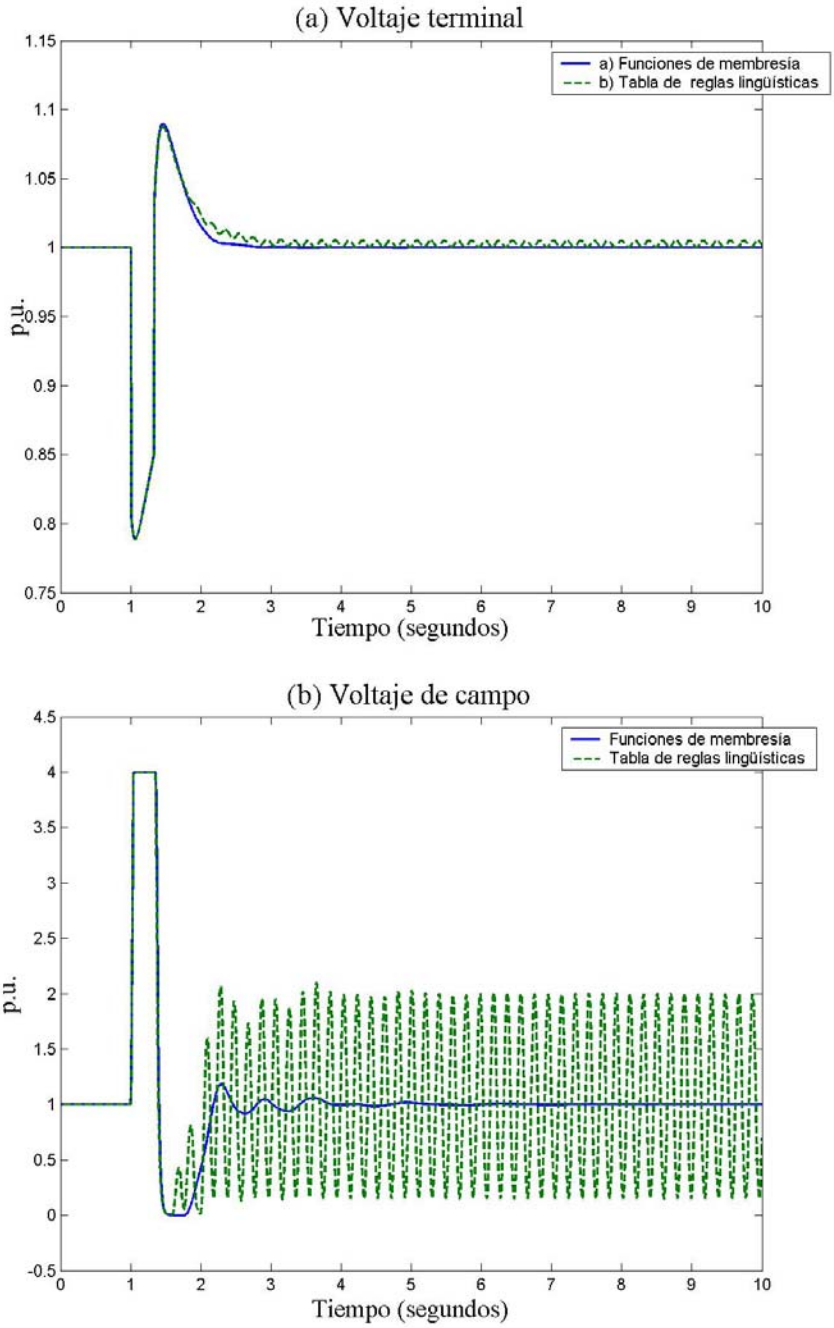



**Figura 5.210.** Oscilaciones producidas en el voltaje terminal por un ajuste agresivo de las acciones lingüísticas en la tabla de reglas por TS.

Las oscilaciones presentadas en la figura 5.210 (a) y (b) son el resultado de realizar una optimización inadecuada, se puede emplear también un tiempo muerto al terminar cada optimización para reducir dicha oscilación, principalmente porque AG encuentra un valor óptimo en cada iteración si este valor no es compatible con el establecido a la acción lingüística correspondiente ocurre tal como se muestra en la figura 5.210.

### *5.7.5 COMPORTAMIENTO DEL GENERADOR SÍNCRONO EMPLEANDO EL CONTROLADOR DIFUSO OPTIMIZADO.*

La efectividad de ambas técnicas se puede ver reflejada en el comportamiento del voltaje terminal del generador síncrono, a continuación se plantean dos pruebas donde se simula el comportamiento del generador empleando las funciones de membresía y la tabla de reglas lingüísticas encontradas al final para esa misma prueba por los algoritmos genéticos y la búsqueda por tabú así como los resultados encontrados simulando los algoritmos genéticos y búsqueda por tabú durante la aplicación de la lógica difusa. A continuación se plantea la búsqueda por tabú y algoritmos genéticos con los siguientes datos:

**PRUEBA 1**

Intervalo de simulación: 0-200 segundos.
Ocurrencia de falla: 0 ciclos
Punto de operación inicial: En vacío.

Tipo de sintonización:

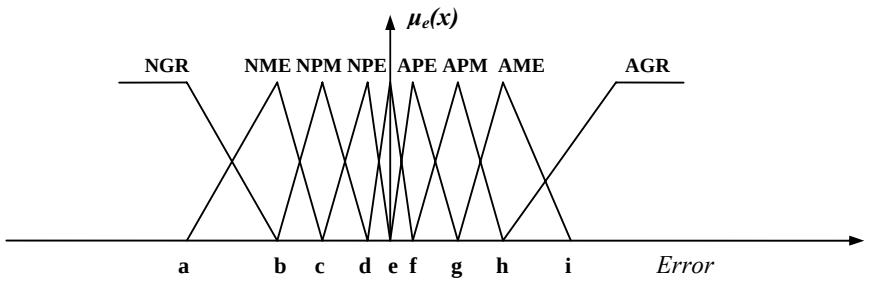
***Algoritmos genéticos.***

- Tamaño de cromosoma/individuo: 6 (18/individuo)
- Tamaño de la población/función de membresía: 6 individuos.
- Probabilidad de cruzamiento: 0.9877
- Probabilidad de mutación: 0.123
- Punto de cruzamiento: 1 punto.
- Tipo de selección: Rueda-ruleta (no elitista)

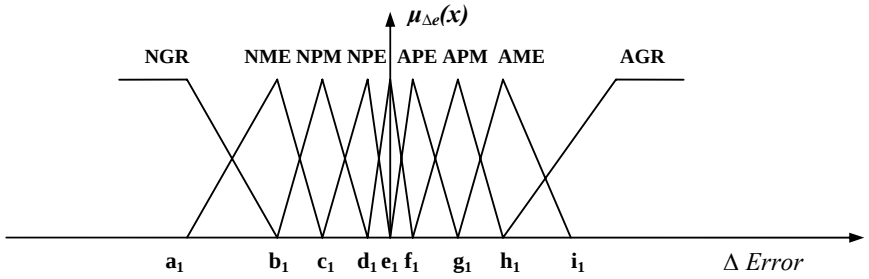
***Búsqueda por tabú.***

- Tipo de influencia: Alta y baja influencia.
- Tabú elemento-sumado: 0.125 segundos
- Tabú elemento-eliminado: 1 segundos.
- Tiempo a corto plazo: 0.125 segundos
- Tiempo a largo plazo: 0.24 segundos.

La cantidad de las funciones de membresía considerado para 5, 7 y 9 funciones de membresía.
A continuación se muestra en la figura 5.211 los intervalos para 9 funciones de membresía:




5.211 (a) Intervalos de las funciones de membresía para el error.




5.211 (b) Funciones de membresía para la derivada del error.

**Figura 5.211** Universo de discusión para el error y para la derivada del error para 9 funciones de membresía.

Donde:

a = -0.14, b = -0.07, c = -0.05, d = -0.03, e = 0, f = 0.03, g = 0.05, h = 0.07, i = 0.14
$a_1$ = -0.0002, $b_1$ = -0.00045, $c_1$ = -0.0003,$d_1$ = -0.0002, $e_1$ = 0, $f_1$ = 0.0002, $g_1$ = 0.0003, $h_1$ = 0.00045, $i_1$ =0.0002

Los intervalos empleados para 5 y 7 funciones de membresía son tal como se presentan en el apéndice A, así como la tabla de reglas lingüísticas para 5, 7 y 9 funciones de membresía.

En las graficas 5.212-5.218 se podrá observar que los resultados son diferentes cuando se emplean los algoritmos genéticos y la búsqueda por tabú durante la prueba para la sintonización de las funciones de membresía y de la tabla de reglas lingüísticas y cuando se establecen inicialmente las funciones de membresía y la tabla de reglas construida por AG y TS durante una prueba similar.

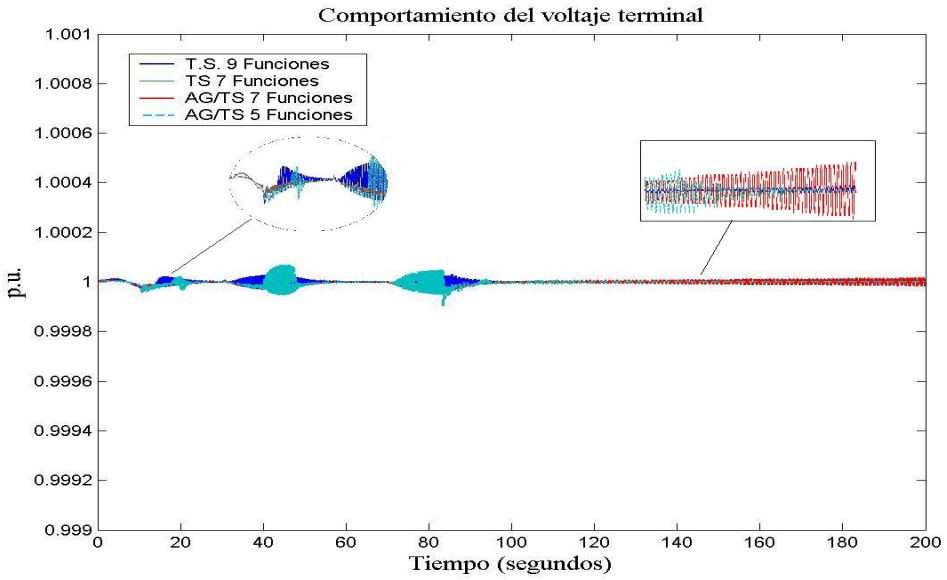



**Figura 5.212** Comportamiento del voltaje terminal empleando AG y TS.

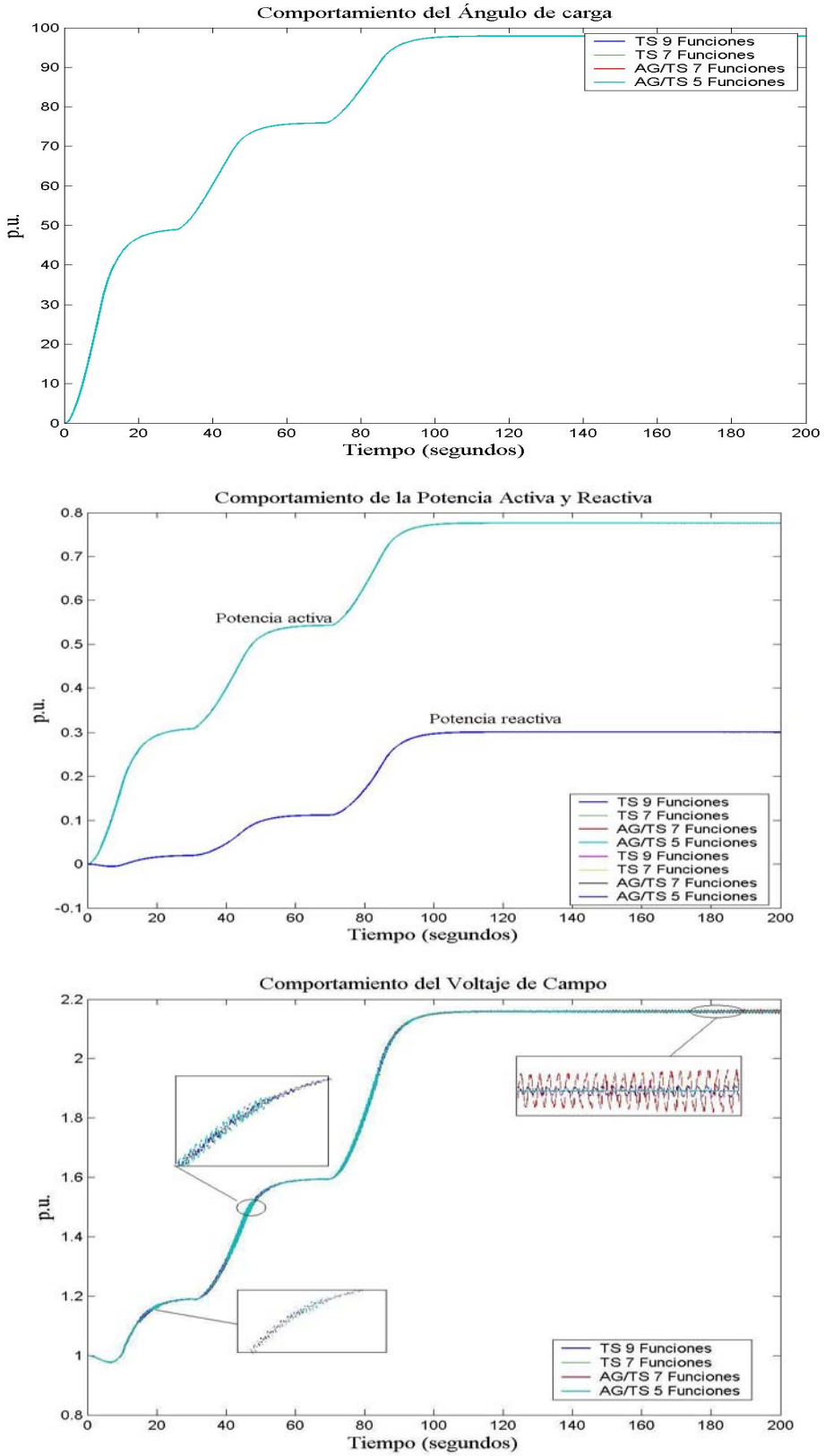



**Figura 5.213** Comportamiento del ángulo de carga, potencia activa, potencia reactiva y voltaje de campo durante la sintonización de las funciones de membresía y la tabla de reglas lingüísticas aplicando AG y TS.

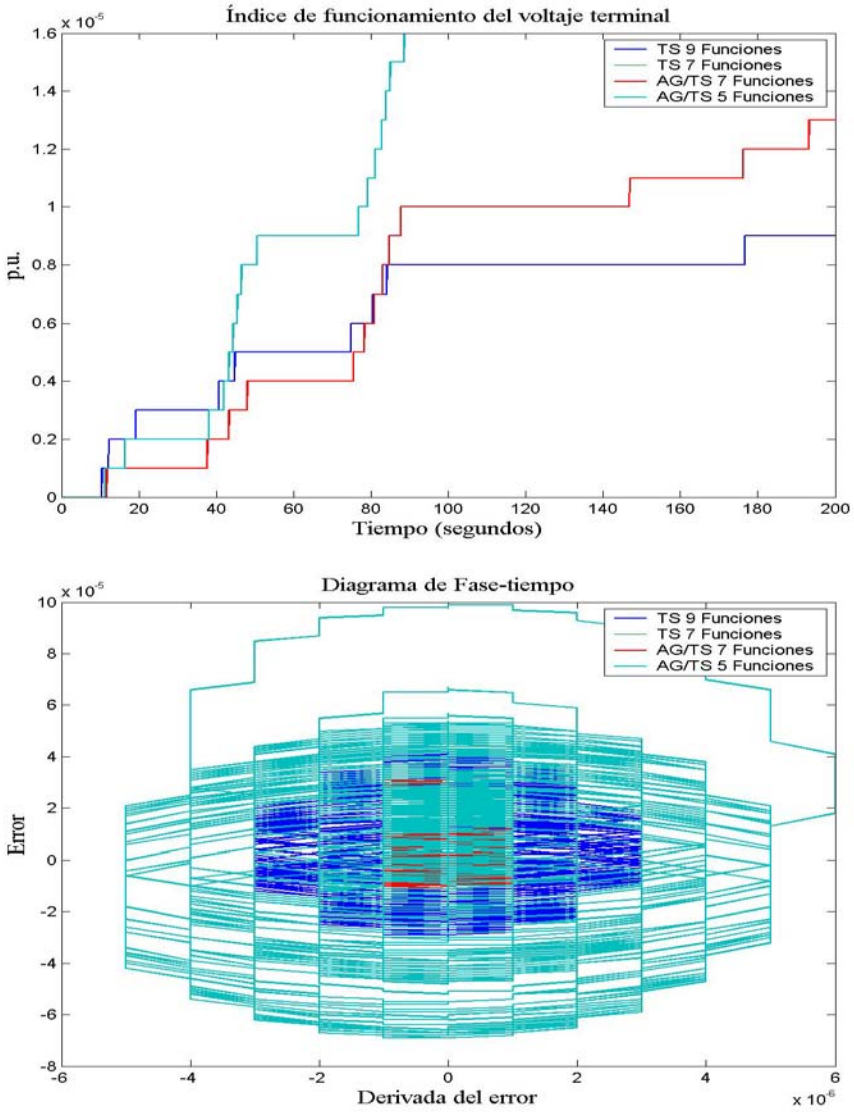



**Figura 5.214.** Índice de funcionamiento y diagrama de fase tiempo durante la aplicación de los AG y TS.

A continuación se muestran las funciones de membresía, la tabla de reglas lingüísticas y estructuras asociadas resultantes con ambas técnicas después de aplicar AG y TS para un controlador difuso de 7 funciones de membresía.

Donde las funciones de membresía son tal como se presentan en la figura 5.215 para el error y para la derivada del error:

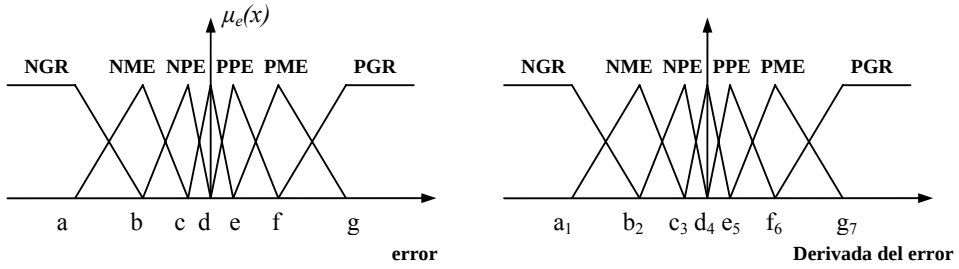



**Figura 5.215** Funciones de membresía sintonizadas, después de aplicar AG y TS.

Donde los valores relacionados a los intervalos finales de las funciones de membresía de la figura 5.215 son:

Error

$a = -0.124, b = -0.0540, c = -0.039, d = 0, e = 0.039, f = 0.0540, g = 0.124$

Derivada del error

$a_1 = -0.0012, b_1 = -0.0010, c_1 = -0.0008, d_1 = 0, e_1 = 0.0008, f_1 = 0.0010, g_1 = 0.0012$

Donde la tabla de reglas lingüísticas resultante es como se muestra en la figura 5.216:

| $\Delta e$ \ $e$ | NGR | NME | NPE | ZE | PPE | PME | PGR |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | BG | BG | BG | BM | BM | BP | **CE** |
| **NME** | BG | BG | BM | BM | BP | **CE** | AM |
| **NPE** | BG | BM | BM | BM | **CE** | AP | AM |
| **ZE** | BM | BM | BM | **CE** | AM | AM | AM |
| **PPE** | BM | BP | CE | AM | AM | AM | AG |
| **PME** | BP | **CE** | AP | AM | AM | AG | AG |
| **PGR** | **CE** | AP | AM | AM | AG | AG | AG |

**Figura 5.216** Tabla de reglas lingüísticas resultantes después de aplicar los algoritmos genéticos y la búsqueda por tabú.

## PRUEBA 2.

En esta prueba se emplearán las funciones de membresía y la tabla de reglas lingüísticas encontradas durante la prueba 1 para 7 funciones de membresía y se observará el comportamiento del generador. A continuación se presenta los resultados obtenidos después de simular el controlador difuso optimizado (empleando tabla de reglas lingüísticas y funciones de membresía) en la figura 5.217-5.220:

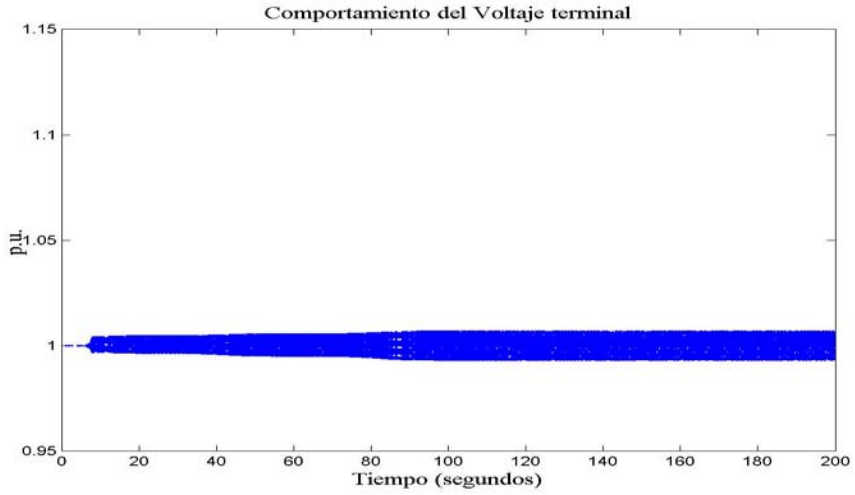



**Figura 5.217** Comportamiento del voltaje en terminales empleando el controlador difuso optimizado.

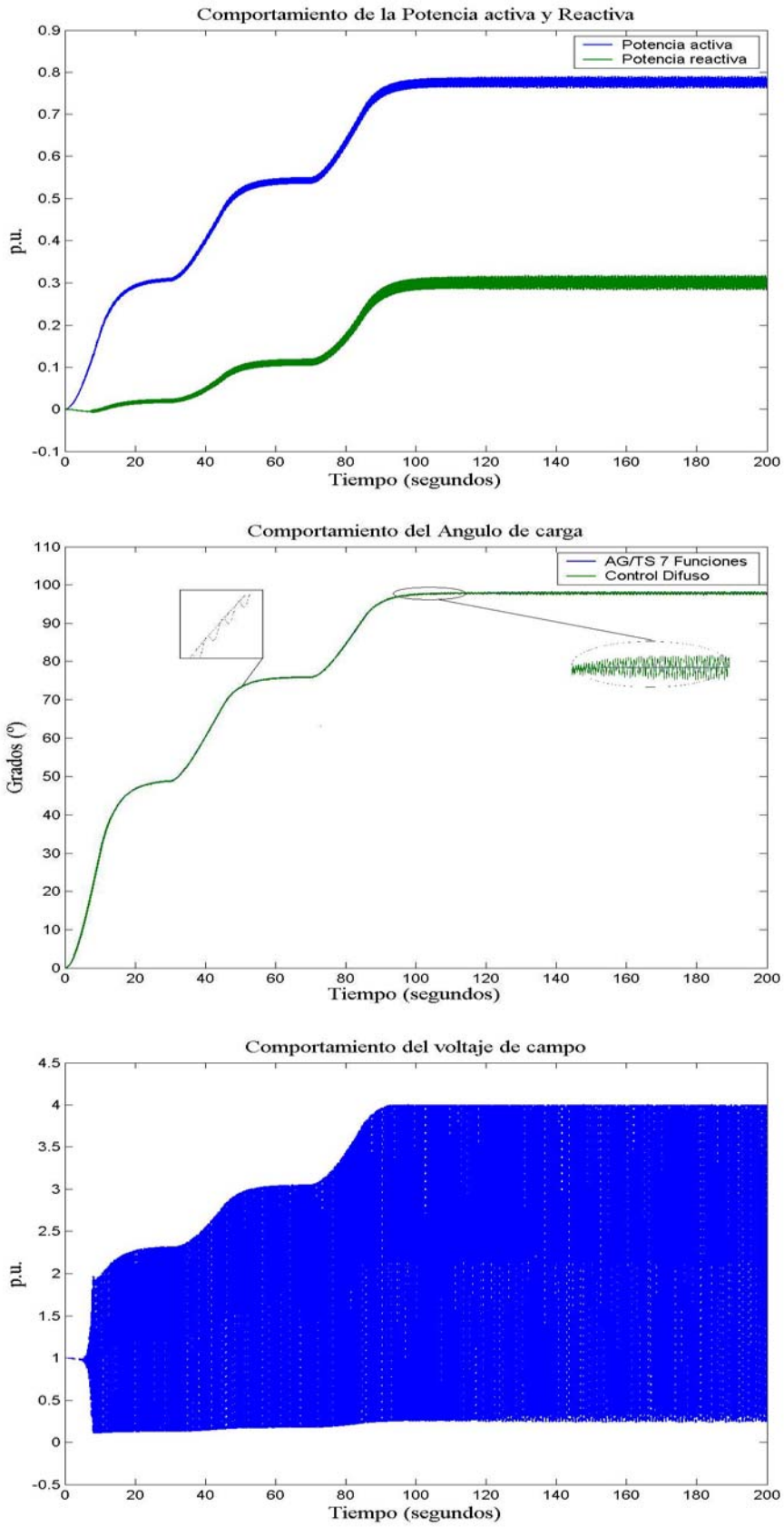



**Figura 5.218** Comportamiento del voltaje de campo.

Los resultados encontrados durante esta prueba mantienen la tabla de reglas y las funciones de membresía estáticas, lo que limita la inteligencia del controlador difuso solo a las acciones expertas que puede proporcionar la tabla de reglas lingüísticas y las propias funciones de membresía; estas últimas presentan intervalos cercanos numéricamente a los intervalos iniciales propuestos en las funciones de membresía de la prueba 1. El emplear las funciones de membresía y la tabla de reglas lingüísticas optimizadas encontradas al final de la simulación de la prueba 1 no condiciona a encontrar los mismos resultados en la prueba 2, durante la aplicación de ambas técnicas la tabla de reglas esta tomando diversas estructuras construyendo por medio de la búsqueda por tabú diversos escenarios de exploración/explotación de zonas de la misma tabla, esta característica es llamada solución maestra la cuál conduce a las diversas zonas a la solución élite la cual es la solución más optima, si se compara los resultados encontrados durante la prueba número 2 son mejores que los encontrados por el controlador difuso convencional; de igual forma ocurre con las funciones de membresía, los algoritmos genéticos construyen un panorama de búsqueda amplio sobre el universo de discusión sin entorpecer loas dimensiones de la base de las funciones triangulares, las cuáles pueden tomar un número n demasiado grande o pequeño de particiones.

Las figuras 5.212-5.214 son obtenidas aplicando los algoritmos genéticos y la búsqueda por tabú durante la prueba y las figuras 5.217-5.218 son aquellas obtenidas por el controlador difuso optimizado i.e. empleando la tabla de reglas lingüísticas y las funciones de membresía encontradas durante loa prueba 1, se puede observar que los resultados de la prueba 2 no son mejores que los resultados de la prueba 1 debido a la inteligencia de los algoritmos genéticos y la búsqueda por tabú durante su aplicación en la prueba 1, tales pruebas son un ejemplo para comprobar que las técnicas inteligentes plantean un mejor comportamiento en la regulación de voltaje contra el comportamiento que presenta el regulador difuso.

# CAPÍTULO VI

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

### *6.1 CONCLUSIONES.*

- Se logra establecer un control difuso capaz de reconocer automáticamente los elementos calificados como adecuados dentro de la tabla de reglas lingüísticas y las funciones de membresía (ver capítulo 5, sección 5.7.2 en Figuras 5.189, 5.190, 5.191 y 5.192).

- El introducir acciones a la tabla de reglas lingüísticas de mayor valor sobre la posición de acciones de menor valor como realizar un movimiento sustituyendo PM por AG siempre producirá un valor de la función objetivo más cercano a cero, TS logra diferenciar la calidad de tales movimientos.

- El control difuso tipo PI se comporta mejor que el regulador tipo ST1 en puntos de operación donde la potencia activa es mayor y se produce un sobretiro dentro de los márgenes establecidos (15-20%) cuando el generador trabaja en vacío (capítulo 5, todos los puntos de operación (todas las figura) con potencia mayor a 0.5 p.u.).

- Los errores de redondeo producidos por el propio computador producen pequeños errores en estado estacionario (todas las pruebas).

- El utilizar un número mayor de funciones de membresía mejora los resultados para un número mayor de ciclos de falla durante la simulación (sección 5.4.2 figuras5.66 a 5.79).

- El utilizar un tipo de búsqueda por entorno produce mucha mayor diversificación y explotación de regiones vecinas principalmente cuando se utilizan 81 reglas lingüísticas, siendo aún mejor que la optimización por TS sobre una tabla de 49 reglas lingüísticas tanto para una simulación de falla como para un incremento de carga (sección 5.6).

- La reducción de los intervalos de las funciones de membresía produce una mayor ganancia en la salida del control difuso, el control difuso muestra mayor robustez que el regulador convencional a mayor número de ciclos y a mayor carga (pruebas donde la potencia es mayor a 0.45 p.u.).

- Las funciones de membresía de la derivada del error permiten un ajuste fino sobre la regulación del voltaje en terminales.

- TS logra guiar al control difuso sobre regiones diversas que permiten obtener buenos resultados apoyándose principalmente sobre las técnicas de intensificación y diversificación.

- La búsqueda por tabú muestra gran flexibilidad ante espacios de búsqueda pequeños tal como la tabla de reglas lingüísticas y tiene la capacidad de establecer memorias combinatorias en largo y corto plazo.

- La búsqueda por tabú no necesita establecer procedimientos matemáticos complicados debido a que establece un procedimiento de memoria parecido a un ser humano con una lógica simple.

- Una vez que TS logra establecer la memoria asociada de calidad de cada solución vecina visitada el criterio de baja influencia marca su trayectoria con respecto al criterio de alta influencia, esto se debe a que una vez liberada la falla ambos criterios eligen la mejor solución teniendo un comportamiento igual mas o menos un par de segundos, después de este tiempo ambas siguen rutas seleccionadas al criterio de calidad del umbral establecido por cada criterio de influencia (ver prueba figura 5.63 sección 5.3.10).

- La búsqueda por tabú demuestra ser mejor técnica que algoritmos genéticos debido a su capacidad de recordar apropiadamente cada solución visitada y su flexibilidad ante cualquier tamaño del espacio de búsqueda

- Los algoritmos genéticos muestran una mayor robustez que el regulador convencional al igual que la búsqueda por tabú.

- Los algoritmos genéticos presentan las mismas características de explotación y exploración de regiones tal como lo hace la búsqueda por tabú, permitiendo al control difuso desenvolverse en varios puntos de operación semejante a la búsqueda por tabú.

- El operador de mutación aumenta la diversidad genética.

- Los algoritmos genéticos presentan las mismas desventajas que la mayora de los seres vivos ante situaciones extremas de su entorno.

- Si no se establecen adecuadamente los parámetros de los algoritmos genéticos se pueden presentar convergencias prematuras esto se debe a que existen individuos mucho más aptos que el resto de la población.

- A través de los algoritmos genéticos se pueden representar los individuos por una denominación binaria o real.

- Los algoritmos no pueden ser aplicados a la tabla de reglas lingüísticas ya que se trata de un espacio de búsqueda pequeño.

- La forma más segura de conocer si los algoritmos genéticos han encontrado una solución cercana al óptimo global o el mismo óptimo global es probando la solución proporcionada por los algoritmos genéticos al finalizar el número de generaciones propuestas y analizar si la respuesta del sistema es la deseada o benéfica (Figura 5.217 y sección 5.6).
- Los algoritmos genéticos demuestran ser una guía maestra de heurísticas gracias a la diversificación establecida por la misma técnica (pruebas de la sección 5.6).

- Los algoritmos genéticos presentan una limitante ante una mal interpretación del dominio y puede ser engañosa para el diseñador.

- El control difuso demuestra ser una herramienta poderosa en la inteligencia artificial y en la resolución de problemas prácticos (todas las pruebas).

- El paralelismo manejado por los algoritmos genéticos permite analizar la salida del sistema en base a la concatenación de varias variables del mismo sistema o del controlador a la vez.

- Los algoritmos genéticos resultan ser una técnica que inicia sobre un panorama incierto logrando encontrar rutas acertadas que llevan al control difuso a la solución adecuada en otras palabras algoritmos genéticos no necesita conocer el problema para poder resolverlo.

- La principal desventaja de ambas técnicas es establecerlas sobre un dominio de trabajo adecuado habilitando más sus cualidades de optimización y no están limitadas a una sola área en particular de la ingeniería (ver estructuras asociadas a la búsqueda y a las funciones de membresía finales).

- La búsqueda por tabú esta solo limitada ante la imaginación del diseñador, característica que la hace más interesante que otras técnicas.

- La optimización de las funciones de membresía resulto ser más flexible que una optimización sobre la tabla de reglas debido a que se puede modificar la ganancia que origina el valor en la dedifusificación.

## *6.2 RECOMENDACIONES A TRABAJOS FUTUROS.*

- Realizar la búsqueda por tabú enfocada a las funciones de membresía ya que permite encontrar más rápidamente los intervalos adecuados de las funciones de membresía y no requiere de una estructura asociada complicada.

- Implementación práctica de la técnica de optimización basada en algoritmos genéticos y búsqueda por tabú para el caso de la sintonización de las funciones de membresía y para la tabla de reglas lingüísticas.

- Implementar un espacio de búsqueda mas grande sobre el universo de discusión para la optimización de las funciones de membresía.

- No tratar de utilizar AG sobre la tabla de reglas ya que se trata de un espacio pequeño de búsqueda.
- Implementación de una red neurodifusa empleando los algoritmos genéticos y la búsqueda por tabú incluyendo más variables de control y controladas que permitirán mayor inteligencia al controlador difuso.

- Trabajar sobre la autosintanozación de las constantes $K_p$ y $K_I$ empleando técnicas inteligentes.

- Trabajar con funciones de comportamiento (función objetivo) para cada técnica.

## REFERENCIAS.

[1] Kevin M. Passino & Stephen Yurkovich, "Fuzzy Control", Ed. Addison Wesley.

[2] Shimon Y. Nof, "Handbook of Industrial Robotic". 1999. Ed. Wiley.

[3] Glover, Fred. Tabu Search, 1997. Edited by Kluwer Academic Publishers.

[4] Driankov Dimiter & Reinfrank Michael, An introduction to fuzzy control. Ed. Springer.

[5] Xia. D. "Self-tunning Controller for Generator Excitation Control" IEEE Trans. on power Apparattus and systems, paginas 1877-1885, June 1983.

[6] Ruiz R., Hugo Control Difuso autosintonizable de voltaje por medio de la búsqueda por tabú para un generador sincrono, SEPI-ESIME-IPN, abril 2002.

[7] Robert H. Bishop, "Robust control systems with genetic algorithms", CRC PRESS, 2002.

[8] Goldberg, "Genetic algorithms in search", optimization, and machine learning.Addison wesley, 1989.

[9] Dorf, "Sistemas modernos de control", Addison wesley, 1989.

[10] Ágoston Endre, Zbigniew Michalewicz "Parameter control in evolutionary algorithms" IEEE transactions on evolutionary computation,vol. 3, no. 2 july 1999

[11] Apuntes de Control Inteligente, Dr. David Romero R., SEPI-ESIME-IPN, 2004

[11] Apuntes de Máquinas Avanzadas, Dr. Daniel Olguín Salinas, SEPI-ESIME-IPN. 2004

[12] M. C. Raúl Cortes M. "Control de excitación Difuso de un generador sincrono", 30 de julio de 1997.

[13] Belén Melián, Tabú Search, Departamento de estadística I.O. y computación. Universidad de La Laguna, España.

[14] Kiochi Nara & Y.H. Song, "Modern Heuristics application to distribution system optimization", Ibaraki University & Brunel University, Japan, 1999.

[15] K.L.LO & Laiq Khan "Fuzzy logic based svc for power sysytem transient stability enhancement", University of Strathclyde, United Kidgdom.

[16] Jaroslaw Arabas & Jan Mulawka, "A genetic algorithm with varying population size", Poland,1999

[17] Adam Marczyk. "Algoritmos genéticos y computación evolutiva". Departamento de Informática, universidad de Colorado, 2004.

[18] E. Trillas & S. Guadarrama, "On some logical aspects of numerical fuzzy Inference", Departamento de inteligencia artificial de la Universidad Politécnica de Madrid, 2001.

[19] Hiroyuki Mori & Yasuyuki Sone, "A simplified fuzzy inference method with tabu search for short-term load forecasting in power systems", Meiji University, Japan.

[20] Zbigniew Michalewicz & Maciej Michalewicz, "Evolutionary computation techniques and their applications", University of North Carolina-Charlotte, USA, 1997

[21] Li Xi Wang, "Adaptive fuzzy systems and control", University of California Berkeley, Prentice Hall 1994.

[22] Marlin O. Thurston, "Diseño de sistemas de control Robusto", Departamento de Ingeniería eléctrica de la Universidad de Ohio.

[23] Logan O., "Teoría de conjuntos difusos", Prentice Hall, 1995.

[24] H. Mendoza Gerardo, "Control difuso de un motor de corriente directa", SEPI-ESIME-IPN, 1997.

[25] IEEE Recommended Practice for Exitation models sysytem for power system stability studies, The institute of electrical and electronic engineers, March 19, 1992, USA.

[26] U. Sandler, "Evolution of fuzzy systems and dinamic theory", Jerusalem College of technology.

[27] C.S. Chang, J.S. Low and D. Srinivasan. "Application of tabu search in optimal sysrtem design and operation of MRT power system supply", IEEE, 2000.

[28] Karaboga D. & Pham D.T., "Intelligent optimization techniques", Springer 2000.

[29] Kundur, "Power System Stability and Control", Mc Graw Hill, 1994.

[30] Katsuhito Ogata, "Ingeniería moderna de control", Prentice Hall, 2001.

# *Apéndices*

# APÉNDICE A

## *A.1 PARÁMETROS DEL CONTROLADOR DIFUSO*

## *A.2 FUNCIONES DE MEMBRESÍA Y TABLA DE REGLAS LINGÜÍSTICAS UTILIZADAS.*

A continuación se presenta el tipo y tamaño de cada una de las tablas de reglas lingüísticas utilizadas:

**BASE DE REGLAS UTILIZADAS** (*sintonizadas manualmente*).

- A continuación se presenta la tabla de 25 reglas lingüísticas.

| ***Δe*** \| ***e*** | **NGR** | **NME** | **ZE** | **PME** | **PGR** |
|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | NG | NG | NG | NM | CE |
| **NME** | NG | NM | NP | CE | PM |
| **ZE** | NG | NM | CE | PM | PG |
| **PME** | NM | CE | PM | PM | PG |
| **PGR** | CE | PM | PG | PG | PG |

**Tabla A.1** Base de 25 reglas lingüísticas para un controlador difuso estático.

Donde el significado de las etiquetas y acciones lingüísticas del error y la derivada del error para la tabla de 25 reglas es:

- **NGR**: Negativo Grande
- **NME**: Negativo mediano
- **ZE** : Cero
- **PME**: Positivo mediano
- **PGR**: Positivo Grande

Para las acciones:

- **BG**: Bajo grande
- **BM**: Bajo mediano
- **CE**: Cero
- **AM**: Aumento mediano
- **AG**: Aumento Grande

| ***Δe*** \| ***e*** | **NGR** | **NME** | **NPE** | **ZE** | **PPE** | **PME** | **PGR** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | BG | BG | BG | BM | BP | BP | **CE** |
| **NME** | BG | BG | BM | BM | BP | **CE** | AP |
| **NPE** | BG | BM | BM | BP | **CE** | AP | AP |
| **ZE** | BM | BM | BP | **CE** | AP | AM | AM |
| **PPE** | BP | BP | **CE** | AP | AM | AM | AG |
| **PME** | BP | **CE** | AP | AP | AM | AG | AG |
| **PGR** | **CE** | AP | AP | AM | AG | AG | AG |

**Tabla A.2** Base de 49 reglas lingüísticas para un controlador difuso estático.

Donde el significado de las etiquetas y acciones lingüísticas del error y la derivada del error para la tabla de 49 reglas es:

- **NGR**: Negativo grande
- **NME**: Negativo mediano
- **NPE**: Negativo pequeño
- **ZE**: Cero
- **PPE**: Positivo pequeño
- **PME**: Positivo mediano
- **PGR**: Positivo grande

Para las acciones:

- **NG**: Aumento negativo grande
- **NM**: Aumento negativo mediano
- **NP**: Aumento negativo pequeño
- **CE**: Cero
- **PP**: Aumento positivo pequeño
- **PM**: Aumento positivo mediano
- **PG**: Aumento positivo grande

- Tabla de 81 reglas lingüísticas

| $\Delta e$ \| $e$ | **NGR** | **NME** | **NPM** | **NPE** | **ZE** | **APE** | **APM** | **AM** | **AG** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | NG | NG | NG | NM | NM | NPM | NPG | NPP | **CE** |
| **NME** | NG | NG | NM | NM | NPM | NPM | NPP | **CE** | APP |
| **NPM** | NG | NM | NM | NPM | NPM | NPP | **CE** | APP | APM |
| **NPE** | NM | NM | NPM | NPM | NPP | **CE** | APP | APM | APM |
| **ZE** | NM | NPM | NPM | NPP | **CE** | APP | APM | APM | AM |
| **APE** | NPM | NPM | NPP | **CE** | APP | APM | APM | AM | AM |
| **APM** | NPM | NPP | **CE** | APP | APM | APM | AM | AM | AG |
| **AM** | NPP | **CE** | APP | APM | APM | AM | AM | AG | AG |
| **AGR** | **CE** | APP | APM | APM | AM | AM | AG | AG | AG |

**Tabla A.3** Base de 81 reglas lingüísticas para un controlador difuso estático.

Donde el significado de las etiquetas y acciones lingüísticas para el error y la derivada del error para la tabla de 81 reglas es:

- **NGR**: Negativo grande
- **NME**: Negativo mediano
- **NPM**: Negativo pequeño
- **NPE**: Negativo pequeño
- **ZE**: Cero
- **APE**: Positivo pequeño

- **PPM**: Positivo pequeño
- **PME**: Positivo mediano
- **PGR**: Positivo grande

Para las acciones:

- **NGR**: Aumento negativo grande
- **NME**: Aumento negativo mediano
- **NPM**: Aumento negativo pequeño
- **NPE**: Aumento negativo pequeño
- **ZE**: Cero
- **APE**: Aumento positivo pequeño
- **PPM**: Aumento positivo pequeño
- **PME**: Aumento positivo mediano
- **PGR**: Aumento positivo grande

## *FUNCIONES DE MEMBRESÍA.*

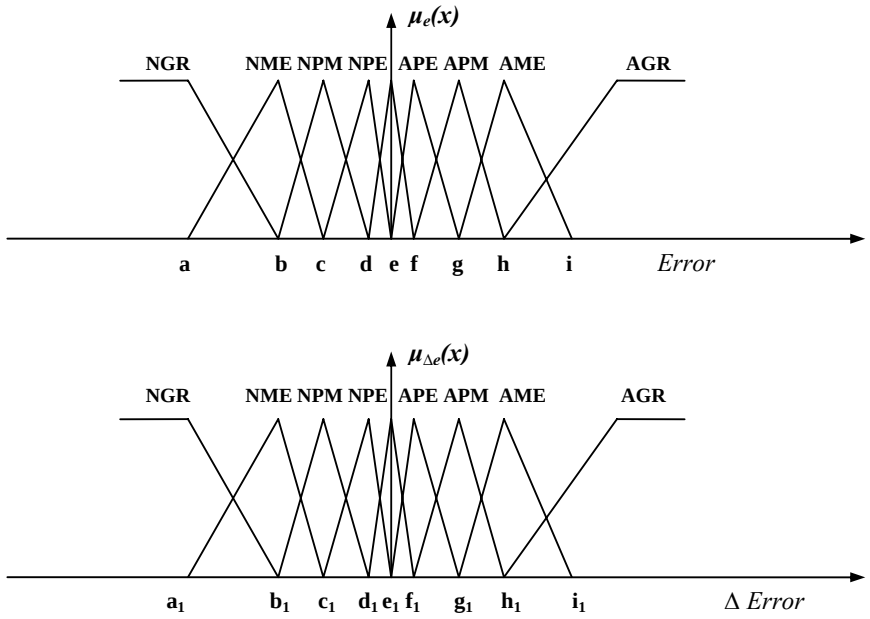



**Figura A.1** Funciones de membresía para una base de 81 reglas lingüísticas.

Donde:
a = -0.14, b = -0.07, c = -0.05, d = -0.03, e = 0, f = 0.03, g = 0.05, h = 0.07, i = 0.14
$a_1$ = -0.0002, $b_1$ = -0.00045, $c_1$ = -0.0003,$d_1$ = -0.0002, $e_1$ = 0, $f_1$ = 0.0002, $g_1$ = 0.0003, $h_1$ = 0.00045, $i_1$ =0.0002

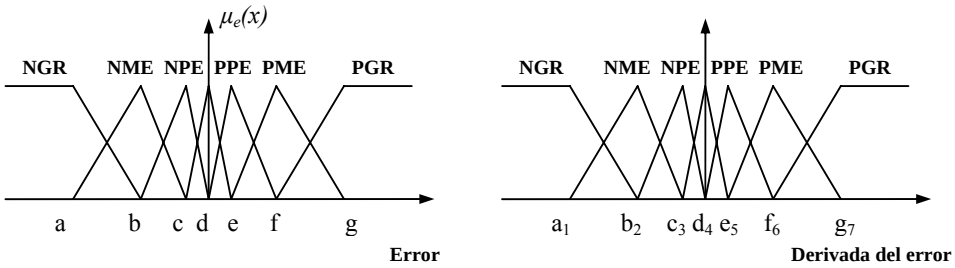



**Figura A.2** Funciones de membresía para una base de 49 reglas lingüísticas.

a = -0.14, b = -0.07, c = -0.04, d = 0, e = 0.04, f = 0.07, g = 0.14
$a_1$ = --0.0025, $b_1$ = --0.0007, $c_1$ = -0.0004, $d_1$ = 0, $e_1$ = 0.0004, $f_1$ = 0.0007, $g_1$ =0.00025

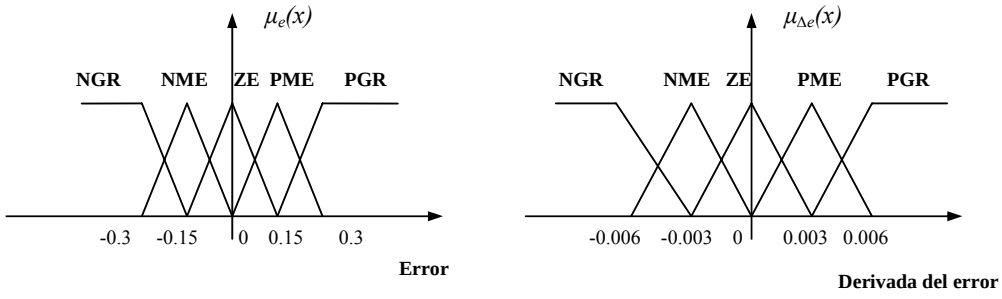



**Figura A.3** Funciones de membresía para una base de 25 reglas lingüísticas.

# APÉNDICE B

## *B.1 ÍNDICES DE FUNCIONAMIENTO.*

Un índice de funcionamiento es una medida cuantitativa del funcionamiento de un sistema y se elige de forma que resalte las especificaciones importantes del sistema. La teoría moderna del control presupone que los ingenieros de sistemas pueden especificar cuantitativamente el funcionamiento requerido del sistema; entonces se puede calcular un índice de funcionamiento requerido del sistema. Dicho índice se puede utilizar para mejorar el diseño de un sistema o diseñar un sistema de control adaptable, se debe medir y elegir un índice de funcionamiento adecuado, por ejemplo si un determinado índice de funcionamiento alcanza un valor extremo entonces se considera un sistema de control óptimo, comúnmente un valor mínimo.

Existen diferentes representaciones utilizables del índice de funcionamiento tales como a continuación se muestra:

- Integral del cuadrado del error, ICE.

$$I_1 = \int_0^T e^2(t)\, dt. \qquad \text{B.1}$$

- Integral de la magnitud absoluta del error IAE, la cual se describe como:

$$I_2 = \int_0^T |\, e(t)|\, dt \qquad \text{B.2}$$

Este índice es particularmente útil para estudios de simulación en computadoras. Para reducir la contribución del error inicial al valor de la integral del funcionamiento, así como para destacar los errores que ocurren después en la respuesta.

- Este índice se designa como la integral del tiempo multiplicada por el error absoluto, ITEA

$$I_3 = \int_0^T t\, |e(t)\, dt \qquad \text{B.3}$$

Este índice de funcionamiento proporciona la mejor selectividad de los índices de funcionamiento; es decir el valor mínimo de la integral se discierne fácilmente a medida que varían los parámetros del sistema.

- Otro índice semejante es la integral del tiempo multiplicada por el error al cuadrado, ITEC el cual es:

$$I_4 = \int_0^T t\, e^2(t)\, dt \qquad \text{B.4}$$

La forma general de la integral de funcionamiento:

$$I = \int_0^T f(e(t), r(t), c(t), t)\, dt \qquad \text{B.5}$$

Donde f es una función del error, la entrada la salida y el tiempo. Evidentemente podemos obtener numerosos índices basados en diferentes combinaciones de las variables y el tiempo del sistema.

# APÉNDICE C

## C.1 MODELO MATEMÁTICO

### C 1.1 MODELO MÁQUINA-BUS INFINITO

El modelo del generador síncrono corresponde a un generador de 645 MVA acoplado a una turbina térmica donde se emplean una línea de transmisión tal como se muestra en la figura C.1.

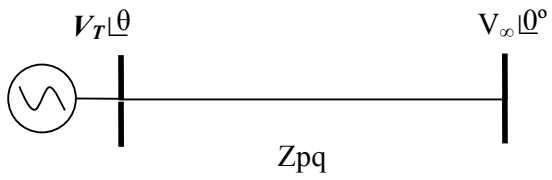



**Figura. C.1.** Representación de sistema maquina bus-infinito

Se considera en este trabajo el modelo de 5to orden de la máquina síncrona (modelo no recíproco aproximado) en p.u. [5], donde las ecuaciones diferenciales que expresan el modelo de estado son:

**Ecuaciones diferenciales:**

$$p\delta_r = \omega_o * s \quad \text{C.1}$$
$$M*ps = K_d*s + T_m - T_e \quad \text{C.2}$$
$$Td_0*pe'_q = V_f - (X_d - X'_d)*id - e'_q \quad \text{C.3}$$
$$T'_{d0}*pe''_q = e'_q - (X'_d - X''_q)*i_q - e''_d \quad \text{C.4}$$
$$T'_{q0}*pe''_d = (X_q - X''_q)*i_q - e''_d \quad \text{C.5}$$

**Donde:**

$$e''_d V_d + ra*i_d - X''_q*i_q \quad \text{C.6}$$
$$e''_q = V_q + r_a*i_q + X''*i_d \quad \text{C.7}$$
$$T_e = e''_d*i_d + e''_q*i_q - (X''_d - X''_q)*i_d*i_q \quad \text{C.8}$$

Para el modelo de la línea de transmisión se representa por una impedancia equivalente de Thevenin y el voltaje terminal en sus componentes en el voltaje del eje de cuadratura y el eje directo como:

$$V_d = V_b sen_\delta + r_e*i_d - Xe*i_q \quad \text{C.9}$$
$$V_q = V_b cos_\delta + r_e*i_q + Xe*i_d \quad \text{C.10}$$
$$V_T^2 = V_d^2 + V_q^2 \quad \text{C.11}$$

Con respecto a la ecuación de oscilación [29] (masa-resorte de 2$^{do}$ orden) se tiene el diagrama a bloques tal como se muestra en la figura C.2

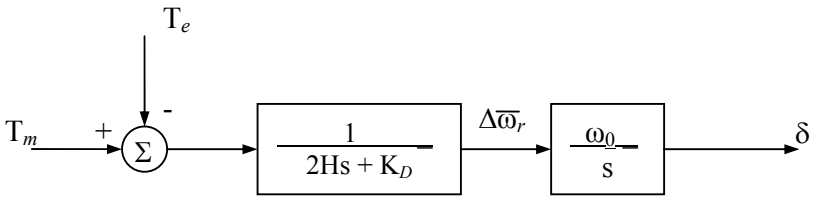



**Figura C.2** Representación del diagrama de bloques de la ecuación de oscilación.

Por lo tanto si se sabe que:

$$T_M = 2H \qquad \text{C.12}$$

y

$$\Delta\varpi_r = s \qquad \text{C.13}$$

Por lo tanto en el dominio de la frecuencia se tiene:

$$\delta = \Delta\varpi_r * \frac{\omega_0}{s} \qquad \text{C.14}$$

Y tomando la transformada inversa de Laplace se tiene:

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega_0 * s \qquad \text{C.15}$$

Para el siguiente bloque se tiene:

$$\frac{\Delta\varpi_r}{T_e - T_m} = \frac{1}{2Hs + K_D} \qquad \text{C.16}$$

Transformando la ecuación anterior

$$\frac{ds}{dt} = \frac{(T_m - T_e - sK_d)}{T_M} \qquad \text{C.17}$$

## C1.2 MODELO DEL SISTEMA DE EXITACIÓN.

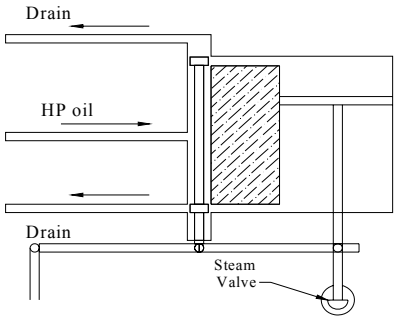
El tipo de sistema de excitación es de tipo AC rotatorio y queda representado por la siguiente expresión:

$$Tx * pV_f = u - V_f \qquad \text{C.18}$$

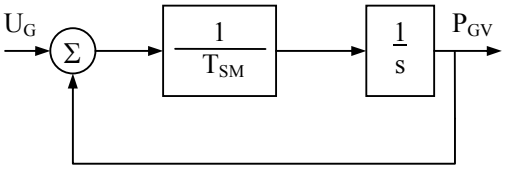
La excitatriz con fuente de potencial atraves de rectificadores controlados con alimentación directa al campo principal del generador no utiliza anillos deslizantes con diodos rectificadores y en este trabajo el voltaje límite es proporcional al voltaje producido.

## C1.3 MODELO DE LA TURBINA Y GOBERNADOR DE VELOCIDAD.

El tipo de gobernador empleado en este trabajo es mécanico-hidráulico, no se considera limitador de posición para la válvula y no se considera el relevador de velocidad tal como se muestra en la figura C.2 [29] [5].




C.3 (a) Diagrama esquematico




C.3 (b) Diagrama a bloques del modelo

**Figura C.3.** Servomotor hidraulico.

Para el modelo de la turbina se emplea una turbina térmica de simple recalentamiento modificada [29], por lo tanto se realiza el incremento y decremento de la potenciua activa mediante la manipulación de la entrada al gobernador Ug sin hacer control sobre el primario (primomotor), por lo tanto las ecuaciones que representan el modelo de la turbina y el gobernador de velocidad son:

Modelado de la turbina y gobernador de velocidad.

$$T_{SM} = pP_{GV} - P_{gv} \quad \text{C.19}$$

$$T_{CH} * pP_{HP} = P_{GV} - P_{HP} \quad \text{C.20}$$

$$T_{RH} * pT_m = F_{HP} * pP_{HP} + P_{HP} - T_m \quad \text{C.21}$$

Donde los parámetros de la maquina bus-infinito son:

| ***Variable*** | | ***Variable*** | |
|---|---|---|---|
| ω | 377.0 | $X_e$ | 0.115 |
| M | 5.5294 | $R_e$ | 0.024 |
| Kd | 3.0 | $T_{SM}$ | 0.1 |
| T'd0 | 5.66 | $T_{CH}$ | 0.15 |
| T''d0 | 0.041 | $T_{RH}$ | 0.15 |
| T''q0 | 0.065 | $F_{HP}$ | 0.33 |
| Xd | 1.904 | $K_A$ | 400.0 |
| X'd | 0.312 | $T_A$ | 0.02 |
| X''d | 0.266 | $K_F$ | 0.008 |
| Xq | 1.881 | $T_F$ | 1.0 |
| X''q | 0.260 | $T_x$ | 0.025 |
| ra | 0.0 | | |

**Tabla C.1** Parámetros del modelo de la máquina bus-infinito.

## C.2 MODELO DEL REGULADOR CONVENCIONAL ST1.

A continuación se muestra el diagrama de bloques del regulador de voltaje convencional tipo ST1:

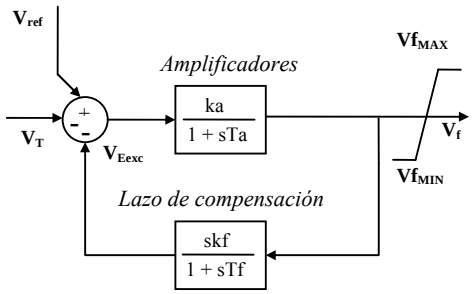



**Figura. C.4** Diagrama a bloques del regulador ST1

Teniendo el siguiente sistema de ecuaciones:

$$T_A pV_{f1} = K_A(V_{ref} - V_T - V_{Eexc}) - V_{f1} \qquad \text{C.22}$$

$$T_f pV_{Eexc} = K_f pV_f - V_{Eesxc} \qquad \text{C.23}$$

Donde p es el operador: $p = d/dt$ y $V_{excmin} = V_{fmin}$

## C.3 CONDICIONES INICIALES.

Para el cálculo de las condiciones iniciales se consideran las ecuaciones C.1-C.11 y el diagrama vectorial caso subtransitorio de la maquina-bus infinito mostrado en la figura C.5 [5].

Tal como se menciono anteriormente la red se considera en este modelo como una impedancia externa que conecta la máquina síncrona con el bus infinito. Para el voltaje terminal ($V_T$) y su ángulo ($\theta$) son datos que se conocen al inicio en parte real e imaginaria quedando las siguientes expresiones:

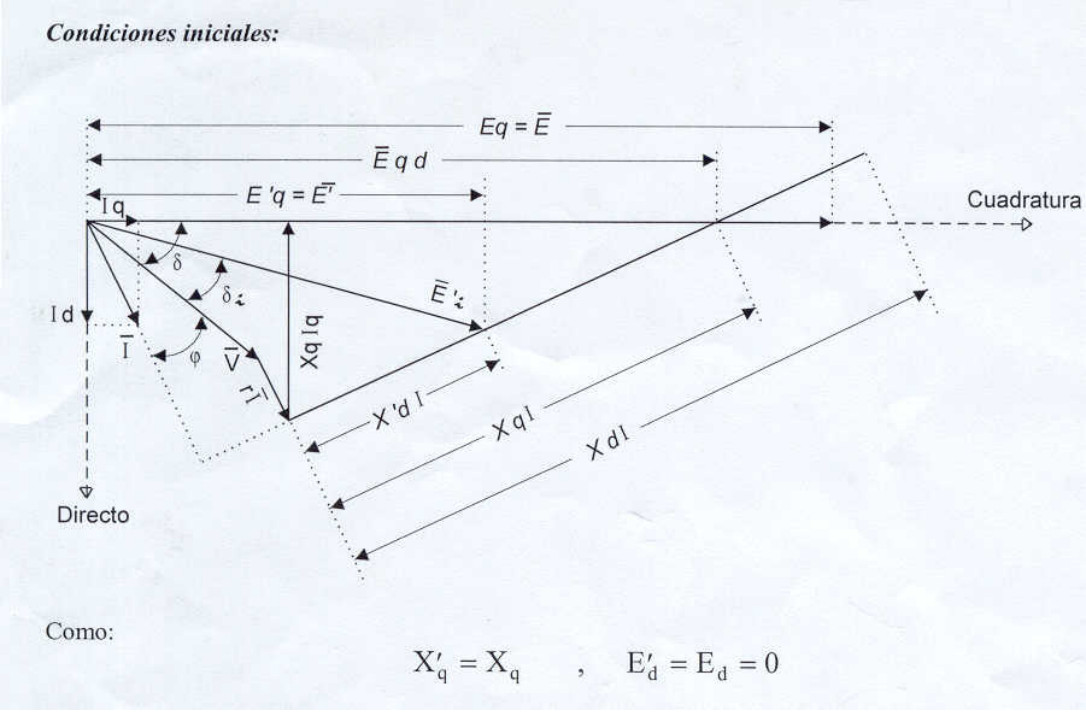



**Figura C.5** Diagrama fasorial caso subtransitorio de la máquina-bus- nfinito

$$V_T = e_T r + j e_T i \qquad \text{C.24}$$

Donde:

$$e_T r = V_T \cos\theta$$
$$e_T i = V_T sen\theta$$

El voltaje en el bus es un dato conocido como $V_b = V_b \angle 0$ por lotanto.

La potencia eléctrica se conoce a partir de la siguiente expresión:

$$\tilde{S}_R = P_R + jQ_R = \tilde{E}_R \tilde{I}^* = \tilde{V}_b \left[ \frac{\tilde{V}_b - \tilde{V}_T}{jX} \right]^* \qquad \text{C.25}$$

**GENERADOR.**

Para el generador se tiene que partir del diagrama fasorial de la figura C.5 para el cálculo del ángulo de carga se toma como eje x sobre $\overline{V}$ = V∠0 & $\overline{I}$ = I∠-φ por lo tanto se tiene la siguiente expresión:

$$\overline{E}_{qd} = e_{qx} + je_{qy} \qquad \text{C.26}$$

Donde:

$$\begin{aligned} e_{qx} &= V_T + r_a i_a \cos\varphi + X_q i_a sen\varphi \\ e_{qy} &= -r_a i_a sen\varphi + X_q i_a \cos\varphi \end{aligned} \qquad \text{C.27}$$

$\therefore$ Se tiene la siguiente expresión:

$$\delta = tg^{-1}(e_{qy}, e_{qx}) \qquad \text{C.2}$$

Deslizamiento s. Haciendo cero la derivada de la ecuación C.1 se tiene:

$$\begin{aligned} 0 &= \omega_0 s \\ s &= 0 \end{aligned} \qquad \text{C.29}$$

Voltaje transitorio en el eje de cuadratura e`q: Haciendo cero cero la derivada de la ecuación C.3 se tiene:

$$0 = e'_q - (X`_d - X``_d) i_d - e``_q \qquad \text{C.30}$$

Voltaje subtransitorio en el eje de cuadratura $e``_q$.

$$e``_d = V_T sen\delta + r_a i_q + X``_d i_d \qquad \text{C.31}$$

Para el par mecánico se tiene:

$$T_m = e``_d i_d + e``_q i_q \qquad \text{C.32}$$

# APÉNDICE D

## *D.1CONCEPTOS DE OPTIMIZACIÓN Y LÓGICA DIFUSA.*

***FUNCIÓN OBJETIVO*:** Es una función f(x) que al ser optimizada es llamada función objetivo y se aplica sobre:

$$f: R^n \rightarrow R$$

La función objetivo nos permite encontrar los máximos o mínimos locales o globales de si misma debida a una optimización realizada sobre la misma función objetivo, en T.S. permitiremos mapear dicha función sobre un dominio de búsqueda establecido X que nos permitirá obtener una optimización combinatoria, algunas de las características importantes sobre dicha función es: una función objetivo es llamada unimodal si tiene solamente un mínimo local o de lo contrario es llamada multimodal. Los métodos de optimización global permiten encontrar ambos valores óptimos de una función objetivo y el valor óptimo respectivo de las variables (del controlador y de los parámetros del controlador). A continuación se muestra un ejemplo gráfico de una función objetivo $f(x_1)$ unidimensional unimodal con dos mínimos locales y un mínimo global en el dominio del espacio de búsqueda.

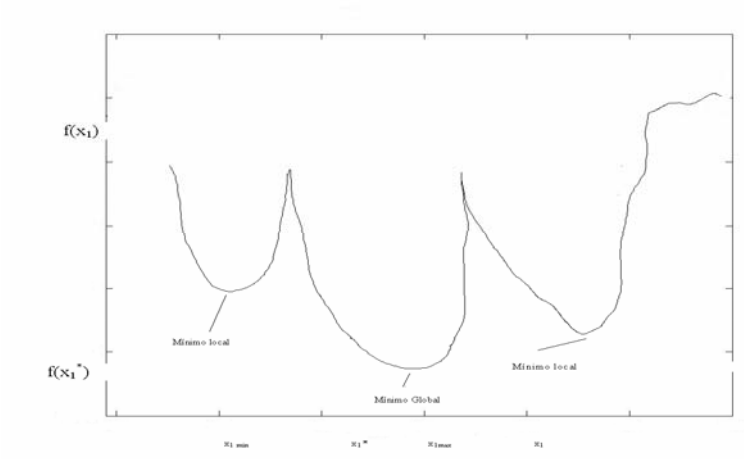



**Figura D.1** Ejemplo de una función unimodal

***META-HEURISTICA*** El término meta-heurístico fue introducido en el mismo articulo que publico Glover (1986) y se ha convertido en una aplicación en la literatura reciente. Una meta heurística se refiere a una meta maestra que guía y modifica a otras heurísticas que producen soluciones más allá de aquellas que son generadas en una búsqueda por el óptimo local. Las heurísticas guiadas por una meta-estrategia pueden ser procedimientos de alto nivel o que envuelve nada más que una descripción de movimientos disponibles que transforman una solución dentro de otra, ambas con reglas de evaluación asociadas.
La clasificación de las meta-heuristicas en términos de sus características con respecto a tres opciones básicas de diseño son: (a) el uso de la memoria adaptable, (b) el tipo de exploración de vecindario usada y (c) el número de soluciones actuales llevadas de una iteración a otra.

## *D.4 LÓGICA DIFUSA.*

A continuación se describe la lógica matemática del modelo descrito en la figura 2.1 en base a las siguientes características (figura D.2):

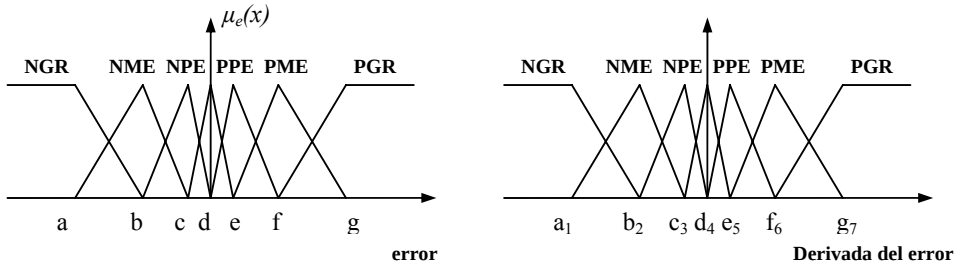



**Figura D.2** Funciones de membresía para el error y la derivada del error para una base de 25 reglas lingüísticas.

a = -0.14, b = -0.07, c = -0.04, d = 0, e = 0.04, f = 0.07, g = 0.14

$a_1$ = -0.0025, $b_1$ = -0.0007, $c_1$ = -0.0004, $d_1$ = 0, $e_1$ = 0.0004, $f_1$ = 0.0007, $g_1$ =0.00025

- Tabla de 49 reglas lingüísticas

| $\Delta e$ \| $e$ | **NGR** | **NME** | **NPE** | **ZE** | **PPE** | **PME** | **PGR** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **NGR** | BG | BG | BG | BM | BP | BP | **CE** |
| **NME** | BG | BG | BM | BM | BP | **CE** | AP |
| **NPE** | BG | BM | BM | BP | **CE** | AP | AP |
| **ZE** | BM | BM | BP | **CE** | AP | AM | AM |
| **PPE** | BP | BP | **CE** | AP | AM | AM | AG |
| **PME** | BP | **CE** | AP | AP | AM | AG | AG |
| **PGR** | **CE** | AP | AP | AM | AG | AG | AG |

**Tabla D.1** Base de 49 reglas lingüísticas para un controlador difuso estático.

Donde el significado de las etiquetas y acciones lingüísticas del error y la derivada del error para la tabla de 49 reglas son:

- **NGR**: Negativo grande
- **NME**: Negativo mediano
- **NPE**: Negativo pequeño
- **ZE**: Cero
- **PPE**: Positivo pequeño
- **PME**: Positivo mediano
- **PGR**: Positivo grande

Para las acciones:

- **NG**: Aumento negativo grande
- **NM**: Aumento negativo mediano
- **NP**: Aumento negativo pequeño
- **CE**: Cero
- **PP**: Aumento positivo pequeño
- **PM**: Aumento positivo mediano
- **PG**: Aumento positivo grande

Donde:

- **NG** = -7
- **NM** = -4
- **NP** = -1
- **CE** = 0
- **PP** = 1
- **PM** = 4
- **PG** = 7

La aplicación del control depende del siguiente orden:

***DIFUSIFICACIÓN:*** Conversión de valores reales en conjuntos difusos. Utilizando la teoría de conjuntos difusos y operadores difusos tal conversión comienza a partir de los siguientes valores reales (valores supuestos):

**Error** = -0.034
**Derivada del error** = 0.0125

Si obtenemos las funciones de membresía características (ver tabla E 1.1) para el error y la derivada del error obtenemos las siguientes expresiones como antecedentes:

Error (-0.034) = ***0.15 (ZE), 0.85(NPE)***
Derivada del error (0.00125) = ***0.694(PME), 0.3055 (PGR)***

El siguiente paso es calcular los pesos de cada de cada regla (grado de verdad) utilizando el operador Mamdani min-max donde cada consecuencia de cada premisa es el **mínimo** de los valores relacionados por ***y*** de tal manera que:

Si error es (0.15)**ZE** y Δerror es (0.694)**PME** entonces u = **AP** (0.15)
Si error es (0.15)**ZE** y Δerror es (0.3055)**PGR** entonces u = **AM** (0.15)
Si error es (0.85)**NPE** y Δerror es (0.694)**PME** entonces u = **AP** (0.694)
Si error es (0.85)**NPE** y Δerror es (0.3055)**PGR** entonces u = **AP** (0.3055)

La salida difusa es calculada a partir del máximo de cada peso de las reglas.

u = AP (0.694)
u = AM (0.15)

***DEDIFUSIFICACION.*** En este paso una vez obtenidos los valores difusos convertiremos dichos valores en salidas difusas utilizando "centro de gravedad" establecido por la siguiente ecuación:

$$u = \frac{\sum_{i=1}^{R} u\mu_u(u_i)}{\sum_{i=1}^{R} \mu_u(u_i)} \qquad \text{D.1}$$

Por lo tanto sustituyendo valores se tiene:

u = [(0.694*1) + (4*0.15)]/[0.694 + 0.15] = 1.294/0.844 = 1.53 p.u.

Debido a que se trata de un control difuso tipo PI (Proporcional e integral) esta dado por la siguiente ecuación:

$$u = K_p * e + K_I * \int e dt \qquad \text{D.2}$$

Donde Kp y KI son las constantes de proporcionalidad e integral respectivamente.

# APÉNDICE F

## *F.1 SIMULACION DIGITAL.*

El programa establecido para el control utilizando las técnicas de TS y AG para la sintonización de las funciones de membresía y tabla de reglas es AGTS.CPP, que cuenta con una librería de datos llamada BAGTS.H.

Cuenta con las siguientes funciones dentro de la función principal:

**carga2().** Esta funcionj permite trabajar el generador desde la condición de vacío hasta un punto de operación donde la potencia activa es igual a 0.78 p.u. en menos de 100 segundos de simulación.

**intervalos(xe,xce).** La función intervalos es separada de la función control_mandani para obtener intervalos de funciones de membresía flexibles que podrán ser optimizados por AG y TS, donde xe son los valores de los intervalos del error y xce para los intervalos de la derivada del error.

**vecinos(pe).** Esta función poermite establecer en cada iteración cuales son los vecinos de la solución actual en la tabla de reglas, donde pe es la posición actual de la acción lingüística correspondiente.

**busqueda_tabus(iter).** Esta función describe el desarrollo de una búsqueda tabú enfocada a la tabla de reglas, donde iter es la iteración actual, esto se utiliza para tener referencia del tiempo y ayuda básicamente a tratar las multas, incentivos, y estado tabú.

**algoritmos_geneticos().** Esta función desarrolla la sistematica de un algoritmo genetico simple pidiendo los parámetros correspondientes.

**Control_mandani().** Esta función es el control difuso empleado en este trabajo.

**ts(iter).** Desempeña el mismo rol que búsqueda_tabus(iter) pero empleada para las funciones de membresía.

**runge_kutta().** Es el método de integración ocupado.

A continuación se muestra los pasos a seguir durante una simulación clásica de AGTS. CPP:

**Tiempo inicial de la simulación:**

0
# de segundo de incio (recomendable cero)

**Tiempo final de la simulación**

10(tfinal)

Si se simula una falla recomendable 10, se puede solicitar un tiempo más grande si se requiere analizar el comportamiento durante un inrementop de carga, si solicitas esta función no la introduzcas como comentario.

**Paso de integración**

0.004

Datos del voltaje de armadura para la maquina sincrona.

**Magnitud:** 1.0

**Elige el tipo de linea Larga[1] o corta[2]:**

1

**Angulo (en voltaje en terminales):**

0

**Se simula una falla en el sistema [1] si [2] no:**
si
**tiempo de incio de la falla**

1 seg

**Duración de ciclos de la falla**:

20

**Elige el número de funciones de membresía [1] 5, [2] 7 ó [3] 9**

2

Que tipo de control deseas:
1. difuso [1]
2. TS a funciones [2]
3. Algoritmos geneticos [3]
4. TS a vecindades laterales[4]
5. T.S. y A.G. [5]: 5

Datos requeridos para la búsqueda por tabú:

**Tsumado(tadd)** = 0.125
**Teliminado(tdrop)** = 1
**Tipo de influencia Alta[1] o Baja[2]:** 1

Algoritmos geneticos:

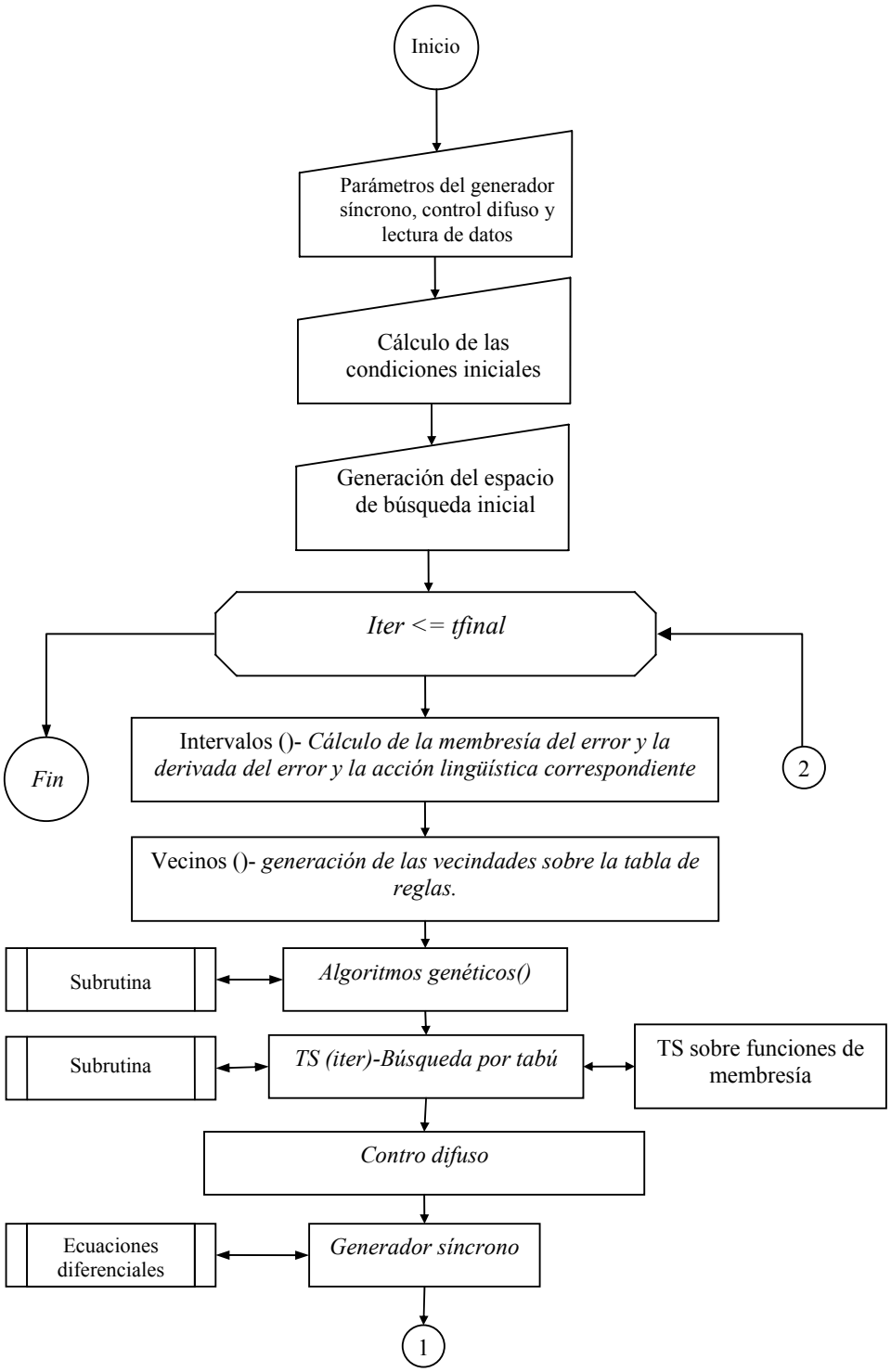
**Tamaño de la población:** 4 ó 6 o los requeridos.
**Longitud del cromosoma:** 4 ó 6, 6 es el valor máximo, ya que concatena las 3 variables descritas en el capitulo 4, tomando el cromosoma una longitud máxima disponible de 18 genes, debido al tamaño del espacio de búsqueda X, admite más valores pero podría arrojar valores inadeacuados.

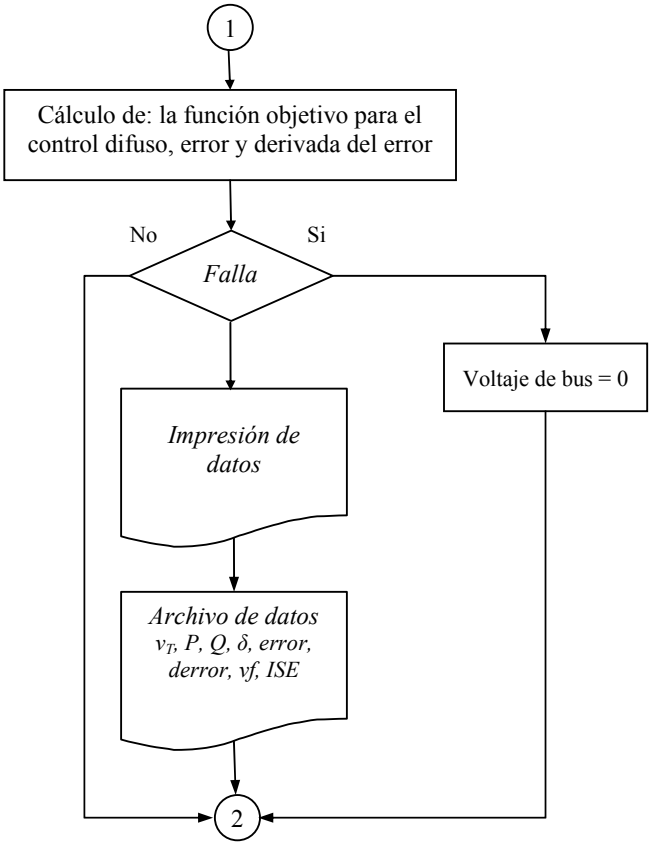
**Generación máxima:** 500 (o la requerida)

**Probabilidad de cruzamiento** = 0.987
**Probabilidad de mutación** = 0.123
**Tipo de selección [1] elitista o [2] no elitista (tipo rueda ruleta)[2]:** 2

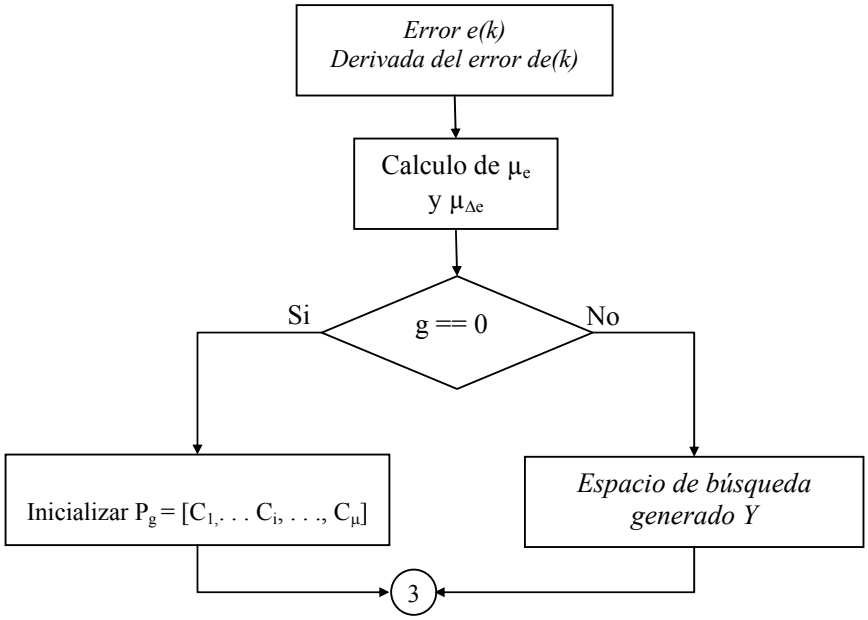
**ie( incremento en el error)** = 0.0001 o el deseado.
**Ice (incremento en el cambio del error)**= 0.00001 o el deseado.

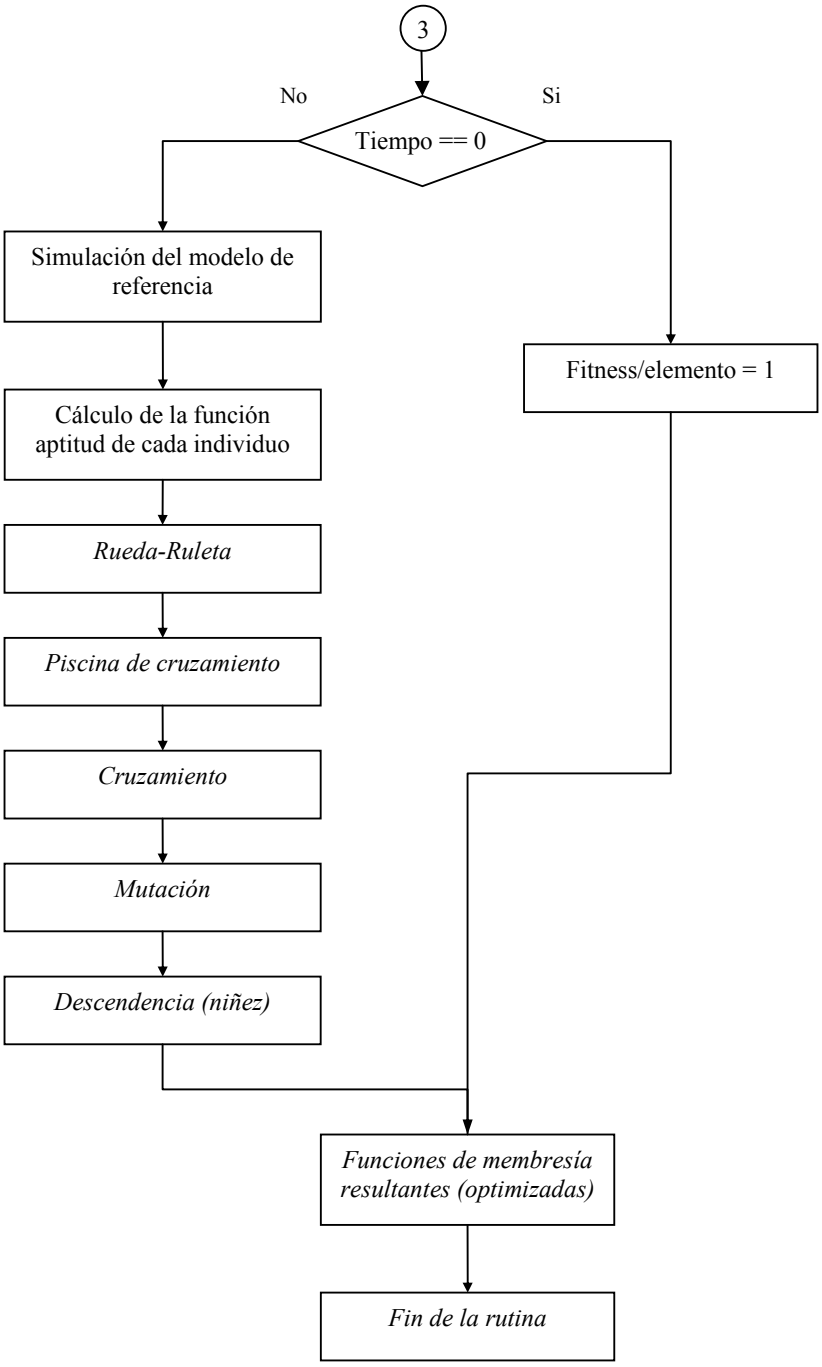
## *F.2 DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA SIMULACIÓN DEL GENERADOR SINCRONO CON LA OPTIMIZACIÓN DEL CONTROL DIFUSO EMPLEANDO LOS ALGORITMOS GENÉTISCOS Y BÚSQUEDA POR TABÚ.*





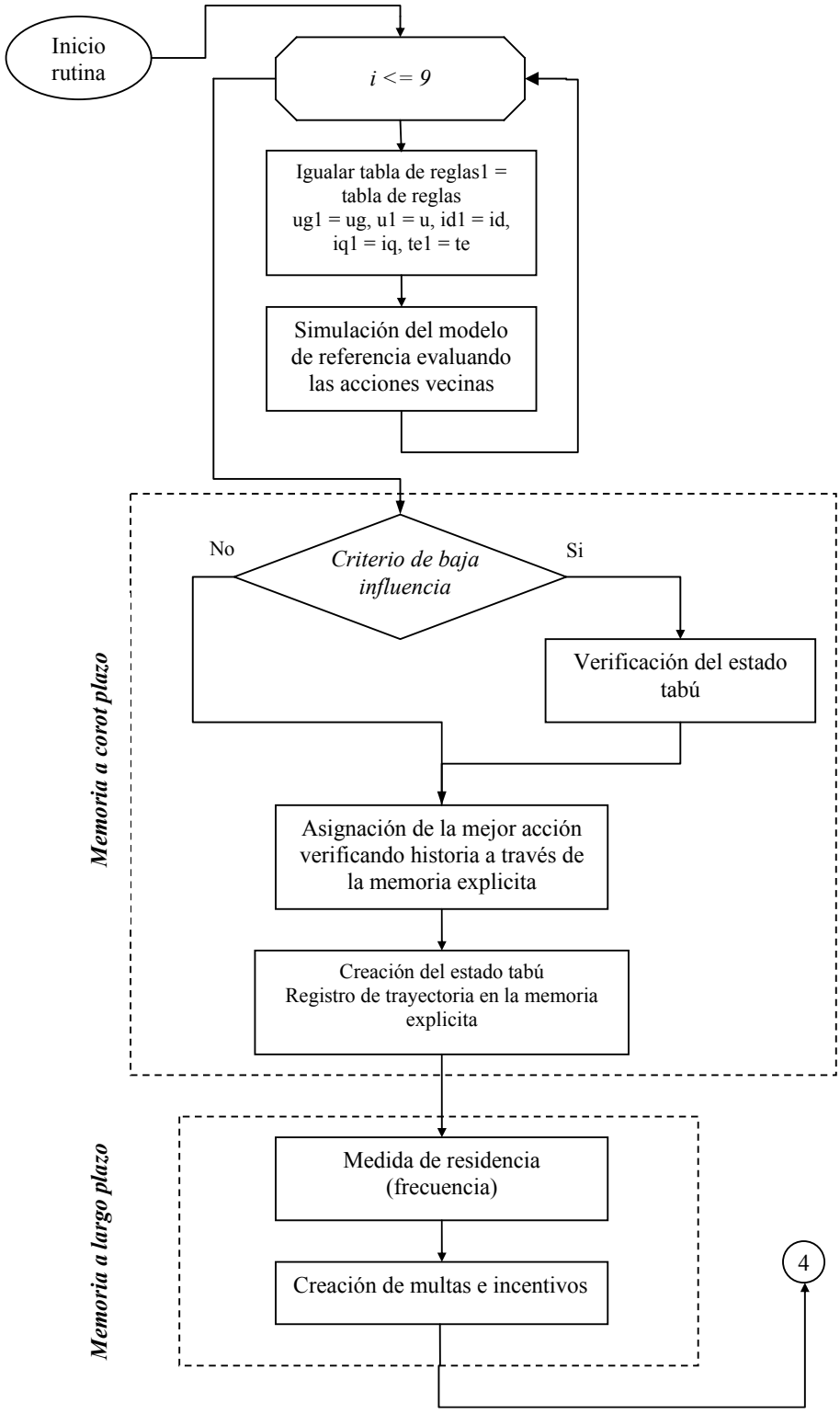

- Función: ***Algoritmos genéticos***.

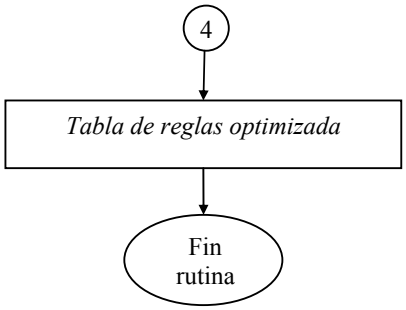




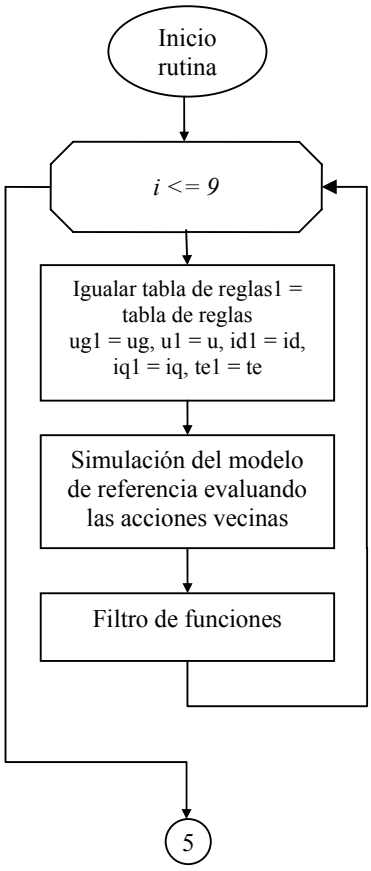

Cuando la función de algoritmos el número de simulaciones del modelo es solo el número de individuos de la población, debido a que AG solo toma los cromosomas que le interesan del espacio de búsqueda.

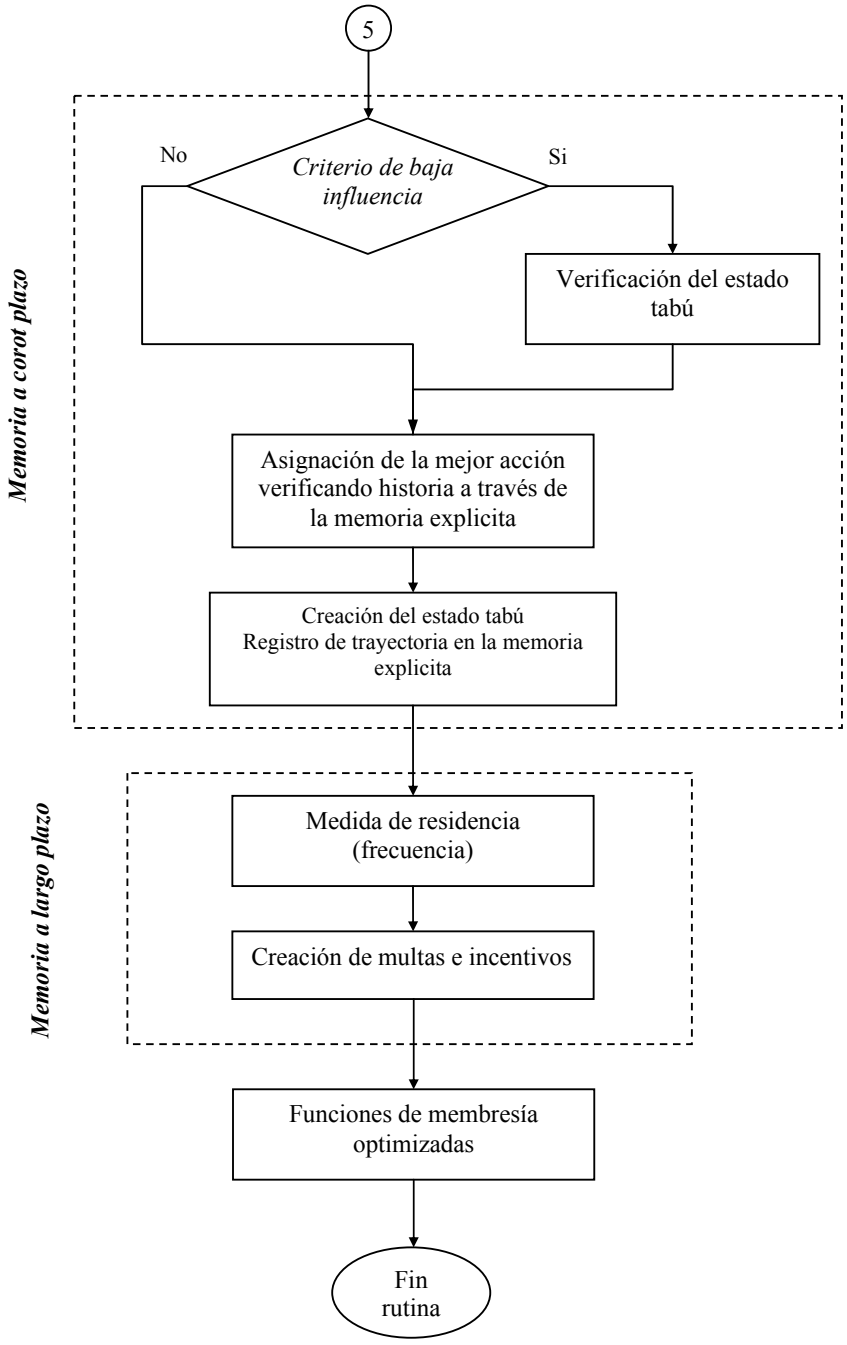
- Función: Búsqueda por tabú enfocada a la tabla de reglas (donde i = tiempo de muestreo).






Función: Búsqueda tabú enfocada a las funciones de membresía.




5
No
Criterio de baja influencia
Si
Verificación del estado tabú
Memoria a corot plazo
Asignación de la mejor acción verificando historia a través de la memoria explicita
Creación del estado tabú
Registro de trayectoria en la memoria explicita
Memoria a largo plazo
Medida de residencia (frecuencia)
Creación de multas e incentivos
Funciones de membresía optimizadas
Fin rutina

**Acontinuación se muestra el codigo de la programa AGTS.CPP**

```
#include<stdio.h>
#include<stdlib.h>
#include<conio.h>
#include<math.h>
#include<complex.h>
#include<C:\BORLANDC\BIN\bagts.h>
#include<time.h>

//**Inicio_campo_de_bits y estructuras**

struct datos
{
 unsigned int gene     :1;
 unsigned int cromosoma:8;
 unsigned int izq      :8;
 unsigned int der      :8;
 unsigned int bt       :8;
 unsigned int filter   :8;
 unsigned int mutar,nmax,nmin :8;

};
struct datos code[10];
```

**//etapa-de-declaracion-de-funciones_TS_aplicado a búsqueda por vecindad izquierda y derecha**

```
void principio_tabu(int fila,int colum,int vecino);
void memoria_largoplazo(void);
void busqueda_tabu1(void);
void reset1(float var[]);
void filtro_menor(void);
void r_finales1(void);
void limpiar1(void);
int min1(int vector[]);
int max1(int vect[]);
void ts(float iter);
void datos_TS(void);

//******inicio_funciones_sintonización*****
*
int min_gene(int size);
int max_gene(int size);
void childhood(void);
void piscina_cruzamiento(void);
void poblacion_inicial(void);
void reporte_inicial(void);
void impresion_binaria(void);
void algoritmos_geneticos(void);
void enumerar_ag(void);
void roulette_wheel(void);//Reproduccion y
seleccion estan implicitas en AG
void mutacion(void);
void cruzamiento(void);
void mating_pool(int ix,int jx,int mx);
void simulacion(void);
void r_finales(void);
void inicio_falla(float iter);
void lectura_de_datos(void);
void condiciones_iniciales(void);
void ecuaciones_diferenciales(float as[]);
float ftriangular(float x,float ar,float b,float c);
void ecuaciones_algebraicas(void);
void runge_kutta(void);
void intervalos(float xe1[],float xce1[]);
void control_mandani(void);
void reestablecer(void);
void limpiar(void);
void memoria(int i);
void multas_e_incentivos(void);
void espacio_busqueda(void);
void busqueda_tabus(float itera);
void principio_tabufunciones(float iteracion);
void filtro_funciones(void);
void reset(void);
void carga2(void);
//void memoria_cortoplazo(void);
//void memoria_largoplazo(void);
  Estas funciones no existen como tal, ya que se
    realizan con la comparación contra tiempo

//**********Define***********
#define drop 1.0
#define umbral 60

//**********block-de-datos**********
float denominador,numerador,tcplazo=0.1250;
float replica=0,tlplazo=0.24,ug1,va1,vq11,te1;
float id1,iq1,b[15],vaux[3]={0,0,0};
float
pesel[5]={0,0,0,0},radianes=3.1415927/180;
complex vqd,iqd,s,vqd1,iqd1;
float d[15],grados=180.00/3.1415927;
float vb=1.0,wo=377.0,m=5.529,kd=3.0;
float t1do=5.66,t2do=0.041,t2qo0.065;
float xd=1.904,x1d=0.312,x2=0.266,xq=1.881;
float x2q=0.260,ra=0.0,xe1=1.1,re=0.12;
float tsm=0.1,tch=0.15,trh=5.0,fhp=0.33;
float  ka=400.0,ta=0.02,kf=0.008,tf=1.0;
float tx=0.025,p=0,q=0,id,iq,e1q,e2q,e2d;
float ug,te,tm,phi,di,delta,u,vf,a[15],k1[5][15];
float tdrop,tadd,tinicial,tfinal,inifalla,vref=1;
float va,h,dfalla inc=0,fe[3]={0,0,0};
int bandera=0,xu,yu,tlinea,falla;
float fce[3]={0,0,0},dividendo,auxiliar;
flota error=0,derror=0,errork=0;
float se[10],sde[10],tiempo=0,sum=0,elim=0;

//*********Variables_membresias*********
int frequency[9][9],contador=0,tipo=0,;
int px[9][9],py[9][9],fexplicita[9][9], fisgon2=0;
int fisgon1=0
float fobjetivo=0,errorkn=0,derivada=0;
float uaux,uaux2,be[10][10],bde[10][10];
float error1=0,fo[9][9],ie=0,ide=0,fobj=0;
float fisgon=0,fisgon3, prob=0,telimf[9][9];
float bdropf[10][10],baddf[10][10] ,tsumf[9][9];
```

```
//*********Algoritmos_geneticos**********
float ags=0,ind,indi,child[10],auxb,pcruz=0;
float pmutacion=0,sfx=0,arreglo[10],slots[8];
int sumaf=0,cuenta=0,max,min,xpag[8][8];
int ex[9][9],indice[9][9],popsize=4;
int co[8],bit[8],crossovers[8], xsi=0,xsj=0;
int ,fac=100,lcrom,maxgen,seleccion,;
int. mutacion=0,ncruz=0,ngeneraciones=0;
float hug,paso,ugref=0.778,inct=10,alfa=10;
//********variables de izqder**********
int flags[5],num[5],cand[5];
int cand2[5],mexplicita[8][8];
float zeta[5],f[5][5],errores[4][4];
float bandera1=0,restart=0;
float cplazo=0.125,lplazo=0.24, flag=0;

//************Variables_tabu************
float copiaf,teliminado[8][8],tabuelim[8][8];
float tsumado[8][8], bdrop[8],badd[8];
float ant[10],alfa1=10,beta=10,detector=0,
float multadrop,incenadd,multaadd,denadd=0;
float,dendrop=0,incendrop,d2,display;
int ers=0,mfadd[8],mfdrop[8];
int ubicacion[8][8],cleaner=0,control;
//ubicaci¢n es la memoria de frecuencia
//***********funcion-inicial***********
FILE *in[10];
main()
{
float iter=0,error1=0,error2=0,isev=0;
 float isew=0,beta=10;
 clrscr();
  randomize();
  in[1]=fopen("datos.m","w+");
  in[2]=fopen("delta.m","w+");
  in[3]=fopen("p.m","w+");
  in[4]=fopen("q.m","w+");
  in[5]=fopen("t.m","w+");
  in[6]=fopen("e.m","w+");
  in[7]=fopen("derror.m","w+");
  in[8]=fopen("vf.m","w+");
  in[9]=fopen("u.m","w+");
  in[10]=fopen("f3.m","w+");
  in[11]=fopen("isev.m","w+");
  in[12]=fopen("isew.m","w+");
  enumerar_ag();
  lectura_de_datos();
 condiciones_iniciales();
  espacio_busqueda();

for(tiempo=tinicial+h,iter=tinicial+h;iter<=(tfin
al+h);iter=iter+h,inc=inc+h,tiempo=tiempo+h)
{
//carga2(); Esta función es opcional
 intervalos(xe,xce);
 vecinos(pe);
 busqueda_tabus(iter);
 algoritmos_geneticos();
 if(control==4||control==5)
 {ts(iter);}
 else{}
 control_mandani();
 uaux2=auxiliar;
 runge_kutta();
 ecuaciones_algebraicas();
error=vref-va;
error2=wo - a[1];
isew=(error2*error2) + isew;
derror=(error-errork);
errork=error;
error1=error1 + (error*error)+(errork*errork);
isev=error1;
 fobjetivo=alfa*(error) + beta*derror;
 printf("%.7f %.7f %d ",va,iter,ers);
            if(control==3)
            {
             impresion_binaria();
 printf("--%.5f %.6f --
%d\n",prob,fobj,ngeneraciones);//salto de carro
            }
            else{printf("\n");}
            fprintf(in[1],"%f %f %f %f %f %f %f
%f\n",va,a[1]*grados,p,q,error,derror,a[6],isev,it
er);
            fprintf(in[2],"%f\n",a[1]*grados);
            fprintf(in[3],"%f\n",p);
            fprintf(in[4],"%f\n",q);
            fprintf(in[5],"%f\n",iter);
            fprintf(in[6],"%f\n",error);
            fprintf(in[7],"%f\n",derror);
            fprintf(in[8],"%f\n",a[6]);
            fprintf(in[9],"%f\n",u);
            fprintf(in[10],"%f\n",a[6]);
            fprintf(in[11],"%f\n",isev);
            fprintf(in[12],"%f\n",isew);
            inicio_falla(iter);
            if(iter>tfinal)
            {getch();//pausa en cada iteracion
            }else{}
            }
 getch();
 fclose(in[1]);
 fclose(in[2]);
 fclose(in[3]);
 fclose(in[4]);
 fclose(in[5]);
 fclose(in[6]);
 fclose(in[7]);
 fclose(in[8]);
 fclose(in[9]);
 fclose(in[10]);
 fclose(in[11]);
 fclose(in[12]);
 if(control==4||control==5)
 r_finales1();
 r_finales();
 return (0);
}
```

```
//**********Datos_TS**********
void datos_TS(void)
{
  printf("\n\n\tDatos Requeridos para la
busqueda por Tab£");
  printf("\n\n\ttsumado(tadd) =");
  scanf("%f",&tadd);
  printf("\tteliminado(tdrop) =");
  scanf("%f",&tdrop);

 printf("\nTipo de Influencia Alta[1] ¢ Baja[2]:
");
  scanf("%d",&tipo);
  gotoxy(2,50);
}
//*******funcion-lectura-de-datos*********
void lectura_de_datos(void)
{ int nm=0,i,j,k,sx;

printf("          GENERADOR SINCRONO\n");
printf("A continuaci¢n introduce los datos que
se te piden:\n");
printf("\nDATOS NECESARIOS PARA LA
INTEGRACION\n");
printf("\nTiempo inicial de la simulaci¢n\n");
scanf("%f",&tinicial);
tiempo=tinicial;
printf("\nTiempo final de la simulaci¢n\n");
scanf("%f",&tfinal);
printf("\nPaso de integraci¢n\n");
scanf("%f",&h);
printf("\nDATOS DE VOLTAJE DE
ARMADURA PARA LA MAQUINA
SINCRONA\n");
printf("\nMagnitud = ");
scanf("%f",&va);
printf("\nElige el tipo de linea, larga[1] o
corta[2]\n");
scanf(" %d",&tlinea);

if(tlinea==1){xe1=1.1;re=0.12;}else{xe1=0.115
;re=0.024;}
printf("\n Angulo = ");
scanf("%f",&theta);
replica=theta;
printf("\n¨Se simula una falla en el sistema?
SI[1] o NO[2]\n");
scanf("%d",&falla);
if(falla==1)
{printf("\nTiempo de inicio de la falla\n");
scanf("%f",&inifalla);
printf("\nTiempo de duraci¢n de la falla (En
ciclos)\n");
scanf("%f",&dfalla);
  }
else{inifalla=tfinal+1;dfalla=0.0;}
printf("\n Elige el n£mero de funciones de
membres¡a 5[1] ¢ 7[2]\n");
printf("\n\tElecci¢n:");
scanf("%d",&nm);
eleccion(nm);
printf("\n\n   Que tipo de control deseas: \n\n1.
Difuso[1]\n2. T.S. a funciones [2]\n3.
Algoritmos Geneticos[3]\n[4] T.S. Vecindades
laterales\n5.T.S. y A.G.
");scanf("%d",&control);

if(control==2||control==4)
  {
   datos_TS();
printf("PRESIONA CUALQUIER TECLA
PARA CONTINUAR");
  getch();
  clrscr();
  if(control==2)
  {
printf("\n\n\t DATOS NECESARIOS PARA
BUSQUEDA SOBRE LAS FUNCIONES DE
MEMBRESIA");
printf("\n\n\t Los intervalos de las funciones son
los siguientes:");
for(sx=2,i=0;i<=n+1;i++,sx=sx+8)
  {
  gotoxy(sx,7);
   printf("%.5f",xe[i]);
   gotoxy(sx,9);
   printf("%.4f",xce[i]);
  }
  gotoxy(5,11);
printf("Indica el incremento(decremento) en
las funciones de membresia");
  gotoxy(3,13);
  printf("ie(incremento en error)=");
  scanf("%f",&ie);
  gotoxy(3,15);
  printf("ie(incremento derivada del error)=");
  scanf("%f",&ide);
  }
else{}
  }
  else{tdrop=0;tadd=0;
  if(control==3||control==5)
  //Elecci¢n Algoritmos geneticos
  {
   if(control==5)
   datos_TS();
   printf("\n Proporciona los datos que se te
piden:    ALGORITMOS GENETICOS\n");
   printf("\n Tama¤o de la poblaci¢n= ");
   scanf("%d",&popsize);
   printf("\n Longitud del Cromosoma= ");
   scanf("%d",&lcrom);
   printf("\n Generaci¢n m xima= ");
   scanf("%d",&maxgen);
   printf("\n Probabilidad de cruzamiento= ");
   scanf("%f",&pcruz);
   printf("\n Probabilidad de mutaci¢n= ");
   scanf("%f",&pmutacion);
   printf("\n Tipo de selecci¢n: Elitista[1] ¢ No
elitista(Tipo Ruleta)[2]:");
```

```
   scanf("%d",&seleccion);
   printf("\n\nIndica el incremento(decremento)
en las funciones de membresia");
   printf("\n\nie(incremento en error)=");
   scanf("%f",&ie);
   printf("\n\nie(incremento derivada del
error)=");
   scanf("%f",&ide);
   poblacion_inicial();
   algoritmos_geneticos();
  }
  else{}
  }//fin de else
  for(i=1;i<=8;i++)
     {
  for(j=1;j<=8;j++)
     {
      bdropf[i][j]=drop;
      baddf[i][j]=tadd;
      tsumf[i][j]=0;
      telimf[i][j]=0;
      px[i][j]=j;
      py[j][i]=j;
     }
     }
 errork=0;
 elim=lplazo;
 sum=cplazo;
 for(i=1;i<=n;i++)
 {
  bdrop[i]=drop;
  badd[i]=tadd;
 }
 for(i=0;i<=n;i++)
 {
  mfadd[i]=0;
 for(j=0;j<=n;j++)
 {
  errores[i][j]=0;
  tsumado[i][j]=0;
  ubicacion[i][j]=0;
  teliminado[i][j]=0;
 } } }

//**********Condiciones_iniciales********

void condiciones_iniciales(void)
{int i,j;
 complex pots,zpq,eam,eam1,ebm;/*eam y ebm
es valor magnitud */
 float ear,eai,eaic,aux,eqdx,eqdy,ia;
 theta=theta*radianes;
 ear=va*cos(theta);
 eai=va*sin(theta);
 eaic=-eai;
 eam=complex(ear,eai);
 eam1=complex(ear,eaic);//conjugado de eam
 ebm=complex(vb,0.0);
 zpq=complex(re,xe1);
 pots=(eam1*(eam-ebm))/zpq;
 p=real(pots);
 q=-imag(pots);
 aux=(p*p)+(q*q);
 aux=sqrt(aux);
 ia=aux/va;
if(ia>0.000001)
{ aux=q/p;
 phi=atan(aux);}
 else{}
 eqdx=va+((ra*ia)*cos(phi))+(xq*ia*sin(phi));
 eqdy=-(ra*ia*sin(phi)) + (xq*ia*cos(phi));
 di=atan(eqdy/eqdx);
 id=ia*sin(di+phi);
 iq=ia*cos(di+phi);
 e2q=va*cos(di) + ra*iq + x2d*id;
 e2d=va*sin(di) +ra*id -x2q*iq;
 e1q=(x1d-x2d)*id +e2q;
 delta=di+theta;//angulo de carga
 te=(id*e2d) + (e2q*iq);
 vf=(xd - x1d)*id + e1q;
 tm=te;
 ug=tm;
 vref=1.0;
 u=vf;
 a[1]=delta;
 a[2]=0;//deslizamiento (s)
 a[3]=e1q;
 a[4]=e2q;
 a[5]=e2d;
 a[6]=vf;
 a[7]=ug;//pgv
 a[8]=ug;//php
 a[9]=tm;
 a[10]=u;
 a[11]=0;
 errork=0;
 elim=tlplazo;//recuerda el espacio tabu es de
8*8
 sum=tcplazo;
 paso=1/h;
 //paso=(paso*100);
 paso=(paso*50);
 hug=ugref/paso;
}
//**Funcion_de_ecuaciones_diferenciales***

void ecuaciones_diferenciales(float as[])
{
 d[1]=wo*as[2];
 d[2]=(-kd*as[2] + as[9] - te)/m;
 d[3]=(as[6]-((xd-x1d)*id)- as[3])/t1do;
 d[4]=(as[3] - ((x1d - x2d)*id) - as[4])/t2do;
 d[5]=((xq - x2q)*iq - as[5])/t2qo;
 d[6]=(u-as[6])/tx;
 d[7]=(-as[7]+ug)/tsm;
 d[8]=(as[7] - as[8])/tch;
 d[9]=(fhp*d[8] + as[8] - as[9])/trh;
 d[10]=(ka*(vref - va - as[11]))/ta;
 d[11]=(kf*d[10]-as[11])/tf;
}
```

```
//**Funcion_de_ecuaciones_algebraicas*****
void ecuaciones_algebraicas(void)
{
 float auxi[30],vd1,vq1;
 //complex vqd,iqd; valores globales
auxi[1]=re+ra;
auxi[2]=a[5]-vb*sin(a[1]);
auxi[3]=a[4]-vb*cos(a[1]);
auxi[4]=xe1+x2q;
auxi[5]=xe1+x2d;
id= (auxi[1]*auxi[2] +auxi[4]*auxi[3])/(auxi[1]*auxi[1] +
auxi[4]*auxi[5]);
iq= (auxi[1]*auxi[3] -auxi[5]*auxi[2])/(auxi[1]*auxi[1] +
auxi[4]*auxi[5]);
te=(a[5]*id + a[4]*iq);
vd1=a[5]- ra*id + x2q*iq;
vq1=a[4]- ra*iq - x2d*id;
auxi[6]=vd1*vd1 + vq1*vq1;
va=sqrt(auxi[6]);
vqd=complex(vq1,vd1);
iqd=complex(iq,-id);
s=vqd*iqd;
p=real(s);
q=-imag(s);
//cout<<(vq1); impresión compleja, checar valor
}
//**********Funcion_Runge_Kutta********
void runge_kutta(void)
{int no;
 float ax[15];
 ecuaciones_diferenciales(a);
 for(no=1;no<=9;no++)
 {k1[1][no]=d[no];}
 for(no=1;no<=9;no++)
 {ax[no]=a[no]+(h/2)*k1[1][no];}
 ecuaciones_diferenciales(ax);
 for(no=1;no<=9;no++)
 {k1[2][no]=d[no];}
 for(no=1;no<=9;no++)
 {ax[no]=a[no]+(h/2)*k1[2][no];}
 ecuaciones_diferenciales(ax);
 for(no=1;no<=9;no++)
 {k1[3][no]=d[no];}
 for(no=1;no<=9;no++)
 {ax[no]=a[no]+(h)*k1[3][no];}
 ecuaciones_diferenciales(ax);
 for(no=1;no<=9;no++)
 {k1[4][no]=d[no];}
 for(no=1;no<=9;no++)
 {
  a[no]=a[no]+(h/6)*(k1[1][no] +
(2*(k1[2][no]+k1[3][no])) +k1[4][no]);
 }
// printf(" %f   %.15f   %f",a[4],a[5],va);
 if(a[6]>4)
 {a[6]=4;}           else{}
 if(a[6]<0)          {a[6]=0;}           else{}
}
//**************Funcion_falla************
void inicio_falla(float iter)
{
 if(iter>inifalla&&iter<inifalla+(dfalla/60))
            {vb=0;}
            else{vb=1.0;}
}
//********Funcion_Control_mandani******
float ftriangular(float x,float ar,float b,float c)
{float m,n,min;
 m=(x-ar)/(b-ar);
 n=(c-x)/(c-b);
 if(m<n)
 {min=m;}else{min=n;}
 if(min>=0)
 {return(min);}
 else{
 return(0);}
}// fin de funci¢n ftriangular
//**************control_mandani**********
void intervalos(float xe1[],float xce1[])
{
 int valorde,valoriz,xd,xc,xi,j;

  if(derror>xce1[n])
 {
   fce[1]=0;  fce[2]=1;
    pce[1]=n;  pce[2]=n;
 }
 else{
 if(derror<xce1[1])
 {  fce[1]=1;  fce[2]=0;
    pce[1]=1;  pce[2]=1;
 }
 else{
for(valorde=n,valoriz=n-
1,j=n,xd=n+1,xc=n,xi=n-1;j>0;valoriz--
,valorde--,j--,xc--,xi--,xd--)
{
   if(derror<=xce1[j]&&derror>xce1[j-1])
 {
   fce[1]=ftriangular(derror,xce1[xi-1],xce1[xc-
1],xce1[xd-1]);

fce[2]=ftriangular(derror,xce1[xi],xce1[xc],xce1
[xd]);
   pce[1]=valoriz;   pce[2]=valorde;
 }
 else{}
}}}
  if(error>xe1[n])
    {        fe[1]=0;     fe[2]=1;
             pe[1]=n;     pe[2]=n;
 }
 else{
   if(error<xe1[1])
    {fe[1]=1;  fe[2]=0;
     pe[1]=1;  pe[2]=1;
 }
 else{
```

```
for(valorde=n,valoriz=n-
1,j=n,xd=n+1,xc=n,xi=n-1;j>0;valoriz--
,valorde--,j--,xc--,xi--,xd--)
{
  if(error<=xe1[j]&&error>xe1[j-1])
 {
 fe[1]=ftriangular(error,xe1[xi-1],xe1[xc-
1],xe1[xd-1]);//funcion izquierda
fe[2]=ftriangular(error,xe1[xi],xe1[xc],xe1[xd]);
//funcion derecha
  pe[1]=valoriz;
  pe[2]=valorde;
 }
 else{}}}}}

//**************implicacion**************
void control_mandani(void)
{ float x=0,y=0,z=0,ka[5]={0,1,2,1,2},ke[5]={0,1,1,2,2},r;

  for(x=1,z=1;x<=2&&z<=4;x++)
  {
  for(y=1;y<=2;y++,z++)
  {
   if(fe[x]>=fce[y])
   {pesel[z]=fce[y];}
   else{
    pesel[z]=fe[x];
   } } }

for(z=3,x=1;x<=3;x++,z--)
{
  for(r=x+1,y=1;y<=z;y++,r++)
  {
 if(tabla[pce[ka[x]]][pe[ke[x]]]==tabla[pce[ka[r]
                    ]][pe[ke[r]]])
  {
   if(pesel[x]>=pesel[r])
   {pesel[r]=0;}
   else{pesel[x]=0;}
  }
  else{    }
  } }
//*************centro_de_gravedad*********

vaux[1]=(pesel[1]*tabla[pce[1]][pe[1]]) +
(pesel[2]*tabla[pce[2]][pe[1]]);
vaux[2]=(pesel[3]*tabla[pce[1]][pe[2]]) +
(pesel[4]*tabla[pce[2]][pe[2]]);
dividendo=(pesel[1]+pesel[2]+pesel[3]+pesel[4]
);
  vaux[3]=(vaux[1] + vaux[2])/dividendo;
  auxiliar=vaux[3];
  u=u+auxiliar;
//**************limitador_de_u************

 if(replica<umbral)
  {
  if(u<0)
     {u=0;}
     else{}
     if(u>6)
     {u=6;}else{}
  }
  else{}
}
//*************Funci¢n_Reset************
void reset(void)
{
  int i,j,l;
    ug=ug1;    u=u1;    id=id1;
    iq=iq1;    te=te1;
    for(i=1;i<=9;i++)
    {a[i]=b[i];}
}
//**************resultados_finales*********
void r_finales(void)
{int i,j,sx,sy,d;

 if(control==2||control==3||control==4||control==5)
 {
 clrscr();
 gotoxy(3,3);
 printf("Funciones de membresia:");
 for(sx=5,sy=5,i=0;i<=n+1;i++,sx=sx+7)
 {
  gotoxy(sx,sy);
  printf("%.4f",xe[i]);
  gotoxy(sx,sy+2);
  printf("%.4f",xce[i]);
 }
  for(sy=9,i=1;i<=8;i++,sy++)
  {sx=3;
  for(j=0;j<=7;j++,sx=sx+9)
  {
  gotoxy(sx,sy);
  printf("%.5f",be[i][j]);
  gotoxy(sx,sy+10);
  printf("%.5f",bde[i][j]);
  }
 }
gotoxy(1,50);
 printf("\nPRESIONA UNA TECLA PARA
CONTINUAR CON LOS SIGUIENTES
RESULTADOS. . .");
 getch();
 clrscr();
  printf("\n\n\t  Tabla: Funciones de membresia
o Fitness function");
  d=6;
  for(sx=3,sy=d,j=1;j<=8;j++,sx=sx+11)
  {sy=d;
   for(i=1;i<=8;i++,sy++)
   {
   gotoxy(sx,sy);
   printf("%.8f",fo[i][j]);
   }
   if(j==6){d=d+10;sx=-8;}else{}
}gotoxy(3,25);
```

```
 printf("\n  Funcion objetivo actual= %.8f;
fobjetivo-
simu=%.8f,x=%.8f",fobjetivo,fobj,fisgon);
 gotoxy(3,27);
 printf("fisgonx=%d y fisgony =%d,
bandera=%.2f--%f x1=%d y1=%d  xe[0]=%f \n
contador=%d  denf =%f minimo = %f  xsi=%d
xsj=%d",fisgon1,fisgon2,bandera,fisgon3,xu,yu,
xe[0],contador,denominador,numerador,xsi,xsj);
 for(sy=31,i=1;i<=8;i++,sy++)
 {
  for(d=56,sx=3,j=1;j<=8;j++,sx=sx+2,d=d+3)
  {
   gotoxy(sx,sy);
   printf("%d",px[i][j]);
   gotoxy(5,29);
   printf("Memoria px,     memoria py     -
Memoria explicita- -Memoria de frecuencia-");
   gotoxy(sx+18,sy);
   printf("%d",py[i][j]);
   gotoxy(sx+35,sy);
   printf("%d",fexplicita[i][j]);
   gotoxy(d,sy);
   printf("%d",frequency[i][j]);
  }
 }
 gotoxy(1,50);
 printf("\nPRESIONA UNA TECLA PARA
CONTINUAR CON LOS SIGUIENTES
RESULTADOS. . .");
 getch();
 clrscr();
 gotoxy(3,3);
 printf("DATOS RELACIONADOS CON LA
CALIDAD DEL MOVIMIENTO (BAJA
INFLUENCIA)");
 gotoxy(3,5);
 printf("Memoria elemento sumado");
 for(sy=6,i=1;i<=8;i++,sy=sy+2)
 {
  for(sx=3,j=1;j<=8;j++,sx=sx+7)
  {
   gotoxy(sx,sy);
   printf("%.3f",bdropf[i][j]);
  }
 }
 printf("\n\nMemoria elemento eliminado");
 for(sy=sy+3,i=1;i<=8;i++,sy=sy+2)
 {
  for(sx=3,j=1;j<=8;j++,sx=sx+7)
  {
   gotoxy(sx,sy);
   printf("%.3f",baddf[i][j]);
  } }
 getch();}else{}
}//fin de funcion de impresion de resultados
//************Funcion_limpiar**********
void limpiar(void)
{
 int i,j,l;
 //flag++;
 for(i=1;i<=n;i++)
 {
  for(j=1;j<=n;j++)
  {
   //mexplicita[i][j]=0;
  }
 }
 for(i=1;i<=9;i++)
 {
  for(j=1;j<=9;j++)
  {
   fexplicita[i][j]=0;
   if(tiempo<=h)
   {frequency[i][j]=0;}
   else{}
  } }  }
//***************Principio_tabu***********

 //Busqueda_por_tabu_con_funciones_de_membresia
void busqueda_tabus(float itera)
{
  simulacion();//Simulacion del sistema con cada
una de las vecindades
  if(control==2||control==5)
  {
  filtro_funciones();
  if(itera<=(tlplazo+sum))
            {
                                    if(itera<=tcplazo)
                                      {bandera=0;
principio_tabufunciones(itera);
                                      }
                                    else
                                      {bandera=1;
              principio_tabufunciones(itera);

//memoria_largoplazo();
}           }
      else
            {
            limpiar();
            tlplazo=itera+elim;
            tcplazo=itera+sum;
            }}  else{}}//fin de funcion

//***********Funcion_menor***********
void filtro_funciones(void)
{int i,j,k,l;
 float bit,ubx,uby;

 for(i=1;i<=8;i++)
   {
 for(j=1;j<=8;j++)
   {
    px[i][j]=j;
    py[j][i]=j;
   }
   }
 for(k=1;k<=8;k++)
```

```
  {
 for(i=1;i<=7;i++)
  {
 for(j=i+1;j<9;j++)
  {
  if(fabs(fo[k][i])<=fabs(fo[k][j]))
  {}
  else{
  ubx=px[k][j];
  px[k][j]=px[k][i];
  px[k][i]=ubx;
  bit=fo[k][j];
  fo[k][j]=fo[k][i];
  fo[k][i]=bit;
 }   }   }   }

 for(k=1;k<=8;k++)
  {
 for(i=1;i<=7;i++)
  {
 for(j=i+1;j<9;j++)
  {
  if(fabs(fo[i][k])<=fabs(fo[j][k]))
  {}
  else{
  uby=py[j][k];
  py[j][k]=py[i][k];
  py[i][k]=uby;
  bit=fo[j][k];
  fo[j][k]=fo[i][k];
  fo[i][k]=bit;
  }   }   }   }
}// fin de funci¢n menor
//+++++++Funcion_espacio_busqueda+++++

void espacio_busqueda(void)
{int i,j,k,l,m;//sdm=star derivate mistake
 float sm=-0.5,sdm=-0.009,e1,e2,e3,e4,re,rde;

  for(re=0,rde=0,j=1;j<=8;j++,sm=sm-
(ie*3),sdm=sdm-
(ide*3),re=re+ie,rde=rde+ide)//recorre
horizontalmente
    {
  if(n==5)
    {
for(e3=sm,e4=sdm,e1=fabs(sm/3),e2=fabs(sdm/
3),k=0;k<=(n+1);k++,sm=sm+e1,sdm=sdm+e2)
      {
            be[j][k]=sm;
            bde[j][k]=sdm;
      }
            sm=e3;sdm=e4;//indice de funciones
      }
  else
     {
      for(k=0;k<=(n+1);k++)
      {
       if(pe1[k]>=0)
       {
            re=fabs(re);rde=fabs(rde);
       }
       else
       {
            re=-fabs(re);rde=-fabs(rde);
       }
       be[j][k]=pe1[k]+re;
       bde[j][k]=pde1[k]+rde;
      }
     }//fin de segundo for
       be[j][centro]=0;
       bde[j][centro]=0;
       }// fin de primer for
}
//Funcion:Principio_tabu_para_funciones_de
                    membresia
void principio_tabufunciones(float iteracion)
{int bit;
 int i,j,k,l,m,o;

 multas_e_incentivos();//Funci¢n Identificaci¢n
para multas e incentivos
 if(tipo==2)//baja influencia
 {
  for(i=1;i<=8;i++)
  {
   for(j=1;j<=8;j++)
   {
    if(telimf[i][j]>tiempo||tsumf[i][j]>tiempo)
    {
     fisgon1=px[i][j];
     fisgon2=py[i][j];
     fexplicita[fisgon2][fisgon1]=1;
    }
    else{}
} } }
 else{}
 for(j=1;j<=8;j++)
  {
 for(i=1;i<=8;i++)
  {

if(fabs(fo[i][j])<fabs(fobj)&&tdrop!=0&&tadd!
=0)//pregunta si no ha sido visitado
anteriormente
  {
    fisgon=fo[i][j];
    fisgon1=px[i][j];
    fisgon2=py[i][j];
    fisgon3=bde[fisgon2][0];
    if(fexplicita[fisgon2][fisgon1]!=1)
    {
    fexplicita[fisgon2][fisgon1]=1;
    frequency[fisgon2][fisgon1]++;
    if(bandera==0)      //donde se realiza el
cambio
    {
     telimf[yu][xu]=tiempo + bdropf[yu][xu];
     tsumf[fisgon2][fisgon1]=tiempo +
baddf[fisgon2][fisgon1];
```

```
    contador++;
    xu=fisgon1;
    yu=fisgon2;        //indica cuantos cambios se
han hecho hasta t(k)
   for(k=0;k<=n+1;k++)
    {

xe[k]=be[fisgon1][k];

xce[k]=bde[fisgon2][k];

    }
    }// be y bde contienen el espacio de
busqueda respectivamente del error y derror
   else{}
   i=10;
   j=10;
   }
   else{}
   }//fin de if comparacion
   else{}//FIN DE ELSE COMPARACION
FOBJETIVO
   }//Fin de segundo for
   }//Fin de primer for
}
//***************funcion_maximo_minimo_pa
ra_multas e incentivos*****************
void multas_e_incentivos(void)
{int i,j,k,xa,xe;
 float fs,ft[10][10],xe1;
 //float xa,xe,xi;
 for(fs=0,xa=0,i=1;i<=8;i++)
 {
 for(j=1;j<=8;j++)
 {
  xa+=frequency[i][j];
  ft[i][j]=float(frequency[i][j]);
  fs+=ft[i][j];
 }
 }
 denominador=float(xa);
 //denominador=1/denominador;
 for(xa=frequency[1][1],i=1;i<=8;i++)
 {
 for(j=1;j<=8;j++)
 {
  if(xa>frequency[i][j])
  {
  }  else
  {xa=frequency[i][j];
   xsi=i;xsj=j;
  }
 }
 }
numerador=float(xa);
//numerador=numerador*denominador;
if(numerador!=0)
 {baddf[xsi][xsj]=baddf[xsi][xsj] +
float(numerador/(denominador*100));// +
numerador;// + (numerador*denominador);// +
(numerador/(denominador*100));
 }
 else{}
 for(xe1=ft[1][1],i=1;i<=8;i++)
 {
 for(j=1;j<=8;j++)
 {
  if(xe1<ft[i][j])
  {
  }
  else
  {
   if(ft[i][j]!=0)
   {xe1=ft[i][j];
    xsi=i;xsj=j;
   }
   else{}
  } } }
 if(xe1!=0&&bdropf[xsi][xsj]>0)
 {
 bdropf[xsi][xsj]-=xe1/100*fs;
 }
 else{}
}
//***************Simulacion**************
void simulacion(void)
{
 float beta=10;
 int i,j,k,l,m;//sdm=star derivate mistake

  for(i=1;i<=9;i++)
    {     b[i]=a[i];    }
     ug1=ug;
     u1=u;
     id1=id;
     iq1=iq;
     te1=te;
       intervalos(xe,xce);
       control_mandani();
       uaux=auxiliar;
       runge_kutta();
       ecuaciones_algebraicas();
       errorkn=vref-va;
       derivada=(errorkn - errork);
       //error1=errorkn;
       fobj=alfa*(errorkn) + beta*derivada;
       reset();
 for(i=1;i<=8;i++)//recorre verticalmente
    {
  for(j=1;j<=8;j++)//recorre horizontalmente
  {
      for(k=0;k<=(n+1);k++)
       {
            se[k]=be[j][k];
            sde[k]=bde[i][k];
       }
       intervalos(se,sde);
       control_mandani();
       uaux=auxiliar;
```

```
      runge_kutta();
      ecuaciones_algebraicas();
      errorkn=vref-va;
      derivada=(errorkn - errork);
      error1=errorkn;
      fo[i][j]=alfa*(errorkn) + beta*derivada;
      reset();
      }
   }//fin de primer for
}
//****Comienzo_Algoritmos_geneticos*****
void poblacion_inicial(void)
{int i,j,k,m,l;

 for(i=0;i<=10;i++)
 {
  code[i].cromosoma=0;
 }
 for(l,k=0,i=0;i<=lcrom-1;i++)
 {
  l=pow(2,i);//Filtro de individuos
  k=k+l;
 }
    for(i=1;i<=popsize;i++)
            {
    for(j=1;j<=lcrom;j++)
            {
             code[1].gene=rand()%2;
code[i].cromosoma=code[i].cromosoma<<1;//se
llena de 1's para permitir establecer la cadena
binaria
code[i].cromosoma=code[i].cromosoma|code[1]
.gene;

code[i].cromosoma=code[i].cromosoma&k;
             }
            }
printf("\n\tLos Individuos iniciales
son:%d\n",k);
            printf("No.cadena  (poblacion inicial)
Valor entero\n\n\n");
            for(j=1;j<=popsize;j++)
            {
            for(k=lcrom-1;k>=0;k--)
            {
             if(k==lcrom-1)    {

printf("  %d.         ",j);
             }else{}
             l=code[j].cromosoma>>k;
             l=l&1;
             printf("%d",l);
             if(k==0)
             {
             printf("
\t\t%d\n",code[j].cromosoma);
             }else{}
            }}

}//fin de funcion poblacion_inicial();
```

```
//************impresion_binaria**********

void impresion_binaria(void)
{int i,j,k,l;
 for(j=1;j<=popsize;j++)
            {
            for(k=lcrom-1;k>=0;k--)
            {
             i=code[j].cromosoma>>k;
             i=i&1;
             printf("%d",i);
             if(k==0)
             {
              printf("");
             }else{}
             }}
}
//**********Algoritmos_geneticos*********

void algoritmos_geneticos(void)
{
  float ic=0;
  int i=0;

if(tiempo>1&&ngeneraciones<=maxgen&&con
trol==3||control==5)
  {
     ic=rand()%1001;
     ic=(ic)/1000;
     prob=ic;
     if(tiempo==0)
     {
      for(i=1;i<=popsize;i++)//Se inicia el fitness
de todas las poblaciones para que empiecena
competir con las mismas ventajas
      {
            arreglo[i]=1;
      }
     }
     else{simulacion();}
     roulette_wheel();//reproduccion
     piscina_cruzamiento();
     cruzamiento();
     mutacion();
     childhood();
     }
  else{}
  }

//************Enumerar_tabla***********
void enumerar_ag(void)
{int i,j,k=0;
 for(i=1;i<=8;i++)
 {
  for(j=1;j<=8;j++,k++)
  {
   indice[i][j]=k;
  } } }
```

```
//********Funcion_Roulette_Wheel*********

void roulette_wheel(void)
{int i,j,k,l,band=0,m1;
 float auxa;

 for(i=1;i<=8;i++)
 {
  bit[i]=0;
  slots[i]=0;
  crossovers[i]=0;
 }
 for(k=1;k<=popsize;k++)
 {
 for(i=1;i<=8;i++)
 {
 for(j=1;j<=8;j++)
  {
 if(code[k].cromosoma==indice[i][j]&&tiempo!=0)
//identificador de individuo en poblacion
    {
    ex[k][1]=i;
    ex[k][2]=j;
    arreglo[k]=fabs(fo[ex[k][1]][ex[k][2]]);
    arreglo[k]=1-fabs(arreglo[k]);//es 1 por vref
    i=9;j=9;
    }
   else
   {
   }   }  }    }     //fin de for incluido k

if(tiempo==0)
   {
 printf("Funcion objetivo/individuo : 1:%f  2:%f  3:%f
   4:%f",arreglo[1],arreglo[2],arreglo[3],arreglo[4]);
   }
else{}
for(sfx=0,i=1;i<=popsize;i++)//Calculo de
sfx(promedio)
    {
sfx=sfx+arreglo[i];
    }
for(i=1;i<=popsize;i++)
    {
arreglo[i]=(arreglo[i]/sfx)*100;
    }
for(auxa=0,i=1;i<=popsize;i++)
    {
slots[i]=auxa;
slots[i]=slots[i]+arreglo[i];
auxa=slots[i];//Formacion de las ranuras de la ruleta
    }
slots[0]=0;
for(i=1;i<=popsize;i++)//comienzo ruleta
   {
auxa=rand()%100;
if(auxa==0)
{
 auxa=auxa+1;}else{}
 for(j=1;j<=popsize;j++)
 {
if(auxa<=slots[j]&&auxa>slots[j-1])
{
crossovers[j]++;//indica numero de
cruzamientos
              j=popsize+1;
             }
            else{}
             }
             }
 if(tiempo==0)
 {
printf("\nSlots de la ruleta:(probabilidad: %f)- %f %f
                %f %f %f\n\n
   ",prob,slots[0],slots[1],slots[2],slots[3],slots[4]);

 printf("\n(cantidad de cruzas)genes de cruze:%d  %d
                %d
%d",crossovers[1],crossovers[2],crossovers[3],crosso
                vers[4]);
 getch();
 }
 else{}
}//fin de roulette wheel, esta funcion es utilizada
en ambas selecciones, por si sola sabe
diferenciar una de la otra

//**********Cruzamiento**********
void cruzamiento(void)
{
 int i,j,k,l,am;
 if(prob>pmutacion&&prob<=pcruz)
 {
  for(k=1,i=1;i<=popsize/2;i++)
  {
    code[popsize+1].bt=rand()%lcrom;
if(code[popsize+1].bt==0)
  {
  code[popsize+1].bt++;}else{}
  for(j=1;j<=2;j++,k++)
  {
   code[k].bt=code[popsize+1].bt;
   code[k].izq=code[xpag[i][j]].cromosoma;
   code[k].der=code[xpag[i][j]].cromosoma;
   }
   }
 for(i=1;i<=popsize;i++)
   {
    code[i].izq>>=code[i].bt;
    code[i].izq<<=code[i].bt;
  for(code[i].filter=0,k=0;k<=code[i].bt-1;k++)
   {
     am=pow(2,k);
     code[i].filter|=am;
    }
     code[i].der&=code[i].filter;
     }
  for(i=1;i<=popsize;i=i+2)
     {
code[i].cromosoma=code[i].izq|code[i+1].der;
code[i+1].cromosoma=code[i+1].izq|code[i].der;
ncruz++;
```

```
ngeneraciones++;
    }
if(tiempo==0)
  {
printf("\n\nElementos de enlace(bit de   cruzamiento):
                        %d  %d  %d
   %d",code[1].bt,code[2].bt,code[3].bt,code[4].bt);
 printf("\n\n Elementos finales de  cruzamiento :  %d
                          %d  %d
%d\n",code[1].cromosoma,code[2].cromosoma,code[
          3].cromosoma,code[4].cromosoma);
  getch();
  }else{}
  }else{}}
//*****************Mutacion**********
void mutacion(void)
{
  int i,j,k,l,am;

if(prob<=pmutacion&&prob>0)
  {

  for(k=1,i=1;i<=popsize/2;i++)
  {
   code[popsize+1].bt=rand()%lcrom+1;

if(code[popsize+1].bt==0){code[popsize+1].bt+
+;}else{}

   for(j=1;j<=2;j++,k++)
   {
    code[k].bt=code[popsize+1].bt;
    code[k].mutar=code[xpag[i][j]].cromosoma;
   }
  }
   for(i=1;i<=popsize;i++)
   {
    am=pow(2,code[i].bt-1);
    code[i].mutar^=am;
    //if(error!=0)
    //{
    nmutacion++;
    ngeneraciones++;
    code[i].cromosoma=code[i].mutar;
    //}else{}
   }
  if(tiempo==0)
  {
   printf("\n\nElementos de enlace(mutaci¢n): [1]%d
          [2]%d  %d  %d  %d  %d  %d  %d  %d
%d",code[2].filter,code[3].filter,code[1].mutar,code[2
].mutar,code[3].mutar,code[4].mutar,code[1].bt,code[
                2].bt,code[3].bt,code[4].bt);
  printf("\n\nHijos de la primera generacion: %d  %d
                          %d
%d\n",code[1].cromosoma,code[2].cromosoma,code[
          3].cromosoma,code[4].cromosoma);
 getch();
 }else{}
 }
 else{}
}
```

```
//***********Piscina_cruzamiento*********
void piscina_cruzamiento(void)
{
int l,maximo,sy[10];
int orden[10],i,j,k,am,elemento;

 for(i=1;i<=10;i++)
 {
  orden[i]=0;
 }
 for(l=1,maximo=0,i=1;i<=popsize;i++)
 {
  if(crossovers[i]!=0)
  {
   sy[l]=crossovers[i];
   orden[l]=i;
   maximo++;
   l++;
  }
  else{}
 }
 for(i=1;i<=maximo;i++)
 {crossovers[i]=sy[i];}
 for(i=1;i<=maximo-1;i++)
   {
 for(j=i+1;j<maximo+1;j++)
   {
   if(crossovers[i]>=crossovers[j])
   {}
   else{
   am=orden[j];
   orden[j]=orden[i];
   orden[i]=am;
   am=crossovers[j];
   crossovers[j]=crossovers[i];
   crossovers[i]=am;
  }   }   }

   if(tiempo==0)
{  for(i=1;i<=maximo;i++)
   {
    printf("\n%d  %d",crossovers[i],orden[i]);
   }
   printf("\n\nElemento maximo para formar
parejas/2: %d",maximo);
}  else{}

   for(elemento=0,i=1;i<=maximo;i++)
   {
   for(;crossovers[i]!=0;)
   {
   for(j=1;j<=maximo;j++)
   {
  if(i!=j&&crossovers[j]!=0&&crossovers[i]!=0)
    {
     elemento++;
     crossovers[i]--;
     crossovers[j]--;
     mating_pool(orden[i],orden[j],elemento);
    }
```

```
   else{}   }

   if(crossovers[i]>1&&j>maximo)
   {
    elemento++;
    crossovers[i]-=2;
    mating_pool(orden[i],orden[i],elemento);
   }
   else{}
  }
  }
 if(tiempo==0)
  {for(i=1;i<=popsize/2;i++)
   {
   for(j=1;j<=2;j++)
   {
   printf("-%d-",xpag[i][j]);
   }   }
   getch();
   }
   else{}
   for(i=1;i<=10;i++)
   {
    crossovers[i]=0;
   }
}
//**********Mating_pool**********
void mating_pool(int ix,int jx,int mx)
{
 xpag[mx][1]=ix;
 xpag[mx][2]=jx;
}
//**********Childhood**********
*
void childhood(void)
{int i,j,k,am,l;

 for(k=1;k<=popsize;k++)
 {
 for(i=1;i<=8;i++)
 {
 for(j=1;j<=8;j++)
  {
if(code[k].cromosoma==indice[i][j]&&tiempo!
=0)//identificador de individuo en poblacion
    {
    ex[k][1]=i;
    ex[k][2]=j;
    child[k]=fabs(fo[ex[k][1]][ex[k][2]]);
    child[k]=1-fabs(child[k]);//es 1 por vref
    i=9;j=9;
    }
   else
   {   }   }  }    }     //fin de for incluido k
   max=max_gene(popsize);
   min=min_gene(popsize);
   ags=fabs(fobj);
   ags=1-ags;
   if(ags<child[max])
   {
    for(k=0;k<=n+1;k++)
    {
    xe[k]=be[ex[max][2]][k];
    xce[k]=bde[ex[max][1]][k];
    cuenta++;
    }
   }
  else{}
}//fin de funcion
//**********Funciones_min_max**********

int min_gene(int size)
{int i,j,am;
for(i=1;i<=size;i++)
  {
for(j=1;j<=size;j++)
   {
if(i!=j)
   {
if(child[i]<=child[j])
  { }
else
   {
break;
    }
   }//fin de if
   else{}
  }
if(j>size)
    {
ind=child[i];
am=i;
i=size+1;
    }
else
    {    }
  }//fin de primer for
 return(am);
}
//**********max_gene**********
int max_gene(int size)
{
 int i,j,am;
 indi=0;//indimaximo e ind --minimo
for(i=1;i<=size;i++)
 {
for(j=1;j<=size;j++)
 {
if(i!=j)
 {
if(child[i]>=child[j])
 { }
else
 {
break;
 }
 }//fin de if
else{}
 }
if(j>size)
```

```
 {
indi=child[i];
am=i;
i=size+1; }
else
 { }
 }//fin de primer for
return(am);
}
//**********Función_carga**********
void carga2(void)
{
 if(tiempo>0&&tiempo<=10)
 {ug=ug+2*hug;}
 else
 {
 if(tiempo>10&&tiempo<=30)
 { }
 else
 {
 if(tiempo>30&&tiempo<=45)
 {ug=ug+hug;}
 else
 {
 if(tiempo>45&&tiempo<=70)
 {}
 else
 {
  if(tiempo>70&&tiempo<=85)
  {
   ug=ug+hug;
  }
  else{}
 } } } } }
 for(ia=1,m=1,o=1,i=1;i<=2;i++,o=o+2)
    {
     for(j=1;j<=2;j++,ia++)
     {
      for(l=1;l<=2;l++,o++,m++)
      {
            tabla[pce[j]][pe[i]]=tabla[pce[j]][v[o]];
            control_mandani();
            //ant[m]=auxiliar;
            runge_kutta();
            ecuaciones_algebraicas();
            errorkn=vref-va;
            derivada=(errorkn-error);
            f[ia][l]=(errorkn*alfa) +
(derivada*beta);
            reset1(valores);
      }
      o=o-2;
     }
    }//fin de for de simulaciones
    filtro_menor();
     if(iteracion<=(lplazo+sum))
            {
            if(iteracion<=cplazo)
               {bandera=0;
                busqueda_tabu1();

//**********Fin de programa**********
//NOTA: Recordar que si usas este programa y
quieres utilizar las funciones de SGA debes
normalizar
//tu dominio,ya que es el espacio reflejado en el
contradominio que vas a  analizar
//pasa de la misma  forma con TS

//**********TABU_SEARCH**********
void ts(float iteracion)
{int i,j,l,m,o,ia;//n ya existe
 float valores[5],derivada,errorkn=0;
 //valores guarda el valor de cada elemento en
los minimos de la tabla

  for(i=1;i<=9;i++)
   {b[i]=a[i];}
  for(l=1,i=1;i<=2;i++)
  {
    for(j=1;j<=2;j++,l++)
    {
     valores[l]=tabla[pce[j]][pe[i]];
    }  }
     ug1=ug;    u1=u;      id1=id;
     iq1=iq;    te1=te;
     control_mandani();
     runge_kutta();
     ecuaciones_algebraicas();
     errorkn=vref-va;
     derivada=(errorkn - errores[0][0]);
     errores[0][0]=errorkn;
     copiaf=(errorkn*alfa) + (derivada*beta);
     reset1(valores);

               }
              else
              {bandera=1;

memoria_largoplazo();
                                      }        }
      else
             {
      limpiar1();
      lplazo=iteracion+elim;
      cplazo=iteracion+sum;
}}
//**********Funci¢n_Reset**********
void reset1(float var[])
{
  int i,j,l;
    for(l=1,i=1;i<=2;i++)
  {
  for(j=1;j<=2;j++,l++)
  {
   tabla[pce[j]][pe[i]]=var[l];
  }  }
    ug=ug1;    u=u1;    id=id1;
    iq=iq1;    te=te1;
    for(i=1;i<=9;i++)
    {a[i]=b[i];} }
```

```
//************resultados_finales**********
void r_finales1(void)
{
int i,j,sx,sy,px,py;
clrscr();
if(n==5)
{
gotoxy(50,1);
printf("MEMORIA EXPLICITA");
for(sy=3,i=1;i<=n;i++,sy=sy+2)
{
sx=4;
for(j=1;j<=n;j++,sx=sx+7)
{
gotoxy(sx,sy);
printf("%.2f",teliminado[i][j]);
gotoxy(sx+40,sy);
printf("%d",mexplicita[i][j]);
}}
 gotoxy(8,sy+1);
 printf("MEMORIA DE FRECUENCIA");
 gotoxy(55,sy+1);
 printf("TABLA FINAL");
 sx=5;sy=sy+3;
 for(i=1;i<=n;i++,sy=sy+2)
 {
  sx=4;
  for(j=1;j<=n;j++,sx=sx+7)
  {
   gotoxy(sx,sy);
   printf("%d",ubicacion[i][j]);
   gotoxy(sx+40,sy);
   if(replica>=41){printf("%.2f",tabla[i][j]);}
   else{printf("%.2f",tabla[i][j]);}
  } }
gotoxy(5,sy+1);
printf("TABLA:TABU ELEMENTO
SUMADO");
gotoxy(45,sy+1);
printf("TABLA: TABU ELEMENTO
ELIMINADO");
sx=5;sy=sy+3;
for(i=1;i<=n;i++,sy=sy+2)
 {
  sx=4;
for(j=1;j<=n;j++,sx=sx+7)
  {
   gotoxy(sx,sy);
   printf("%.2f",tsumado[i][j]);
   gotoxy(sx+40,sy);
   printf("%.2f",tabuelim[i][j]);
  }
 }
gotoxy(5,sy+1);
 printf("TABLA: MEMORIA
NUMERADORES (ADD)");
 gotoxy(40,sy+1);
 printf("TABLA: MEMORIA
NUMERADORES (DROP)");
 sx=4;sy=sy+4;
 for(j=1;j<=n;j++,sx=sx+7)
            {
  gotoxy(sx,sy);
  printf("%d",mfadd[j]);
  gotoxy(sx+40,sy);
  printf("%d",mfdrop[j]);
  gotoxy(sx,sy+2);
  printf("%.2f",base[j]);
  gotoxy(25,sy+3);
  printf("Base tabu Sumado y Eliminado");
  gotoxy(sx,sy+4);
  printf("%.3f",badd[j]);
  gotoxy(sx+40,sy+4);
  printf("%.3f",bdrop[j]);
 }
 }//FIN DE PRIMER IF
 else
 {
  for(sy=5,i=1;i<=n;i++,sy=sy+3)
  {
  for(sx=5,j=1;j<=n;j++,sx=sx+5)
  {
   gotoxy(sx,sy);
   printf("%.2f",tabla[i][j]);;
  }  }
 }//fin de else
  getch();}
//**************Funcion_menor***********
void filtro_menor(void)
{
int i,j,l;

 if(copiaf<0)
 {copiaf=-1*copiaf;}else{}
 for(i=1;i<=4;i++)
 {
  num[i]=i;
  for(j=1;j<=2;j++)
    if(f[i][j]<0)
  { f[i][j]=f[i][j]*(-1);}
  else{}
}//maneja positivo los valores para un facil uso
posterior
 for(l=1,j=1,i=1;i<=4;i++,l++)
 {
  if(f[i][j]<=f[i][j+1]){
      zeta[i]=f[i][j];
      cand[l]=j;cand2[l]=j+1;
  }
  else{
       zeta[i]=f[i][j+1];
       cand[l]=j+1;cand2[l]=j;
       }}//fin de for; selecciona cuatro elementos
de funcion objetivo

   for(i=1;i<=3;i++)
   {
      for(j=i+1;j<5;j++)
      {
```

```
        if(zeta[i]<=zeta[j])
    {}
        else{
            num[5]=num[j];//num indica el
orden de las funciones
            num[j]=num[i];//cand indica si es
vecindad izq o der
            num[i]=num[5];//contiene el indice
de mejor a peor fobjetivo
            zeta[5]=zeta[j];
            zeta[j]=zeta[i];
            zeta[i]=zeta[5];//zeta contiene la
mejor fobjetivo de cada vecindad
            cand[5]=cand[j];cand2[5]=cand2[j];
            cand[j]=cand[i];cand2[j]=cand2[i];
            cand[i]=cand[5];cand2[i]=cand2[5];
           }  }  }
}// fin de funci¢n menor
//**********Funcion_limpiar*********
void limpiar1(void)
{
int i,j,l;
 flag++;
 for(i=1;i<=n;i++)
 {
  for(j=1;j<=n;j++)
  {
   mexplicita[i][j]=0;
  } }
 cleaner=0;
}
//*********Memoria_a_corto_plazo*******
void busqueda_tabu1(void)
{
 int i,j,l,suma=0,suma1=0,suma2=0;
 if(cleaner>10)
  {
   limpiar();
  }
 else{}
  for(i=1;i<=4;i++)//desici¢n de vecindad
{ if(zeta[i]<copiaf)
 {
  if(num[i]==1)
  {
suma=mexplicita[pce[num[i]]][v[cand[i]]]+mex
plicita[pce[num[i]]][pe[1]];
   if(pce[num[i]]==centro&&pe[1]==centro)
   {suma1=1;}else{suma1=0;}
  if(suma<=1&&suma1==0)
{
  break;}else{}
  }
  else{
  if(num[i]==2)
  {
suma=mexplicita[pce[num[i]]][v[cand[i]]]+mex
plicita[pce[num[i]]][pe[1]];
  if(pce[num[i]]==centro&&pe[1]==centro)
  {suma1=1;}else{suma1=0;}
 if(suma<=1&&suma1==0)
{ cleaner++;
  principio_tabu(pce[num[i]],pe[1],v[cand[i]]);
  break;}else{}
  }
  else{
  if(num[i]==3)
  {
  suma=mexplicita[pce[num[i]-
2]][v[cand[i]+2]]+mexplicita[pce[num[i]-
2]][pe[2]];
  if(pce[num[i]-2]==centro&&pe[2]==centro)
  {suma1=1;}else{suma1=0;}

  if(suma<=1&&suma1==0)
{ cleaner++;
  principio_tabu(pce[num[i]-
2],pe[2],v[cand[i]+2]);
  }else{}
  }
  else{
  if(num[i]==4)
  {
  suma=mexplicita[pce[num[i]-
2]][v[cand[i]+2]]+mexplicita[pce[num[i]-
2]][pe[2]];
  if(pce[num[i]-2]==centro&&pe[2]==centro)
  {suma1=1;}else{suma1=0;}
  if(suma<=1&&suma1==0)
{
  break;
  }else{}
  }  else{}  }  }  } } else{}}//fin de for en zeta
}
//********Memoria_a_largo_plazo*******
void memoria_largoplazo(void)
{
 busqueda_tabu1();
}
//**********Principio_tabu**********
void principio_tabu(int fila,int colum,int vecino)
{
int ia,m,o,i,j,l;
            mexplicita[fila][colum]=1;
            mexplicita[fila][vecino]=1;
ubicacion[fila][vecino]=ubicacion[fila][vecino]+1;

  if(tipo==1)//eleccion alta influencia
   {
    tsumado[fila][vecino]=0;
   }else{}

 for(i=1;i<=n;i++)
 {
   for(j=1;j<=n;j++)
   {

if(teliminado[i][j]!=0&&tiempo>tabuelim[i][j])
     {
```

```
            tabla[i][j]=registro[i][j];
     }
     else{}
} }
if(tsumado[fila][vecino]<tiempo&&bandera==0)//baj
                    a o alta influencia
  {
   detector++;
   tabla[fila][colum]=tabla[fila][vecino];
   teliminado[fila][colum]=tabla[fila][colum];
 }
 else{}

for(i=1;i<=n;i++)
 {
  if(tabla[fila][vecino]==base[i])
 {
  mfadd[i]++;
  if(bandera==0)
{tsumado[fila][vecino]=tiempo+badd[i];}else{}
 }
 else{}}//fin de for
 for(i=1;i<=n;i++)
 {
  if(teliminado[fila][colum]==base[i])
 {
  mfdrop[i]++;
if(bandera==0){tabuelim[fila][colum]=tiempo+
bdrop[i];}else{}
 }
 else{}} //fin de for
if(tipo==2&&bandera==1)//bandera==1 =
memoria a a largo plazo
 {
 l=max1(mfadd);
 for(i=1;i<=n;i++)
  {
  denadd=denadd + float(mfadd[i]);
  }
  denadd=denadd/float(n);
  multaadd=multaadd +
0.3*(float(mfadd[l]/denadd));
  badd[l]=multaadd;
  l=min1(mfadd);
  incenadd=float(mfadd[l])/denadd;
  badd[l]=badd[l] - incenadd/2;
//****Etapa de multas e incentivos para TS****
 l=max1(mfdrop);
 //dendrop=float(mfdrop[l]);
 for(i=1;i<=n;i++)
 {
  dendrop=dendrop + float(mfdrop[i]);
 }dendrop=dendrop/float(n);
 for(i=1;i<=n;i++)
 {
  multadrop=multadrop +
0.3*(float(mfdrop[i])/dendrop);
  bdrop[i]=bdrop[i] + (multadrop)/tfinal;
 }
 // multadrop=float(mfdrop[l])/dendrop;
 // bdrop[l]=multadrop;
  l=min1(mfdrop);
  incendrop=float(mfdrop[l])/dendrop;
  bdrop[l]=bdrop[l] - incendrop/2;
for(i=1;i<=n;i++)
  {
   if(bdrop[i]<0)
   {bdrop[i]=0;}else{}
   if(badd[i]<0)
   {badd[i]=0;}
   else{}
  }
 }//Fin de if
 else{}}

//**********Maximo_y_minimo*********
//**********funcion_maximo**********
int max1(int vect[])
{
int i,j,denominador;
for(j=1;j<=n-1;j++)
  {
for(i=j+1;i<=n;i++)
  {
if(vect[j]>vect[i])
  {
denominador=vect[j];
  }
else
  {
denominador=vect[i];
break;  }  }
if(i>n)
{
  break;}
  else{}
  }
 return(j);
}
//**********Funcion_minimo**********
int min1(int vector[])
{int i,j,denominador;
  for(j=1;j<=n-1;j++)
  {
 for(i=j+1;i<=n;i++)
  {
 if(vector[j]<vector[i])
  {
   denominador=vector[j];
  }
 else
  {
    denominador=vector[i];
    break;  } }
 if(i>n)
 {break;}
 else{}
  }
 return(j);}
```

## *F.3 BIBLIOTECA BAGTS.H UTILIZADA POR AGTS.CPP*

En esta biblioteca se proporcionan los intervalos y tabals de reglas lingüísticas utilizadas por el programa AGTS.CPP y se encuentran algunas variables como comentarios son soluciones encontradas también como buenas en las que TS y AG pueden comenzar la optimización.

```
float tabla[10][10];

float tabla3[8][8]={{0,0  , 0  , 0  ,0   ,0   , 0  ,0}
,{0,-7  ,-7  ,-7  ,-3  ,-3  ,-1 ,0}
,{0,-7  ,-7  ,-3  ,-3  ,-1  ,0  ,3}
,{0,-7  ,-3  ,-3  ,-1  ,0   ,1  ,3}
,{0,-3  ,-3  ,-1  ,0   ,1   ,3  ,3}
,{0,-3  ,-1  ,0   ,1   ,1   ,3  ,7}
,{0,-1  , 0  ,1   ,3   ,3   ,7  ,7}
,{0,0   ,1   ,3   ,3   ,7   ,7  ,7}};
float tabla2[6][6]={
{0,   0,   0,   0,   0, 0}
,{0,-20 ,-20 ,-20 ,-10 , 0}
,{0,-20  ,-10 ,-10 , 0  ,10}
,{0,-20  ,-10 ,0   ,10  ,20}
,{0,-10  ,0   ,10  ,10  ,20}
,{0,0    ,10  ,20  ,20  ,20}};

float xes[7]={-1.05,-0.7,-0.35,0,0.35,0.7,1.05};
float xces[7]={-0.015,-0.01,-0.005,0,0.005,0.01,0.015};
float pe1[9]={-0.22,-0.12,-0.05,-0.035,0,0.035,0.05,0.12,0.22};
float pde1[9]={-0.0022,-0.00085,-0.0006,-0.00035,0,0.00035,0.0006,0.00085,0.0022};
float candidatos[6]={0,-20,-10,0,10,20};
float xe[11]={-0.25,-0.14,-0.07,-0.04,-0.01,0,0.01,0.04,0.07,0.14,0.25};
float xce[11]={-0.005,-0.0025,-0.0007,-0.0003,-0.0001,0,0.0001,0.0003,0.0007,0.0025,0.005};
//float xers[9]={-0.28,-0.14,-0.07,-0.04,0,0.04,0.07,0.14,0.28};
//float xcers[9]={-0.005,-0.0025,-0.0007,-0.0004,0,0.0004,0.0007,0.0025,0.005};
//float xers[9]={-0.26,-0.12,-0.05,-0.03,0,0.03,0.05,0.12,0.26};
//float xcers[9]={-0.004,-0.002,-0.00045,-0.00035,0,0.00035,0.00045,0.002,0.004};
float xers[9]={-0.26,-0.09,-0.04,-0.03,0,0.03,0.04,0.09,0.26};
float xcers[9]={-0.005,-0.0025,-0.0007,-0.0004,0,0.0004,0.0007,0.0025,0.005};
float base1[8]={0,-7,-4,-1,0,1,4,7},registro[11][11],theta;;
float base2[6]={0,-20,-10,0,10,20},base[10]={0,-20,-10,-5,-1,0,1,5,10,20};
int centro,n,pe[5]={0,0,0,0,0},pce[5]={0,0,0,0,0},v[5]={0,0,0,0,0};
```

```
//***********Etapa_de_funciones*******
void eleccion(int numero,float periodo)
{int i,j;
 float valor,gain=tabla2[5][2];
switch (numero)
{
 case 1:
 {
  n=5;
  for(i=1;i<=n;i++)
  { base[i]=base2[i];
  for(j=1;j<=n;j++)
   {
    tabla[i][j]=tabla2[i][j];
    registro[i][j]=tabla[i][j];
   }  }
   for(i=0;i<=(n+1);i++)
   {xe[i]=xes[i];
    xce[i]=xces[i];
   }
   break;}
 case 2:
 { n=7;
   for(i=1;i<=n;i++)
  { base[i]=base1[i];
  for(j=1;j<=n;j++)
   {
    tabla[i][j]=tabla3[i][j];
    registro[i][j]=tabla[i][j];
   } }
   for(i=0;i<=(n+1);i++)
   {xe[i]=xers[i];
    xce[i]=xcers[i];   }
   break;                }
 case 3:
 {    n=9;
      break;}
      default:
      break;}
      centro=(n+1)/2;
if(periodo==0&&n!=5)
tabla[centro+1][centro+1]=tabla[n][centro];
}else{}
 if(theta<umbral)
 {
  for(i=1;i<=n;i++)
   v[4]=var1[2]+1;
   }
   else{}
   v[1]=var1[1]-1
   {base[i]=base[i]/gain;
    for(j=1;j<=n;j++)
    {
     tabla[i][j]=tabla[i][j]/gain;
     registro[i][j]=tabla[i][j];
    }  }
  valor=valor/gain;
  gain=gain/gain; }
 else{}}
//***********funion_de_vecinos********
void vecinos(int var1[])
{
 if(var1[1]==var1[2])
 {
  if(var1[1]==n)
  {
   v[1]=n-1;
   v[2]=n;
   v[3]=n-1;
   v[4]=n;
  }
  else
  {if(var1[1]==1)
   {
   v[1]=1;
   v[2]=2;
   v[3]=1;
   v[4]=2;
   }else{}}}
else{
   if(var1[2]==n&&var1[1]==n-1)
   {
   v[1]=var1[1]-1;
   v[2]=var1[1]+1;
   v[3]=var1[2]-1;
   v[4]=var1[2];
   }
   else{
   if(var1[1]==1&&var1[2]==2)
   {
   v[1]=var1[1];
   v[2]=var1[1]+1;
   v[3]=var1[2]-1;
   v[3]=var1[2]-1;
   v[4]=var1[2]+1;}
 }}
```