

**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**

---

---

**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**

**SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**DISEÑO DE ESQUEMAS DE TIRO DE CARGA POR  
BAJA FRECUENCIA UTILIZANDO TÉCNICAS  
INTELIGENTES**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:  
MAESTRO EN CIENCIAS  
EN INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**PRESENTA:**

**ING. JESÚS SÁNCHEZ CORTÉS**



**MÉXICO, D. F.**

**2014**









**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

**CARTA DE CESIÓN DE DERECHOS**

En la Ciudad de México D. F., el día 05 del mes de Diciembre del año 2014, el que suscribe Ing. Jesús Sánchez Cortés, alumno del Programa de Maestría en Ciencias en Ingeniería Eléctrica con número de registro B120654, adscrito a la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la ESIME-Zacatenco del IPN, manifiesta que es autor(a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del Dr. David Romero Romero y cede los derechos del trabajo intitulado Diseño de Esquemas de Tiro de Carga por Baja Frecuencia Utilizando Técnicas Inteligentes, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección **sanchezjesus\_crts@hotmail.com** y/o **dromero@ieee.org**. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Ing. Jesús Sánchez Cortés



## RESUMEN

La frecuencia es una variable común en todo el Sistema Eléctrico de Potencia (SEP) que debe permanecer en su valor nominal que es de 60 Hz, o con variaciones máximas de  $\pm 0.2$  Hz. Cuando se presenta un disturbio como la pérdida de generación, los esquemas de tiro de carga por baja frecuencia realizan la desconexión inmediata de bloques de carga a través de escenarios de desconexión para reducir la demanda del sistema y así recuperar la estabilidad de frecuencia.

En ésta tesis se presentan tres metodologías para el diseño de esquemas de tiro de carga por baja frecuencia; por medio de las cuales se alcanza el objetivo que persigue este trabajo al determinar porcentajes de tiro de carga adecuados para recuperar la frecuencia del sistema. En estos esquemas no se considera el efecto del gobernador de velocidad, ni tiempos de retardo, ni la topología de la red. Es decir, únicamente se desarrolla la etapa inercial que consiste en la desconexión inmediata de bloques de carga para cambiar la dirección y velocidad de cambio de la frecuencia hacia 60 Hz.

La primera metodología se establece con base en diversos criterios utilizados convencionalmente. Para la simulación de la operación de estos esquemas se desarrolló un programa computacional en FORTRAN 90. Este programa modela el comportamiento de la frecuencia de acuerdo a sus características de velocidad de cambio respecto al tiempo a través de una ecuación diferencial de primer orden; este programa permite el uso de esquemas estáticos de tiro de carga.

La segunda metodología se compone de dos técnicas de inteligencia artificial que son: lógica difusa y un sistema aditivo difuso; a través de las cuales se desarrolla un sistema de inferencia difuso. Este sistema es capaz de razonar y tomar decisiones por medio de la interpretación de las incertidumbres presentes en el proceso de tiro de carga. Además este sistema es considerado como un esquema dinámico ya que puede determinar la cantidad apropiada de carga a desconectar ante cualquier contingencia. El desarrollo del programa computacional para el diseño del sistema de inferencia difuso se realizó en FORTRAN 90. De igual forma, la simulación de la operación de estos esquemas se realizó mediante el desarrollo de otro programa computacional en el mismo lenguaje que modela el comportamiento de la frecuencia y permite la inserción del sistema de inferencia difuso como una subrutina.

Finalmente se establece la tercera metodología que permite el diseño de esquemas estáticos de tiro de carga basados en la operación de un esquema difuso; para ello es esencial que el esquema difuso esté sintonizado correctamente. De esta manera, la carga a desconectar en cada escenario del esquema estático se determina mediante las decisiones tomadas por el esquema difuso.



## **ABSTRACT**

The frequency is a common variable throughout the Electric Power System (EPS), it must remain at 60 Hz or at  $\pm 0.2$  Hz. When a large disturbance is present in the EPS such as loss of generation, the Under Frequency Load Shedding (UFLS) schemes shed blocks of load through stages in order to reduce the load of the system for recovering the frequency stability.

This thesis presents three methodologies to design UFLS schemes; through which the appropriate percentages of load shedding are determined and thus the objective of this work is achieved. These schemes consider neither the speed governor's effect, nor times delay, nor network topology. Only the inertial phase is developed; it consists on shed blocks of load immediately in order to change the rate of change of frequency and its direction towards 60 Hz.

The first methodology is established based on several criteria used conventionally. A computational program was developed on FORTRAN 90 for the simulation of these schemes' operation. This computational program models the frequency behavior according to the rate of change of frequency by a first-order differential equation. This program allows using static UFLS schemes.

The second methodology is composed by two artificial intelligence techniques: fuzzy logic and an additive fuzzy system; in order to develop a Fuzzy Inference System (FIS). It is able to reason and take decisions through modeling of uncertainties involved in load shedding process. This FIS is considered as a dynamic UFLS scheme because it can determine the appropriate amount of load to be shed against any contingency. For the design of the FIS a computational program was developed on FORTRAN 90; and another one was developed on the same programming language for the simulation of the dynamic schemes, which models the frequency behavior and it allows the insertion of the FIS as a subroutine.

Finally the third methodology is established to design static UFLS schemes based on the operation of a fuzzy scheme; therefore it is essential that the fuzzy scheme is tuned properly. Thereby the load to be shed on each stage of the static scheme is determined through the decisions taken by the fuzzy scheme.



## DEDICATORIA

Con cariño y respeto a mis padres:

*Federico Sánchez Ramírez*

*Y*

*Gloria Luz Cortés Ríos*

A mi hermano:

*Luis Héctor Sánchez Cortés*

Son lo más importante en mi vida, gracias por confiar en mí.



## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios por darme la gracia de vivir, de tener una familia, de ser feliz, de disfrutar lo que hago y de llegar a la culminación de esta etapa tan importante en mi vida.

Al Dr. David Romero Romero por su apoyo incondicional, por sus atinados consejos, por su amistad, por sus palabras de aliento y por ser para mí un modelo a seguir como ejemplo de excelencia.

A mis padres, Federico Sánchez Ramírez y Gloria Luz Cortés Ríos por alentarme a seguir adelante, por enseñarme a ser una persona de bien y por brindarme su amor y comprensión en cada instante de mi vida.

A mi hermano Luis Héctor Sánchez Cortés por apoyarme en todo momento y estar a mi lado incondicionalmente. Así mismo agradezco al resto de mi familia por siempre estar al pendiente de mí.

A mis amigos Octavio Hernández, Alejandra Merlos, Ulises Torres, Jesús Arroyo y Víctor Reséndiz por brindarme su confianza, aprecio y amistad durante tantos años, son personas excepcionales. A mis amigos de la S.E.P.I. Ademir Morales, Nathaly Pérez, Mario Franco, Claudia Franco, Alberto Coronel, Fabián Velázquez, Jonathan Sebastián y a mis demás compañeros de generación por permitirme compartir alegres momentos junto a ustedes y hacer de esta etapa una experiencia inolvidable.

A Edith Andrea Martínez Mosqueda por acompañarme en esta travesía de principio a fin, por alentarme y motivarme en los momentos difíciles y hacer mi vida más alegre. A la M. en C. Mercedes Lázaro Gonzaga por ser pieza fundamental en mi desarrollo profesional, por motivarme a hacer estudios de posgrado y a ser mejor cada día.

A la Comisión Revisora de Tesis por dar seguimiento a mi trabajo y hacer sugerencias para el mejoramiento del mismo, Dr. Ricardo Mota Palomino, Dr. Jaime Robles García, Dr. Raúl Cortés Mateos, Dr. David Sebastián Baltazar y Dr. Daniel Ruiz Vega.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (C.O.N.A.C.yT.) por la beca de estudios de maestría otorgada durante dos años y a la Fundación TELMEX por la beca de excelencia otorgada durante un año y medio.

Al Instituto Politécnico Nacional (I.P.N.) por formarme como profesionista en los niveles de Técnico, Ingeniero y Maestro en Ciencias. Así mismo por la beca otorgada en el Programa Institucional de Formación de Investigadores (P.I.F.I.) a través del proyecto SIP 20130817 y por el apoyo con la beca tesis de maestría.



# CONTENIDO

	Página
<b>RESUMEN</b> .....	<b>VII</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>IX</b>
<b>DEDICATORIA</b> .....	<b>XI</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	<b>XIII</b>
<b>CONTENIDO</b> .....	<b>XV</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>XIX</b>
<b>LISTA DE TABLAS</b> .....	<b>XXIII</b>
<b>NOMENCLATURA</b> .....	<b>XXV</b>
<b>ABREVIATURAS</b> .....	<b>XXVII</b>
<b>CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
1.1 PRELIMINARES.....	1
1.2 PANORAMA GENERAL .....	1
1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	2
1.4 OBJETIVO.....	4
1.5 JUSTIFICACIÓN.....	4
1.6 LIMITACIONES Y ALCANCES .....	5
1.7 ESTADO DEL ARTE.....	5
1.7.1 Trabajos Desarrollados a Nivel Internacional .....	5
1.7.2 Trabajos Desarrollados en la S.E.P.I.-E.S.I.M.E. ....	10
1.8 APORTACIONES.....	10
1.9 PUBLICACIONES DERIVADAS DE LA TESIS .....	11
1.10 ESTRUCTURA DE LA TESIS .....	11
<b>CAPÍTULO 2: TIRO DE CARGA POR BAJA FRECUENCIA</b> .....	<b>15</b>
2.1 INTRODUCCIÓN .....	15
2.2 BALANCE ENTRE POTENCIA DE GENERACIÓN Y POTENCIA DE DEMANDA Y SU EFECTO EN LA FRECUENCIA DEL SISTEMA.....	15
2.3 CONTROL AUTOMÁTICO DE GENERACIÓN .....	16
2.4 PROTECCIÓN DE LAS TURBINAS DE VAPOR CONTRA BAJA FRECUENCIA .....	18
2.5 COMPORTAMIENTO DE LA FRECUENCIA EN SEP.....	20
2.5.1 Comportamiento de la Frecuencia con Pares de Carga y de Generación Constantes .....	20
2.5.2 Comportamiento de la Frecuencia con Pares de Carga y de Generación Variables .....	24
2.5.2.1 Variación del Par de Carga.....	24
2.5.2.2 Variación del Par de Generación.....	27
2.5.3 Variación de la Frecuencia con el Tiempo .....	29
2.5.4 Comportamiento de los Pares del Sistema después del Tiro de Carga .....	32
2.6 ESQUEMAS DE TIRO DE CARGA POR BAJA FRECUENCIA .....	33
2.6.1 Tipos de Esquemas de Desconexión de Carga por Baja Frecuencia.....	34
2.6.2 Diseño de Esquemas Estáticos Convencionales de Tiro de Carga por Baja Frecuencia.....	35
2.6.2.1 Consideraciones.....	35
2.6.2.2 Pérdida de Generación.....	36
2.6.2.3 Cantidad Máxima de Sobrecarga .....	36
2.6.2.4 Reducción Máxima de Frecuencia y Frecuencias de Paso.....	37
2.6.2.5 Número de Pasos del Esquema.....	37
2.6.2.6 Cantidad de Carga a Tirar por Paso.....	38
2.6.2.7 Tiempo de Retardo.....	39

2.6.3 Metodología para el Diseño de Esquemas Convencionales de Tiro de Carga por Baja Frecuencia . 39

<b>CAPÍTULO 3: TÉCNICA DE TIRO DE CARGA INTELIGENTE .....</b>	<b>41</b>
3.1 INTRODUCCIÓN .....	41
3.2 UTILIDAD DE LOS SISTEMAS DIFUSOS .....	41
3.2.1 Aplicación de Sistemas Difusos para Tiro de Carga por Baja Frecuencia en SEP .....	42
3.3 ANÁLISIS DE LA FRECUENCIA EN ESTADO DE EMERGENCIA MEDIANTE LA OPERACIÓN DE UN ESQUEMA ESTÁTICO DE TIRO DE CARGA .....	43
3.4 DISEÑO DE ESQUEMAS DINÁMICOS DE TIRO DE CARGA POR BAJA FRECUENCIA A TRAVÉS DE UN FIS .....	51
3.4.1 Diseño del Sistema de Inferencia Difuso para Tiro de Carga por Baja Frecuencia.....	51
3.4.1.1 Difusificación .....	52
3.4.1.2 Base de Reglas-Mecanismo de Inferencia.....	58
3.4.1.3 Dedifusificación.....	62
3.4.2 Metodología para el Diseño de Esquemas Difusos de Tiro de Carga.....	64
3.5 ANÁLISIS DE LA FRECUENCIA EN ESTADO DE EMERGENCIA MEDIANTE LA OPERACIÓN DE UN ESQUEMA DIFUSO DE TIRO DE CARGA .....	65
3.6 METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO DE ESQUEMAS ESTÁTICOS DE TIRO DE CARGA POR BAJA FRECUENCIA A PARTIR DE UN ESQUEMA DIFUSO .....	73
<b>CAPÍTULO 4: PRUEBAS Y RESULTADOS.....</b>	<b>75</b>
4.1 INTRODUCCIÓN .....	75
4.2 PRUEBAS A ESQUEMAS CONVENCIONALES DE TIRO DE CARGA POR BAJA FRECUENCIA.....	76
4.2.1 Selección del Número de Pasos del Esquema.....	76
4.2.2 Evaluación de Criterios de Tiro de Carga .....	80
4.3 DISEÑO Y DETERMINACIÓN DEL MEJOR ESQUEMA CONVENCIONAL DE TIRO DE CARGA POR BAJA FRECUENCIA.....	85
4.4 DISEÑO Y DETERMINACIÓN DEL MEJOR ESQUEMA DIFUSO DE TIRO DE CARGA POR BAJA FRECUENCIA.....	90
4.4.1 Esquema Difuso de 3 Membresías en las Entradas.....	90
4.4.2 Esquema Difuso de 5 Membresías en las Entradas.....	94
4.5 DISEÑO DE ESQUEMAS ESTÁTICOS DE TIRO DE CARGA POR BAJA FRECUENCIA A PARTIR DEL ESQUEMA DIFUSO D5E.....	98
<b>CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES .....</b>	<b>105</b>
5.1 CONCLUSIONES .....	105
5.2 APORTACIONES .....	107
5.3 RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS .....	107
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>109</b>
<b>APÉNDICE A: DESARROLLO MATEMÁTICO DE LA ECUACIÓN DIFERENCIAL QUE MODELA EL COMPORTAMIENTO DE LA FRECUENCIA RESPECTO AL TIEMPO .....</b>	<b>113</b>
A.1 INTRODUCCIÓN.....	113
A.2 DESARROLLO MATEMÁTICO .....	113
A.2.1 Solución de Ecuaciones Diferenciales Exactas de Primer Orden.....	113
A.2.2 Solución de la Ecuación Diferencial (2.32).....	115
<b>APÉNDICE B: DISEÑO DE UN SISTEMA DE INFERENCIA DIFUSO.....</b>	<b>121</b>
B.1 INTRODUCCIÓN.....	121
B.2 IMPORTANCIA DE LOS SISTEMAS DIFUSOS .....	121
B.3 CONJUNTOS DIFUSOS Y FUNCIONES DE MEMBRESÍA .....	122
B.3.1 Propiedades de los Conjuntos Difusos.....	123
B.3.2 Operaciones entre Conjuntos Difusos.....	124
B.3.3 Tipos de Funciones de Membresía de Una Dimensión .....	125
B.4 LÓGICA DIFUSA .....	129
B.4.1 Relaciones Difusas.....	130

	Página
<i>B.4.1.1 Propiedades y Operaciones entre Relaciones Difusas</i> .....	131
<i>B.4.1.2 Composición de Relaciones Difusas</i> .....	132
<i>B.4.2 Variables Lingüísticas</i> .....	132
<i>B.4.3 Razonamiento Difuso</i> .....	133
<i>B.4.3.1 Reglas de Inferencia Si-Entonces</i> .....	134
<i>B.4.3.2 Regla Composicional de Inferencia</i> .....	134
<i>B.4.3.3 Regla de Inferencia Modus Ponendo Ponens</i> .....	135
<i>B.4.3.4 Regla de Inferencia Modus Tollendo Tollens</i> .....	136
<i>B.4.3.5 Regla de Inferencia del Silogismo</i> .....	136
<i>B.4.3.6 Regla de Inferencia de Contraposición</i> .....	137
<b>B.5 SISTEMA ADITIVO DIFUSO</b> .....	137
<b>B.6 SISTEMA DE INFERENCIA DIFUSO</b> .....	138
<i>B.6.1 Difusificación</i> .....	140
<i>B.6.2 Base de Reglas</i> .....	140
<i>B.6.2.1 Construcción de la Base de Reglas</i> .....	141
<i>B.6.3 Máquina de Inferencia</i> .....	143
<i>B.6.4 Dedifusificación</i> .....	146
<b>APÉNDICE C: SINTONIZACIÓN DE LAS FUNCIONES DE MEMBRESÍA DE LOS ESQUEMAS DIFUSOS</b> .....	<b>151</b>
C.1 INTRODUCCIÓN .....	151
C.2 ESQUEMAS DIFUSOS DE TRES MEMBRESÍAS EN LAS ENTRADAS Y CUATRO MEMBRESÍAS EN LA SALIDA..	151
C.3 ESQUEMAS DIFUSOS DE CINCO MEMBRESÍAS EN LAS ENTRADAS Y SEIS MEMBRESÍAS EN LA SALIDA .....	163
C.4 PROPUESTA DE UNA METODOLOGÍA PARA REALIZAR LA SINTONIZACIÓN DE LAS MEMBRESÍAS DE UN ESQUEMA DIFUSO DE TIRO DE CARGA POR BAJA FRECUENCIA .....	177
<b>APÉNDICE D: CÓDIGO FUENTE DE LOS PROGRAMAS DESARROLLADOS EN FORTRAN 90.</b>	<b>179</b>
D.1 INTRODUCCIÓN .....	179
D.2 PROGRAMA DEL COMPORTAMIENTO DE LA FRECUENCIA UTILIZANDO ESQUEMAS ESTÁTICOS DE TIRO DE CARGA .....	180
D.3 EJEMPLO DE LA EJECUCIÓN DEL PROGRAMA QUE OPERA CON ESQUEMAS ESTÁTICOS DE TIRO DE CARGA .....	181
D.4 PROGRAMA DEL DISEÑO DEL SISTEMA DE INFERENCIA DIFUSO .....	183
D.5 PROGRAMA DEL COMPORTAMIENTO DE LA FRECUENCIA UTILIZANDO ESQUEMAS DIFUSOS DE TIRO DE CARGA .....	186
D.6 EJEMPLO DE LA EJECUCIÓN DEL PROGRAMA QUE OPERA CON ESQUEMAS DIFUSOS DE TIRO DE CARGA ..	190



# LISTA DE FIGURAS

	Página
FIGURA 2.1 LAZOS DE CONTROL AUTOMÁTICO DE CARGA-FRECUENCIA [ADAPTADO DE 15].....	17
FIGURA 2.2 A) INCREMENTO DEL ESTRÉS EN LA TURBINA DEBIDO A LA OPERACIÓN EN FRECUENCIAS ANORMALES, B) CURVA TÍPICA DE RESISTENCIA A LA FATIGA DE LOS ÁLABES DE UNA TURBINA DE VAPOR [7]. .....	19
FIGURA 2.3 LÍMITES DE FRECUENCIA PARA LA OPERACIÓN DE UNA TURBINA DE VAPOR [7]. .....	20
FIGURA 2.4 COMPORTAMIENTO CARACTERÍSTICO DE LA FRECUENCIA PARA DIFERENTES NIVELES DE SOBRECARGA CON PARES DE GENERACIÓN Y CARGA CONSTANTES [7].....	23
FIGURA 2.5 COMPORTAMIENTO DE LA FRECUENCIA ANTE DIFERENTES NIVELES DE CARGA DESCONECTADA PARA UNA MISMA CONTINGENCIA [7].....	23
FIGURA 2.6 EFECTO DE TIRO DE CARGA EN DIFERENTES PASOS CON PARES DE GENERACIÓN Y CARGA CONSTANTES.....	24
FIGURA 2.7 COMPORTAMIENTO CARACTERÍSTICO DE LA FRECUENCIA PARA DIFERENTES NIVELES DE SOBRECARGA CON PARES DE GENERACIÓN Y CARGA VARIABLES [ADAPTADO DE 7].....	30
FIGURA 2.8 EFECTO DE DIFERENTES TIROS DE CARGA PARA UN MISMO PASO [ADAPTADO DE 7]. .....	31
FIGURA 2.9 EFECTO DE TIRO DE CARGA EN DIFERENTES PASOS CON PARES DE GENERACIÓN Y CARGA VARIABLES. 31	
FIGURA 2.10 METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO DE ESQUEMAS ESTÁTICOS CONVENCIONALES DE TIRO DE CARGA. ...	39
FIGURA 3.1 LÓGICA DE OPERACIÓN DE UN ESQUEMA ESTÁTICO DE DESCONEXIÓN DE CARGA POR BAJA FRECUENCIA. ....	43
FIGURA 3.2 FUNCIONES DE MEMBRESÍA PARA DIFUSIFICAR LA FRECUENCIA.....	56
FIGURA 3.3 FUNCIONES DE MEMBRESÍA PARA DIFUSIFICAR LA VARIACIÓN DE FRECUENCIA. ....	57
FIGURA 3.4 COMPORTAMIENTO DE LA FRECUENCIA EN RELACIÓN A SU NIVEL Y VARIACIÓN. ....	60
FIGURA 3.5 BASE DE REGLAS. ....	61
FIGURA 3.6 FUNCIONES DE MEMBRESÍA DE SALIDA TIPO SINGLETÓN.....	63
FIGURA 3.7 METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO DE UN ESQUEMA DIFUSO DE TIRO DE CARGA POR BAJA FRECUENCIA (FIS).....	64
FIGURA 3.8 LÓGICA DE OPERACIÓN DE UN ESQUEMA DINÁMICO DE DESCONEXIÓN DE CARGA POR BAJA FRECUENCIA. ....	66
FIGURA 3.9 METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO DE ESQUEMAS ESTÁTICOS DE TIRO DE CARGA A PARTIR DE UN ESQUEMA DIFUSO.....	74
FIGURA 4.1 OPERACIÓN DE LOS ESQUEMAS CONVENCIONALES DE TRES PASOS.....	77
FIGURA 4.2 OPERACIÓN DE LOS ESQUEMAS CONVENCIONALES DE CUATRO PASOS. ....	78
FIGURA 4.3 OPERACIÓN DE LOS ESQUEMAS CONVENCIONALES DE SEIS PASOS.....	79
FIGURA 4.4 OPERACIÓN DE LOS ESQUEMAS CONVENCIONALES CON CRITERIO: A) TIPO 1, B) TIPO 2 Y C) TIPO 3.....	81
FIGURA 4.5 TENDENCIA DE SOBRETIRO DE CARGA DE LOS ESQUEMAS TIPO 1, TIPO 2 Y TIPO 3. ....	83
FIGURA 4.6 OPERACIÓN DE LOS ESQUEMAS CONVENCIONALES BAJO ESTUDIO ANTE DIFERENTES PÉRDIDAS DE GENERACIÓN.....	86
FIGURA 4.7 TENDENCIA DE SOBRETIRO DE CARGA DE LOS ESQUEMAS CONVENCIONALES BAJO ESTUDIO. ....	89
FIGURA 4.8 FUNCIONES DE MEMBRESÍA PARA DIFUSIFICAR LAS ENTRADAS DEL ESQUEMA D3E: A) FRECUENCIA Y B) VARIACIÓN DE FRECUENCIA. ....	91
FIGURA 4.9 BASE DE REGLAS PARA EL ESQUEMA D3E. ....	92
FIGURA 4.10 FUNCIONES DE MEMBRESÍA PARA EL TIRO DE CARGA DEL ESQUEMA D3E.....	92
FIGURA 4.11 OPERACIÓN DEL ESQUEMA DIFUSO D3E ANTE DIFERENTES PÉRDIDAS DE GENERACIÓN. ....	93
FIGURA 4.12 FUNCIONES DE MEMBRESÍA PARA DIFUSIFICAR LAS ENTRADAS DEL ESQUEMA D5E: A) FRECUENCIA Y B) VARIACIÓN DE FRECUENCIA. ....	94
FIGURA 4.13 BASE DE REGLAS PARA EL ESQUEMA D5E. ....	95
FIGURA 4.14 FUNCIONES DE MEMBRESÍA PARA EL TIRO DE CARGA DEL ESQUEMA D5E.....	96
FIGURA 4.15 OPERACIÓN DEL ESQUEMA DIFUSO D5E ANTE DIFERENTES PÉRDIDAS DE GENERACIÓN. ....	96
FIGURA 4.16 OPERACIÓN DE LOS ESQUEMAS ESTÁTICOS DE SEIS PASOS A PARTIR DEL ESQUEMA D5E. ....	99
FIGURA 4.17 OPERACIÓN DEL ESQUEMA ESTÁTICO DE 7 PASOS A PARTIR DEL ESQUEMA D5E. ....	102

	Página
FIGURA 4.18 TENDENCIA DE SOBRETIRO DE CARGA DE LOS ESQUEMAS ESTÁTICOS DISEÑADOS A PARTIR DEL ESQUEMA D5E. ....	103
FIGURA B.1 DOS CONJUNTOS DIFUSOS: A Y B. ....	124
FIGURA B.2 UNIÓN DE CONJUNTOS DIFUSOS A Y B. ....	125
FIGURA B.3 INTERSECCIÓN DE CONJUNTOS DIFUSOS A Y B. ....	125
FIGURA B.4 COMPLEMENTO DEL CONJUNTO DIFUSO A. ....	125
FIGURA B.5 FM TRIANGULAR. ....	126
FIGURA B.6 FM: A) TRAPEZOIDAL DERECHA, B) TRAPEZOIDAL IZQUIERDA, C) TRAPEZOIDAL COMPLETA. ....	127
FIGURA B.7 FM GAUSSIANA. ....	128
FIGURA B.8 FM CAMPANA GENERALIZADA. ....	129
FIGURA B.9 FM SIGMOIDAL. ....	129
FIGURA B.10 NÚMEROS DIFUSOS DE UN CONJUNTO $\mathcal{L}(\text{temperatura})$ . ....	133
FIGURA B.11 ARQUITECTURA DE UN SISTEMA ADITIVO DIFUSO [ADAPTADO DE 21]. ....	138
FIGURA B.12 ESTRUCTURA DE UN SISTEMA DE INFERENCIA DIFUSO. ....	139
FIGURA B.13 EJEMPLO DE BASE DE REGLAS (VARIABLES DE ESTADO: FRECUENCIA, CAMBIO DE FRECUENCIA Y TIRO DE CARGA). ....	142
FIGURA C.1 FUNCIONES DE MEMBRESÍA PARA DIFUSIFICAR LAS ENTRADAS DEL ESQUEMA D3A: A) FRECUENCIA Y B) VARIACIÓN DE FRECUENCIA. ....	152
FIGURA C.2 BASE DE REGLAS PARA EL ESQUEMA D3A. ....	153
FIGURA C.3 FUNCIONES DE MEMBRESÍA PARA EL TIRO DE CARGA EN EL ESQUEMA D3A. ....	153
FIGURA C.4 OPERACIÓN DEL ESQUEMA DIFUSO D3A ANTE DIFERENTES PÉRDIDAS DE GENERACIÓN. ....	154
FIGURA C.5 BASE DE REGLAS PARA EL ESQUEMA D3B. ....	155
FIGURA C.6 OPERACIÓN DEL ESQUEMA DIFUSO D3B ANTE DIFERENTES PÉRDIDAS DE GENERACIÓN. ....	156
FIGURA C.7 FUNCIONES DE MEMBRESÍA PARA EL TIRO DE CARGA EN EL ESQUEMA D3C. ....	157
FIGURA C.8 OPERACIÓN DEL ESQUEMA DIFUSO D3C ANTE DIFERENTES PÉRDIDAS DE GENERACIÓN. ....	158
FIGURA C.9 FUNCIONES DE MEMBRESÍA PARA EL TIRO DE CARGA EN EL ESQUEMA D3D. ....	159
FIGURA C.10 OPERACIÓN DEL ESQUEMA DIFUSO D3D ANTE DIFERENTES PÉRDIDAS DE GENERACIÓN. ....	159
FIGURA C.11 BASE DE REGLAS PARA EL ESQUEMA D3E. ....	161
FIGURA C.12 OPERACIÓN DEL ESQUEMA DIFUSO D3E ANTE DIFERENTES PÉRDIDAS DE GENERACIÓN. ....	161
FIGURA C.13 FUNCIONES DE MEMBRESÍA PARA DIFUSIFICAR LAS ENTRADAS DEL ESQUEMA D5A: A) FRECUENCIA Y B) VARIACIÓN DE FRECUENCIA. ....	164
FIGURA C.14 BASE DE REGLAS PARA EL ESQUEMA D5A. ....	165
FIGURA C.15 FUNCIONES DE MEMBRESÍA PARA EL TIRO DE CARGA EN EL ESQUEMA D5A. ....	165
FIGURA C.16 OPERACIÓN DEL ESQUEMA DIFUSO D5A ANTE DIFERENTES PÉRDIDAS DE GENERACIÓN. ....	166
FIGURA C.17 BASE DE REGLAS PARA EL ESQUEMA D5B. ....	168
FIGURA C.18 FUNCIONES DE MEMBRESÍA PARA EL TIRO DE CARGA EN EL ESQUEMA D5B. ....	168
FIGURA C.19 OPERACIÓN DEL ESQUEMA DIFUSO D5B ANTE DIFERENTES PÉRDIDAS DE GENERACIÓN. ....	169
FIGURA C.20 FUNCIONES DE MEMBRESÍA PARA EL TIRO DE CARGA EN EL ESQUEMA D5C. ....	171
FIGURA C.21 OPERACIÓN DEL ESQUEMA DIFUSO D5C ANTE DIFERENTES PÉRDIDAS DE GENERACIÓN. ....	172
FIGURA C.22 FUNCIONES DE MEMBRESÍA PARA EL TIRO DE CARGA EN EL ESQUEMA D5D. ....	173
FIGURA C.23 OPERACIÓN DEL ESQUEMA DIFUSO D5D ANTE DIFERENTES PÉRDIDAS DE GENERACIÓN. ....	174
FIGURA C.24 FUNCIONES DE MEMBRESÍA PARA DIFUSIFICAR LAS ENTRADAS DEL ESQUEMA D5E: A) FRECUENCIA Y B) VARIACIÓN DE FRECUENCIA. ....	175
FIGURA C.25 OPERACIÓN DEL ESQUEMA DIFUSO D5E ANTE DIFERENTES PÉRDIDAS DE GENERACIÓN. ....	176
FIGURA C.26 METODOLOGÍA PARA LA SINTONIZACIÓN DE LAS FUNCIONES DE MEMBRESÍA DE ENTRADA DE UN ESQUEMA DIFUSO DE TIRO DE CARGA POR BAJA FRECUENCIA. ....	177
FIGURA D.1 EJEMPLO DEL ARCHIVO DATOS.TXT PARA EL PROGRAMA DE ESQUEMAS ESTÁTICOS. ....	181
FIGURA D.2 EJEMPLO DEL ARCHIVO DATOS_ESQUEMA.TXT DE UN ESQUEMA ESTÁTICO DE TIRO DE CARGA. ....	182
FIGURA D.3 EJEMPLO DEL ARCHIVO DE SALIDA RESULTADO.TXT PARA UNA CONTINGENCIA DE 10% DE SOBRECARGA. ....	183
FIGURA D.4 EJEMPLO DEL ARCHIVO DATOS.TXT PARA EL PROGRAMA DE ESQUEMAS DIFUSOS. ....	190

	Página
FIGURA D.5 EJEMPLO DEL ARCHIVO MF_POINTS.TXT PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LAS FUNCIONES DE MEMBRESÍA DE ENTRADA. ....	191
FIGURA D.6 EJEMPLO DEL ARCHIVO LOAD_SHEDDING.TXT PARA EL TIRO DE CARGA DE LAS FUNCIONES DE MEMBRESÍA DE SALIDA. ....	192
FIGURA D.7 EJEMPLO DEL ARCHIVO RULE_BASE.TXT. ....	192
FIGURA D.8 EJEMPLO DEL ARCHIVO DE SALIDA RESULTADOFIS.TXT PARA UNA CONTINGENCIA DE 10% DE SOBRECARGA. ....	193
FIGURA D. 9 EJEMPLO DEL ARCHIVO DE SALIDA RESULTADO.TXT PARA UNA CONTINGENCIA DE 10% DE SOBRECARGA. ....	194



# LISTA DE TABLAS

	Página
TABLA 3.1 ESQUEMA ESTÁTICO DE TIRO DE CARGA. ....	44
TABLA 3.2 REGISTRO DE RESULTADOS AL COMENZAR LA SIMULACIÓN. ....	46
TABLA 3.3 REGISTRO DE RESULTADOS EN 0.001 SEGUNDOS. ....	47
TABLA 3.4 REGISTRO DE RESULTADOS EN 1.273 SEGUNDOS. ....	48
TABLA 3.5 REGISTRO DE RESULTADOS EN 1.274 SEGUNDOS. ....	50
TABLA 3.6 REGISTRO DE RESULTADOS EN 60 SEGUNDOS. ....	50
TABLA 3.7 COMPORTAMIENTO DE LA FRECUENCIA ANTE DIFERENTES DISTURBIOS. ....	52
TABLA 3.8 VARIABLES LINGÜÍSTICAS PARA LA FRECUENCIA. ....	55
TABLA 3.9 VARIABLES LINGÜÍSTICAS PARA LA VARIACIÓN DE FRECUENCIA. ....	57
TABLA 3.10 ACCIONES DE TIRO DE CARGA MEDIANTE VARIABLES LINGÜÍSTICAS PARA LA SALIDA. ....	59
TABLA 3.11 REGISTRO DE RESULTADOS AL INICIAR LA SIMULACIÓN. ....	68
TABLA 3.12 REGISTRO DE RESULTADOS EN 0.001 SEGUNDOS. ....	69
TABLA 3.13 REGISTRO DE RESULTADOS EN 1.273 SEGUNDOS. ....	70
TABLA 3.14 REGISTRO DE RESULTADOS EN 1.274 SEGUNDOS. ....	72
TABLA 3.15 REGISTRO DE RESULTADOS EN 60 SEGUNDOS. ....	73
TABLA 4.1 ESQUEMAS CONVENCIONALES CON DIFERENTES PASOS DE DESCONEXIÓN DE CARGA. ....	76
TABLA 4.2 CRITERIOS DE DESCONEXIÓN DE CARGA. ....	80
TABLA 4.3 ESQUEMAS DE TIRO DE CARGA PARA EVALUAR LOS CRITERIOS DE DESCONEXIÓN. ....	81
TABLA 4.4 SOBRETIRO DE CARGA PROMEDIO DE LOS ESQUEMAS QUE UTILIZAN LOS CRITERIOS DE DESCONEXIÓN. ....	84
TABLA 4.5 ESQUEMAS CONVENCIONALES DE TIRO DE CARGA BAJO ESTUDIO. ....	85
TABLA 4.6 RESUMEN DE LA OPERACIÓN DE LOS ESQUEMAS CONVENCIONALES BAJO ESTUDIO. ....	88
TABLA 4.7 SOBRETIRO DE CARGA PROMEDIO DE LOS ESQUEMAS CONVENCIONALES BAJO ESTUDIO. ....	90
TABLA 4.8 VARIABLES LINGÜÍSTICAS DE ENTRADA PARA EL ESQUEMA D3E. ....	91
TABLA 4.9 ACCIONES DE TIRO DE CARGA PARA EL ESQUEMA D3E. ....	92
TABLA 4.10 RESUMEN DE LA OPERACIÓN DEL ESQUEMA D3E. ....	93
TABLA 4.11 VARIABLES LINGÜÍSTICAS DE ENTRADA PARA EL ESQUEMA D5E. ....	95
TABLA 4.12 ACCIONES DE TIRO DE CARGA PARA EL ESQUEMA D5E. ....	95
TABLA 4.13 RESUMEN DE LA OPERACIÓN DEL ESQUEMA D5E. ....	97
TABLA 4.14 ESQUEMAS ESTÁTICOS DE SEIS PASOS A PARTIR DEL ESQUEMA D5E. ....	98
TABLA 4.15 RESUMEN DE LA OPERACIÓN DE LOS ESQUEMAS ESTÁTICOS DE SEIS PASOS. ....	100
TABLA 4.16 ESQUEMA ESTÁTICO DE 7 PASOS A PARTIR DEL ESQUEMA D5E. ....	101
TABLA 4.17 RESUMEN DE LA OPERACIÓN DEL ESQUEMA ESTÁTICO DE 7 PASOS. ....	102
TABLA 4.18 SOBRETIRO DE CARGA PROMEDIO DE LOS ESQUEMAS ESTÁTICOS A PARTIR DEL ESQUEMA D5E. ....	103
TABLA B.1 TABLA DE VERDAD DE LA REGLA DE INFERENCIA MODUS PONENDO PONENS. ....	135
TABLA B.2 TABLA DE VERDAD DE LA REGLA DE INFERENCIA MODUS TOLLENDO TOLLENS. ....	136
TABLA B.3 TABLA DE VERDAD DE LA REGLA DE INFERENCIA DEL SILOGISMO. ....	137
TABLA B.4 TABLA DE VERDAD DE LA REGLA DE INFERENCIA DE CONTRAPOSICIÓN. ....	137
TABLA C.1 VARIABLES LINGÜÍSTICAS DE ENTRADA DEL ESQUEMA D3A. ....	153
TABLA C.2 ACCIONES DE TIRO DE CARGA PARA EL ESQUEMA D3A. ....	153
TABLA C.3 RESUMEN DE LA OPERACIÓN DEL ESQUEMA D3A. ....	154
TABLA C.4 RESUMEN DE LA OPERACIÓN DEL ESQUEMA D3B. ....	156
TABLA C.5 ACCIONES DE TIRO DE CARGA PARA EL ESQUEMA D3C. ....	157
TABLA C.6 RESUMEN DE LA OPERACIÓN DEL ESQUEMA D3C. ....	158
TABLA C.7 ACCIONES DE TIRO DE CARGA PARA EL ESQUEMA D3D. ....	159
TABLA C.8 RESUMEN DE LA OPERACIÓN DEL ESQUEMA D3D. ....	160
TABLA C.9 RESUMEN DE LA OPERACIÓN DEL ESQUEMA D3E. ....	162
TABLA C.10 ACCIONES DE TIRO DE CARGA PARA EL ESQUEMA D5A. ....	165

	Página
TABLA C.11 RESUMEN DE LA OPERACIÓN DEL ESQUEMA D5A.....	166
TABLA C.12 ACCIONES DE TIRO DE CARGA PARA EL ESQUEMA D5B.....	168
TABLA C.13 RESUMEN DE LA OPERACIÓN DEL ESQUEMA D5B.....	169
TABLA C.14 ACCIONES DE TIRO DE CARGA PARA EL ESQUEMA D5C.....	171
TABLA C.15 RESUMEN DE LA OPERACIÓN DEL ESQUEMA D5C.....	172
TABLA C.16 ACCIONES DE TIRO DE CARGA PARA EL ESQUEMA D5D.....	173
TABLA C.17 RESUMEN DE LA OPERACIÓN DEL ESQUEMA D5D.....	174
TABLA C.18 RESUMEN DE LA OPERACIÓN DEL ESQUEMA D5E.....	176

# NOMENCLATURA

$H$	Constante de inercia del sistema [s].
$f$	Frecuencia [Hz].
$f_0$	Frecuencia base (60 Hz).
$f_{inic}$	Frecuencia inicial de corte [Hz].
$f'$	Cambio de la frecuencia [pu].
$\delta$	Ángulo de desplazamiento eléctrico [°].
$T_G$	Par de generación [pu].
$T_{G0}$	Par de generación inicial [pu].
$T_{G_i}$	Par de generación actual [pu].
$\Delta T_G$	Incremento del par de generación [pu].
$T_{G_{i+1}}$	Par de generación después del corte de carga [pu].
$T_L$	Par de carga [pu].
$T_{L0}$	Par de carga inicial [pu].
$T_{L_i}$	Par de carga actual [pu].
$\Delta T_L$	Incremento del par de carga [pu].
$T_{L_{i+1}}$	Par de carga después del corte de carga [pu].
$T_a$	Par de aceleración del sistema [pu].
$T_{a_{i+1}}$	Par de aceleración del sistema después del corte de carga [pu].
$\omega_0$	Velocidad síncrona [rad/s].
$t$	Tiempo [s].
$\frac{df}{dt}$	Velocidad de cambio de la frecuencia [Hz/s].
$P_L$	Potencia de carga [pu].
$D_L$	Factor de amortiguamiento de carga.
$D_T$	Factor de amortiguamiento total [pu].
$D_{T_{i+1}}$	Factor de amortiguamiento total después del corte de carga [pu].
$T_{LBLS}$	Par de carga justo antes del tiro de carga [pu].
$LS$	Carga a tirar por el esquema [%].
$LS_{EQ}$	Carga tirada equivalente [pu].
$OL$	Sobrecarga [%].
$LG$	Pérdida de generación [%].
$Nstp$	Número de pasos.
$f_{stp}$	Frecuencia de paso [Hz].
$CRISPLS$	Tiro de carga nítido [%].
$U$	Universo del discurso.
$x$	Elemento del conjunto difuso $X$ .
$X$	Conjunto difuso.
$\mu_A(\cdot)$	Función de membresía del conjunto difuso $A$ .

$supp(\cdot)$	Soporte de un conjunto difuso.
$hgt(\cdot)$	Altura de un conjunto difuso.
$(\cdot)_\alpha$	Corte $\alpha$ de un conjunto difuso.
$ \cdot $	Cardinalidad escalar de un conjunto difuso.
$\subseteq$	Subconjunto de.
$\Leftrightarrow$	Si y sólo si.
$\in$	Pertenencia.
$\equiv$	Idéntico.
$\mathcal{LX}$	Conjunto de términos de $x$ .
$G$	Regla sintáctica que genera los términos en $\mathcal{LX}$ .
$M_x$	Regla semántica que asocia cada valor lingüístico con su significado.
$mín$	Valor mínimo del conjunto.
$máx$	Valor máximo del conjunto.
$\sigma$	Ancho de la función de membresía.
$\vee$	Máximo, disyunción u OR.
$\wedge$	Mínimo, conjunción o AND.
$\circ$	Operador de composición.
$u(t)$	Entrada de un sistema.
$x(t)$	Estados de un sistema.
$y(t)$	Salida de un sistema.
$y_{ref}$	Salida de referencia.
$k$	Tiempo de muestreo.
$\widetilde{CLU}$	Conjunto difuso recortado.
$\widetilde{SLU}$	Conjunto difuso escalado.
$\widetilde{U}$	Salida de control.
$M$	Términos de la ecuación diferencial que no contienen derivada.
$N$	Términos de la ecuación diferencial que multiplican a la derivada.
$\phi$	Función solución de una ecuación diferencial exacta de primer orden.
$\psi(x,y)$	Función que depende de una variable independiente y de una variable dependiente.
$\partial$	Derivada parcial.
$\mu(t)$	Factor de integración dependiente del tiempo.
$\eta_{(f)}$	Constante que depende de $f'$ .

## ABREVIATURAS

<i>AGC</i>	Control Automático de Generación (Automatic Generation Control*).
<i>ALFC</i>	Control Automático de Carga-Frecuencia (Automatic Load-Frequency Control*).
<i>AVR</i>	Regulador Automático de Voltaje (Automatic Voltage Regulator*).
<i>EDCBF</i>	Esquemas de Desconexión de Carga por Baja Frecuencia.
<i>EPS</i>	Sistema Eléctrico de Potencia (Electric Power System*).
<i>FIS</i>	Sistema de Inferencia Difuso (Fuzzy Inference System*).
<i>FM</i>	Función de Membresía.
<i>FMINLP</i>	Difuso Combinado con Programación No Lineal (Fuzzy Mixed Non-Linear Programming*).
<i>FORTTRAN</i>	Traductor de Fórmulas (Formula Translator*) Lenguaje de programación de alto nivel.
<i>IEEE</i>	Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (Institute of Electrical and Electronics Engineers*).
<i>MISO</i>	Entrada Múltiple-Salida Única (Multi-Input Single-Output*).
<i>PLC</i>	Controlador Lógico Programable (Programmable Logic Controller*).
<i>SCADA</i>	Supervisión, Control y Adquisición de Datos (Supervisory Control and Data Acquisition*).
<i>SEP</i>	Sistema Eléctrico de Potencia.
<i>SFR</i>	Respuesta de la Frecuencia del Sistema (System Frequency Response*).
<i>UFLS</i>	Tiro de Carga por Baja Frecuencia (Under Frequency Load Shedding*).
<i>UVLS</i>	Tiro de Carga por Bajo Voltaje (Under Voltage Load Shedding*).

\*Por sus siglas en inglés.



# CAPÍTULO 1:

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 PRELIMINARES

En éste capítulo se presenta un breve panorama histórico de los trabajos que se han desarrollado sobre los esquemas de desconexión de carga por baja frecuencia (EDCBF) adaptables mediante técnicas inteligentes. De igual manera se describe el problema a resolver, las metas a alcanzar y los límites de este trabajo; así como el porqué de la realización de la tesis. También se muestra la estructura general del contenido por capítulo de la misma.

### 1.2 PANORAMA GENERAL

Un Sistema Eléctrico de Potencia (SEP) que opera en condiciones normales, puede perder la estabilidad tanto de frecuencia como de voltaje si ocurre un disturbio. Los disturbios que provocan que el SEP entre en situación de emergencia por baja frecuencia son la pérdida de generación y las sobrecargas [1, 2]. Sin embargo, la inestabilidad por sobrecarga es un fenómeno que no ocurre a menudo [3]. Así mismo, una pérdida de generación es vista por el SEP como una sobrecarga.

Cuando el SEP ha entrado en un estado de emergencia por pérdida de generación, no es posible alimentar a todas las cargas con la generación disponible. Esto puede ocasionar que se abran algunas líneas de enlace en los puntos de sobrecarga, separando al sistema en una o varias islas debido a las oscilaciones de potencia [4, 5, 6]. Este problema es bastante severo ya que puede dañar a la generación, específicamente a las turbinas acopladas a los generadores. En plantas hidroeléctricas la frecuencia puede caer hasta un 10% sin causar daños graves; mientras que en las plantas térmicas las turbinas de vapor son altamente sensibles a las variaciones de frecuencia, teniendo daños irreversibles si ésta disminuye en un 5% [2, 7, 8, 9]. Esto implica que si la frecuencia no es recuperada en un periodo de tiempo corto, el sistema puede colapsar en su totalidad [4, 10].

Cualquier tipo de turbina puede sufrir daños ante variaciones de frecuencia; sin embargo, son las turbinas de vapor las que presentan mayor sensibilidad a este tipo de variaciones. Cada turbina de vapor está formada por varias filas de álabes de diferentes longitudes; de tal modo que cuando el vapor es inyectado, los álabes son golpeados por éste para provocar rotación. Si la cantidad de vapor que entra en la turbina no es la adecuada, puede golpear con mayor o menor presión a los álabes deformándolos [11].

Las turbinas de vapor son sensibles a las oscilaciones de carga en alta y baja presión; por ello no es permitida su operación en frecuencias menores a 58.5 Hz, puesto que el estrés en la turbina debido a las variaciones de frecuencia y carga es acumulativo. Es decir, si la frecuencia continúa disminuyendo, el daño a la turbina incrementa en forma exponencial [1, 6, 8, 11]. No es recomendable la operación de una planta térmica en frecuencias cercanas a 57 Hz, ya que su rendimiento se ve afectado severamente al reducir la alimentación de las calderas [2, 3, 4, 8]. Los límites permisibles que aseguran un funcionamiento adecuado de las turbinas de vapor, dependen directamente del tiempo al que éstas sean expuestas a trabajar a bajos niveles de frecuencia. De esta manera es posible la operación durante 1 segundo a 56.5 Hz hasta 500 minutos a 59.4 Hz [1, 4, 6].

Para evitar daños en el SEP (en especial a las turbinas de vapor), cuando ocurre un disturbio que provoca que la frecuencia comience disminuir súbitamente se utilizan los EDCBF, también llamados esquemas remediales [12]. Su función es recuperar el balance entre potencia demandada y potencia generada del sistema, mediante la desconexión de cargas equivalentes al porcentaje de sobrecarga visto por el sistema debido a la pérdida de generación [7, 12, 13, 14]. No es necesario que la frecuencia se recupere exactamente a su valor nominal ya que los controles del generador pueden terminar de recuperarla, siempre que ésta se encuentre en valores por arriba de los 59 Hz y por debajo de los 61 Hz [1, 2, 6, 7]. Los fabricantes de turbinas de vapor recomiendan iniciar el tiro de carga en frecuencias cercanas a 59.5 Hz, para que sea posible operar la turbina a frecuencias bajas sin que se dañe hasta llegar al siguiente nivel de disparo en el esquema remedial [1]. Sin embargo, en muchos países (incluido México) los esquemas de tiro de carga son diseñados con una frecuencia inicial de disparo de 59.3 Hz por razones propias de sus sistemas de potencia [3, 6, 7, 12].

### **1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

En México la frecuencia nominal es de 60 Hz con variaciones permisibles de  $\pm 0.2$  Hz. Es decir, la frecuencia debe permanecer dentro de un ancho de banda de 59.8 Hz a 60.2 Hz para asegurar la estabilidad de frecuencia y la integridad del sistema; así como la calidad de la energía para su consumo. De esta manera cuando la potencia generada es igual a la potencia demandada se logra la estabilidad de frecuencia [12].

Cuando ocurre una contingencia por pérdida de generación la frecuencia disminuye excesivamente rápido, de tal forma que ésta puede incursionar en la zona de daño de las turbinas de vapor antes de que se observe la respuesta de los lazos de control de carga-frecuencia en su comportamiento. Ante estos eventos se utilizan los EDCBF con el fin de cambiar la dirección y velocidad de decaimiento de la frecuencia hacia su valor nominal; permitiendo así que los lazos de control de carga-frecuencia terminen de recuperarla a 60 Hz [3, 14, 15].

Básicamente el diseño de EDCBF se divide en dos etapas [3, 5]:

- Primera etapa o etapa inercial (diseño de bloques de tiro de carga).
- Segunda etapa (Selección del lugar en la red donde se tirará la carga).

En la etapa inercial únicamente se considera la robustez del sistema a través de su inercia y amortiguamiento de carga para diseñar los escenarios de desconexión, mediante los cuales se cambiará la dirección de decaimiento de la frecuencia con la desconexión automática e inmediata de carga. En la segunda etapa se considera la topología de la red para determinar el lugar donde se tirará la carga y los tiempos de retardo de cada escenario [3].

Finalmente el resultado total del tiro de carga se logra con la operación del esquema en combinación con el efecto del gobernador de velocidad y considerando el tipo de generación que se tiene [4, 16].

Sin embargo, el problema principal que se presenta en el diseño de los EDCBF es la determinación de las cantidades apropiadas de carga a desconectar [13, 14, 17]. Esto se debe a las incertidumbres presentes en el momento de la operación del esquema; ya que al desconocer la magnitud de la contingencia que podría presentarse, la cantidad de carga a desconectar se define con base en posibles eventos [3, 7, 14, 16]. De esta manera cuando se suscita un disturbio, puede ser que la mayor parte del balance carga-generación se recupere tras realizar algunas desconexiones; no obstante, depende de la magnitud de la contingencia que el esquema sea completamente funcional o no [14]. Existen muchos casos en que estos esquemas no desconectan la cantidad de carga suficiente para recuperar el balance carga-generación, situación que pone en grave peligro a las turbinas de vapor de los generadores [1, 4]. Por otra parte, se pueden suscitarse casos en los que el programa de tiro de carga desconecta más carga de la necesaria. Esta situación se presenta cuando la diferencia entre la potencia de carga y la potencia de generación es pequeña y la frecuencia alcanza el siguiente nivel de disparo. Lo anterior resulta en un déficit de carga con un exceso de generación provocando un problema de sobretiro de carga que se traduce como una sobrefrecuencia [5, 9]. Cabe destacar que ambos problemas son peligrosos; sin embargo, el caso que más se presenta y que conlleva mayor riesgo es la operación a baja frecuencia [8, 9, 13].

Debido a esta problemática la planeación de un programa de desconexión de carga se vuelve compleja, haciendo que el esquema elegido como “el mejor” para proteger un sistema ofrezca incertidumbres que no se pueden redimir hasta que no se presenta el disturbio y opera el EDCBF. Estas incertidumbres no se pueden determinar directamente ya que dependen de la magnitud del disturbio.

#### **1.4 OBJETIVO**

Desarrollar una metodología para diseñar esquemas estáticos de tiro de carga por baja frecuencia; que utilice lógica difusa para considerar las incertidumbres de las cargas y un sistema aditivo difuso para evaluar una base de reglas que permita inferir el porcentaje de tiro de carga. Con ello se podrá aminorar el problema del ajuste de cargas a desconectar por escenario en el tiro de carga convencional.

#### **1.5 JUSTIFICACIÓN**

El tiro de carga en SEP se diseña para evitar daños al sistema, en especial a las plantas térmicas por operación a baja frecuencia; por ello la respuesta dinámica no debe incursionar en las zonas donde se dañan las turbinas de vapor [1, 4]. Sin embargo, el ajuste de los EDCBF se ve afectado por la incertidumbre de las cargas a desconectar en cada paso.

La lógica difusa es una técnica de inteligencia artificial que facilita la representación de procesos inciertos. Estos procesos afectan a los fenómenos continuos que no se pueden descomponer en segmentos discretos [18]. Los modelos difusos convierten las señales de entrada en representaciones difusas que transforman la salida del proceso en variables de soluciones numéricas precisas [19]. Por otra parte, un sistema aditivo difuso es otra técnica inteligente que permite transferir el conocimiento humano a una base de reglas a través de implicaciones difusas, la cual se evalúa para inferir un resultado difuso y a través del método de defusificación del centroide se obtiene un resultado numérico [20, 21]. Por lo tanto, estas técnicas se pueden combinar para diseñar un sistema de inferencia difuso también conocido como FIS (*“Fuzzy Inference System”* en inglés) y así mejorar el tiro de carga por baja frecuencia; puesto que en un SEP las cargas son inciertas y se pueden representar mediante conjuntos difusos que permiten modelar su incertidumbre [9, 19, 22].

De esta manera el ajuste de los relevadores de tiro de carga se puede adecuar con lógica difusa, ya que muchos de estos son digitales. Logrando así que el esquema de protección contra baja frecuencia desconecte la cantidad de carga más apropiada en cada paso y recupere el valor de frecuencia en el menor tiempo posible [9].

Es necesario que se desarrollen nuevas investigaciones sobre el tiro de carga por baja frecuencia; ya que la desconexión inadecuada de carga puede inducir temporalmente a líneas eléctricas sobrecargadas y a un aumento de tensión [14].

## 1.6 LIMITACIONES Y ALCANCES

En el desarrollo de los esquemas de tiro de carga por baja frecuencia no se consideran:

- Retardos de tiempo en los escenarios de desconexión.
- Retardos de tiempo en los relevadores para su operación.
- Efecto del gobernador de velocidad.
- Modelo del tipo de generación (Tipo de turbina).
- Ubicación de las cargas a desconectar dentro de la red (Modelo de la red de transmisión).

En otras palabras únicamente se considera la primera etapa de diseño; la cual consiste en la parte inercial del problema. Todos los estudios mostrados se hacen en un sistema con un generador único o equivalente; es decir, la inercia de este generador representa la suma de la inercia de todos los generadores del sistema. Así mismo, con el desarrollo de ésta tesis se pretende alcanzar:

- Una metodología para el diseño de esquemas estáticos de tiro de carga por baja frecuencia basada en la operación de un esquema difuso.
- Una metodología para el diseño de esquemas dinámicos de tiro de carga por baja frecuencia mediante un sistema de inferencia difuso.
- Observar el comportamiento de la frecuencia ante pérdidas de generación y desconexión de cargas.
- Aminorar las incertidumbres en el proceso de tiro de carga.
- Obtener las cantidades de carga a desconectar más apropiadas.

## 1.7 ESTADO DEL ARTE

### 1.7.1 Trabajos Desarrollados a Nivel Internacional

Durante los últimos veinticinco años se han implementado diversas técnicas que permiten realizar el tiro de carga mediante sistemas adaptables. Uno de los primeros trabajos sobre este tema se presenta en 1989 por [23], donde se analizan dos EDCBF. El primero es un sistema de frecuencia discreta convencional y el otro es un sistema adaptable basado en la velocidad de cambio de la frecuencia que utiliza un algoritmo

de programación entero-lineal mixto para el tiro de carga óptimo. Se encontró una mayor exactitud con el sistema adaptable; sin embargo, el rendimiento de este esquema se ve limitado por el efecto infeed (fuentes de alimentación intermedias) en la red. Es decir, en varias ocasiones se tuvo un tiro de carga innecesario debido a que el desbalance entre carga y generación no era tan severo debido a grandes infeeds.

Cinco años más tarde, en 1994 [24] propone un EDCBF adaptable para un sistema de potencia aislado mediante relevadores inteligentes. Estos relevadores tienen una base de datos actualizable de los parámetros del sistema vía SCADA (*“Supervisory Control And Data Acquisition”* en inglés). El esquema de protección utiliza la velocidad de post-corte medida y el cambio de la frecuencia para estimar la magnitud de la pérdida de generación; de esta manera puede identificar si un relevador en especial debe operar. Sin embargo, si se llegara a perder el SCADA por un lapso prolongado de tiempo, el tiro de carga se vería afectado.

En 1997, en [25] se presentó un nuevo enfoque para realizar el tiro de carga en forma segura mediante el conocimiento basado en el razonamiento difuso. Este esquema tiene como propósito controlar la inestabilidad de voltaje al ocurrir un disturbio. Sin importar la naturaleza ni la localización de la falla, el programa de tiro de carga indica la cantidad de carga a desconectar en tiempo real. Para el desarrollo de este esquema primero se establecieron los indicadores difusos de los buses de control para posteriormente relacionarlos a las cantidades de carga a desconectar.

Un año después, en [26] se desarrolló un EDCBF para sistemas industriales con instalaciones de cogeneración. El tiro de carga está basado en la metodología de redes neuronales; así para un escenario de post-disturbio se elige la arquitectura de una red neuronal apropiada para realizar el tiro de carga. La capacidad de aprendizaje está determinada para las configuraciones de post-disturbio de la red respecto a la cantidad de carga a tirar. De esta manera cada red neuronal tiene la capacidad de entregar como salida la cantidad de carga a desconectar con base en sus elementos de entrada.

El entrenamiento de estas redes neuronales se hace a través de la simulación de cada escenario con diferentes niveles de desbalance de carga-generación. De esta manera, el principal inconveniente de esta metodología es que la cantidad de carga a desconectar se determina por un criterio dinámico y por sobrecargas previstas.

En 2002, en [27] se presenta una aplicación de un sistema experto difuso en sistemas de potencia. La finalidad es controlar la inestabilidad de voltaje utilizando el tiro de carga combinado con una técnica difusa. Una aportación de esta técnica es que se puede aplicar en sistemas de gran potencia para minimizar los picos de carga y evitar el colapso de tensión. El controlador difuso permite que los buses afectados vuelvan a sus límites seguros de operación haciendo que el sistema sea nuevamente estable.

En ese mismo año, en [28] se emplea una red neuronal para hacer el tiro de carga por baja frecuencia en forma adaptable. La red neuronal se entrena mediante el algoritmo de aprendizaje supervisado de retropropagación; de esta forma determina la cantidad de carga a desconectar con base en la condición de la frecuencia. En este trabajo se encontró que el rendimiento de la red depende de su topología y del proceso de aprendizaje. Así mismo no se considera el efecto del gobernador y se asume que hay sólo una fuente de generación.

A finales de 2002, [29] muestra un procedimiento de tiro de carga por baja frecuencia para la protección de SEP ante inestabilidad de voltaje y colapso de frecuencia. Este procedimiento se divide en dos escenarios; en el primero se estima la frecuencia y su velocidad de cambio mediante el algoritmo no recursivo de Newton utilizando la expresión simple de la ecuación de oscilación; y en el segundo escenario se obtiene la magnitud del disturbio. Con ello, el programa de tiro de carga se adapta a la magnitud estimada para obtener un sistema más eficiente en condición de emergencia. El análisis se realizó en un sistema de prueba de diez máquinas.

En 2005 [30] presenta una combinación de las aportaciones de [24] y [26] al realizar un tiro de carga inteligente para industrias de gran capacidad, a través de relevadores comunicados con un servidor. En primera instancia, se hace una base de datos de las acciones que debe tomar el esquema remedial a partir de simulaciones de disturbios presentados con anterioridad. Posteriormente los relevadores se conectan de las subestaciones al servidor y a través de PLC (*“Programmable Logic Controller”* en inglés) envían las señales de disparo a los interruptores de potencia.

Constantemente se monitorean todas las condiciones de operación del sistema, de modo que la base de datos se está actualizando de igual manera y por tanto es capaz de indicar la topología de la red, información de las conexiones y las propiedades del sistema de protección. Posteriormente los mismos autores publicaron [31], donde se hace una recopilación de [30] y se detallan las necesidades y requerimientos para tener un tiro de carga inteligente, rápido y óptimo. Así mismo, se explica el impacto que tienen los gobernadores de velocidad, las turbinas y los primo-motores en el comportamiento de la frecuencia ante disturbios de gran tamaño.

Durante el año 2005 [32] realizó un diseño de esquema adaptable de tiro de carga por baja frecuencia con redes neuronales. El conjunto de datos de entrenamiento para la red neuronal fue tomado de un análisis de estabilidad transitoria de un sistema de potencia real. Para ello, se analizaron varios escenarios de contingencia sin considerar la pérdida de alguna unidad de generación. El aprendizaje de la red neuronal de retroalimentación, se realizó mediante una adaptación del algoritmo de Levenberg-Marquardt y el algoritmo de retropropagación.

Los elementos del SEP que funcionan como neuronas de entrada son la potencia total de generación, la potencia total de demanda y la velocidad de decaimiento de la frecuencia. Con ello la red neuronal determina la cantidad de carga mínima a desconectar que mantenga la estabilidad del SEP.

En 2006 el autor de [29] publica [33]; este trabajo es una extensión de [29] en el que se analiza el comportamiento del esquema adaptable de tiro de carga por baja frecuencia en un sistema de tres máquinas y en un sistema de diez máquinas, con lo cual se obtiene un enfoque de protección eficaz contra baja frecuencia.

Dos años más tarde en 2008 como una continuación de su línea de investigación, los mismos autores publicaron [34]. En este trabajo se presenta un EDCBF adaptable basado en una red neuronal para sistemas industriales con cogeneración. Este esquema se basa en lo mismo que [32] pero está aplicado a un sistema industrial.

En ese mismo año, en [35] se desarrolló un método de tiro de carga adaptable utilizando un algoritmo genético, con el fin de automatizar la forma de encontrar los parámetros para la configuración de los relevadores de baja frecuencia y minimizar los cálculos. Las simulaciones demostraron que los esquemas operados con estas configuraciones tienen mejor desempeño que los esquemas convencionales y los tiempos de simulación se redujeron en gran medida.

Paralelamente en [36] se presenta un método para diseñar EDCBF adaptables mediante la estimación de disturbios y el modelo SFR-UFLS (*"System Frequency Response-Under Frequency Load Shedding"* en inglés). El SFR es un modelo que describe aproximadamente el promedio de la respuesta de la frecuencia de carga en un sistema de potencia aislado durante el desbalance de carga-generación. De aquí que el SFR-UFLS está compuesto por los parámetros del SFR y de los criterios del UFLS. Para desarrollar este método primero se realiza la estimación del disturbio y se identifica el desbalance de potencia activa para usarlo como entrada en el modelo SFR-UFLS. Este modelo aplica un algoritmo de optimización, lo que hace más eficiente y óptimo el tiro de carga.

Ya en 2011, [37] muestra una estrategia para el tiro de carga difuso en redes de distribución, considerando el efecto de las incertidumbres en fuentes de generación y en cargas. El objetivo es minimizar la cantidad de cargas sin servicio durante una contingencia. Las incertidumbres son modeladas con números difusos; por tanto, se presenta un problema difuso que se resuelve con programación no lineal, F-MINLP (*"Fuzzy Mixed Non-Linear Programming"* en inglés). Esta situación conduce a que el ajuste para el tiro de carga se realice por medio de un algoritmo genético. La simulación de este método mostró que el tiro de carga se hace por prioridad de cargas, así como el mejoramiento en la continuidad del servicio en sistemas de distribución.

En 2012 [38] hace una aplicación del tiro de carga difuso fuera de los SEP; sin embargo, es importante mencionarlo ya que se utiliza para evitar sobrecargas en sistemas de manejo de flujo de datos. Este tipo de sistemas procesan información en forma masiva y su explotación tiende a sobrecargarlos; de tal modo que para evitar esta situación se diseñó un esquema de tiro de carga con control difuso. El enfoque que aquí se trata es muy efectivo porque maneja las incertidumbres del sistema e informa al operador de las cargas más factibles a tirar, siendo éste quien toma la decisión final.

En ese mismo año, [39] presenta otro enfoque para realizar el tiro de carga por baja frecuencia en sistemas de potencia aislados con generación eólica y a base de diésel mediante programación no lineal. Para la desconexión de carga se emplea un algoritmo genético que minimiza la cantidad de carga a tirar en cada paso. El algoritmo genético utiliza los cromosomas y funciones de penalización que presentan grandes variaciones para determinar el tiro de carga óptimo en cada paso del EDCBF. Así mismo las incertidumbres de los buses de carga se modelan con conjuntos difusos. Otra novedad que presenta este método es que puede aplicarse para reducción de armónicas ayudando a minimizar el costo de filtros y la distorsión de voltaje que esté sujeta a la armónica estándar.

Por otra parte, en forma paralela [40] hace un EDCBF inteligente para redes de distribución aisladas. Este esquema se implementó en una pequeña planta hidroeléctrica que opera en forma aislada. El tiro de carga se hace mediante un controlador difuso que estima la cantidad adecuada de carga a desconectar del sistema por medio del valor de la frecuencia y su velocidad de cambio.

En 2013, en [41] se presenta una estrategia para el tiro de carga mediante lógica difusa a través de la instalación de un controlador difuso en cada bus de generación del sistema. El objetivo es mantener la estabilidad de voltaje y frecuencia en la red utilizando la potencia real y reactiva. Esto se realizó en dos marcos de referencia: un marco síncrono positivo y un marco síncrono negativo. El controlador estima en tiempo real la potencia entregada por los generadores y la compara con valores de referencia evaluados en condiciones normales de operación para determinar la cantidad de carga a desconectar.

Finalmente a mediados de 2013 se publicó [42]. Este trabajo ofrece un esquema de tiro de carga adaptable que combina las características del tiro de carga por baja frecuencia con las características del tiro de carga por bajo voltaje. La obtención de un esquema que adopta ambos temas se logra a través de unidades de medición fasorial. Este esquema determina la cantidad de carga a desconectar necesaria para ambos problemas. Otra aportación es que se considera el efecto de la potencia reactiva.

### **1.7.2 Trabajos Desarrollados en la S.E.P.I.-E.S.I.M.E.**

A continuación se mencionan algunos trabajos desarrollados en la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (S.E.P.I.-E.S.I.M.E.) que están ligados con la utilización de esquemas de tiro de carga. Aunque en estos trabajos no se desarrollaron esquemas adaptables, se presenta la utilización de esquemas de tiro de carga por baja frecuencia y por bajo voltaje, así como el comportamiento del sistema ante la operación de éstos.

En [43] en 2012 se propone un esquema de tiro de carga por bajo voltaje también conocido como UVLS ("*Under Voltage Load Shedding*" en inglés), que está enfocado a la supervisión de los límites permisibles de voltaje en redes eléctricas donde predominan motores de inducción. Este esquema toma acciones correctivas para evitar que el sistema llegue a un colapso de voltaje, empleando controles en los nodos de la red para monitorear la magnitud de voltaje y potencia real de forma local. Además se evalúa la condición de post-disturbio; y en los casos donde el voltaje no se mantiene por arriba del umbral, el esquema actúa tantas veces sea necesario.

En 2013 [44] propone una metodología que ayuda en el desempeño de los esquemas de protección contra baja frecuencia de una red de distribución operando en condición de isla con incorporación de generación síncrona y asíncrona. En este trabajo se hace uso de los esquemas de tiro de carga por baja frecuencia para ayudar a recuperar los valores de voltaje y frecuencia; y así mantener la estabilidad y operación de un sistema aislado.

### **1.8 APORTACIONES**

Las principales aportaciones de ésta tesis son:

- Aplicación de la lógica difusa y de un sistema aditivo difuso para diseñar un sistema de inferencia difuso.
- Elaboración de una metodología para diseñar esquemas dinámicos de tiro de carga por baja frecuencia utilizando un sistema de inferencia difuso.
- Elaboración de una metodología para diseñar esquemas estáticos de tiro de carga por baja frecuencia a partir de un esquema dinámico de tipo difuso.
- Desarrollo de un programa computacional en FORTRAN 90 para realizar el tiro de carga por baja frecuencia con esquemas estáticos en SEP.
- Desarrollo de un programa computacional en FORTRAN 90 para diseñar un sistema de inferencia difuso.
- Desarrollo de un programa computacional en FORTRAN 90 para realizar el tiro de carga por baja frecuencia con esquemas dinámicos de tipo difuso en SEP.

## 1.9 PUBLICACIONES DERIVADAS DE LA TESIS

1. Jesús Sánchez Cortés y David Romero Romero, “Diseño de Esquemas de Tiro de Carga por Baja Frecuencia Utilizando una Técnica Inteligente, Parte I: Teoría”, *Séptimo Congreso Internacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas (VII CIIES 2014)*, 27 al 31 de Octubre de 2014, México D.F., México.
2. Jesús Sánchez Cortés y David Romero Romero, “Diseño de Esquemas de Tiro de Carga por Baja Frecuencia Utilizando una Técnica Inteligente, Parte II: Aplicación”, *Séptimo Congreso Internacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas (VII CIIES 2014)*, 27 al 31 de Octubre de 2014, México D.F., México.
3. Jesús Sánchez Cortés y David Romero Romero, “Esquemas Dinámicos de Tiro de Carga por Baja Frecuencia Mediante Lógica Difusa”, *Vigesimoséptima Reunión Internacional de Verano de Potencia, Aplicaciones Industriales y Exposición Industrial (XXVII RVP-AI/2014)*, 20 al 26 de Julio de 2014, Centro Internacional Acapulco Guerrero, México.
4. Jesús Sánchez Cortés y David Romero Romero, “Bases para el Diseño de Esquemas de Tiro de Carga por Baja Frecuencia Mediante Lógica Difusa”, *Decimocuarto Congreso Nacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas (XIV CNIES 2013)*, 11 al 15 de Noviembre de 2013, México D.F., México.

## 1.10 ESTRUCTURA DE LA TESIS

**Capítulo 1.** Este capítulo trata de la estructura general de la tesis, se establece el planteamiento del problema que da fundamento a la realización de este trabajo. En el objetivo y la justificación se expresan las razones que crearon el interés para desarrollar el tema. También se hace una revisión bibliográfica acerca de los trabajos relacionados con el tiro de carga inteligente y se delimita la tesis; así mismo, se enuncian las aportaciones derivadas de la misma.

**Capítulo 2.** En este capítulo se explica cómo se lleva a cabo el tiro de carga por baja frecuencia de manera convencional, así como la parte del sistema de potencia que se encarga de realizar esta acción remedial. Se describen los principales problemas que se presentan en las turbinas de vapor debido a la operación por bajas frecuencias y se marcan los límites de tiempo-frecuencia para la correcta operación de éstas. Se detallan los criterios actuales para el diseño de los esquemas de desconexión de carga y se hace un análisis del comportamiento de la frecuencia cuando los pares de carga y generación son constantes y cuando éstos son variables respecto de la frecuencia.

**Capítulo 3.** En este capítulo se muestra la lógica de operación de los esquemas estáticos de tiro de carga diseñados a través de una metodología convencional y se da un ejemplo de la operación de éstos. Por otra parte se hace la propuesta de un sistema de inferencia difuso compuesto por la aplicación de lógica difusa y de un sistema aditivo difuso como metodología de diseño de esquemas dinámicos; mediante la cual es posible interpretar las incertidumbres en el tiro de carga. De esta manera se puede determinar la cantidad de carga a desconectar más apropiada para la contingencia en curso. Del mismo modo, se muestra la lógica de operación de un programa de tiro de carga que incluye este sistema difuso como esquema dinámico y se da un ejemplo de su operación. Finalmente se propone una metodología para el diseño de esquemas estáticos a partir de la operación del esquema difuso.

**Capítulo 4.** En este capítulo se realizan todas las pruebas necesarias de la tesis. Se determina el mejor criterio de desconexión de carga y con base en él, se desarrollan diferentes esquemas estáticos convencionales. A través de un profundo análisis de su operación y tendencia de sobretiro de carga se selecciona el esquema que brinda una mejor operación ante diversas contingencias. Posteriormente se prueban dos esquemas difusos (uno de tres funciones de membresía y otro de cinco funciones de membresía de entrada) para determinar cuál brinda una mejor operación con base en el mismo análisis empleado para los esquemas convencionales. Una vez obtenido un esquema difuso que opere apropiadamente para cada contingencia que se desee analizar; es decir, una vez que la base de reglas y las funciones de membresía de entrada y salida se han sintonizado correctamente, se diseña un esquema estático cuyas cargas a desconectar en cada escenario son determinadas por el esquema difuso. La operación de este nuevo esquema se analiza y se compara contra el resto de los esquemas estáticos convencionales.

**Capítulo 5.** En este capítulo se expresan las conclusiones a las que se llegaron a través del análisis de la operación de los esquemas estudiados en el capítulo 4. También se realizan recomendaciones para trabajos futuros y se detallan las aportaciones obtenidas con el desarrollo de la tesis.

**Apéndice A.** En este apéndice se puntualiza el desarrollo matemático de la ecuación diferencial de primer orden que modela el comportamiento de la frecuencia respecto al tiempo presentada en el capítulo 2.

**Apéndice B.** En este apéndice se describe toda la teoría necesaria para entender las dos técnicas de inteligencia artificial empleadas; y así poder diseñar un sistema de inferencia difuso.

**Apéndice C.** En este apéndice se muestra el proceso para la sintonización de las funciones de membresía de entrada y salida, así como de la base de reglas de los esquemas difusos presentados en el capítulo 4. Se detallan todas las simulaciones de los esquemas difusos desde el primer diseño hasta la obtención de los esquemas mostrados en el capítulo 4.

**Apéndice D.** En este apéndice se detalla toda la codificación de los programas realizados en FORTRAN 90. Así mismo se muestra un ejemplo de ejecución de cada programa.



# CAPÍTULO 2:

## TIRO DE CARGA POR BAJA FRECUENCIA

### 2.1 INTRODUCCIÓN

En éste capítulo se explica cómo surge la necesidad de utilizar los esquemas de desconexión de carga por baja frecuencia. Se exponen los tipos de contingencias que ponen en riesgo a un SEP a causa de la rápida disminución de la frecuencia, así como el daño que se puede provocar en las turbinas de vapor si son operadas en frecuencias anormales. Además, se enuncian los diferentes tipos de esquemas existentes y su principio de operación. Se muestran recomendaciones y una metodología para el diseño de un programa de desconexión de carga por baja frecuencia en forma convencional.

### 2.2 BALANCE ENTRE POTENCIA DE GENERACIÓN Y POTENCIA DE DEMANDA Y SU EFECTO EN LA FRECUENCIA DEL SISTEMA

La dinámica de un SEP es impredecible debido a que la carga varía ampliamente a lo largo del día y dependiendo de las estaciones del año. Un SEP debe ser confiable y debe tener la capacidad de satisfacer la potencia demandada por los usuarios sin importar el momento ni las inclemencias ambientales. Debido a que la electricidad no se puede almacenar, se debe generar en el momento que es requerida. Esta situación da origen al control de SEP, ya que las centrales eléctricas deben entregar diferentes niveles de potencia a lo largo del día y soportar las variaciones de carga [15]. Los cambios de carga que sufre un SEP se ven reflejados como variaciones de frecuencia; esto se debe a que la frecuencia depende de la potencia activa y a su vez es un factor común en el sistema [8]. La frecuencia debe permanecer en su valor nominal que es de 60 Hz en México o en un ancho de banda de  $\pm 0.2$  Hz [6, 12]. Así mismo, ésta se mantiene en su valor nominal cuando existe un balance entre la potencia demandada y la potencia generada, es por eso que si existe un cambio de carga o de generación, el balance se pierde y la frecuencia comienza a variar [8, 13, 14, 45].

Cuando ocurre un cambio en la carga, la frecuencia varía provocando una disminución o aumento en la velocidad de los generadores. Este fenómeno no afecta al par de la turbina y por lo tanto se presenta un pequeño desbalance entre el par mecánico y el par eléctrico que puede causar daños irreparables en la turbina y en la flecha del generador [3, 8, 46, 47]. De este modo, cuando se tiene un exceso de carga respecto de la generación disponible, la frecuencia comienza a disminuir en proporción al desbalance entre el par de generación y el par de carga [1, 5, 7]. Las centrales eléctricas, en especial las térmicas son altamente sensibles a las variaciones de frecuencia; razón por la cual los controles de los generadores deben mantener la operación adecuada de éstos mediante la regulación de velocidad del rotor y la regulación de voltaje en las terminales del generador [11, 13, 45].

Aun cuando los generadores representan aproximadamente el 5% de los elementos de un sistema de potencia, son éstos los más importantes en una red eléctrica ya que de no haber generación el sistema no podría funcionar. Los buses donde existe generación se pueden controlar; para ello, cada generador está equipado con dos lazos de control automático retroalimentados que operan en forma independiente. El control que permite la regulación de la velocidad se denomina Control Automático de Carga-Frecuencia o ALFC (*“Automatic Load-Frequency Control”* en inglés) y el control que regula el voltaje en las terminales del generador es denominado Regulador Automático de Voltaje o AVR (*“Automatic Voltage Regulator”* en inglés) [15].

Cuando ocurre un disturbio que provoca la disminución de frecuencia y no es controlado, las plantas eléctricas pueden salir completamente de operación disparándose en cascada. Además pueden dañarse severamente las turbinas de vapor, los generadores y los transformadores elevadores [13].

## **2.3 CONTROL AUTOMÁTICO DE GENERACIÓN**

Uno de los problemas más importantes de control en un SEP en cuanto a diseño y operación es el control de la frecuencia, debido a que constantemente el sistema se encuentra creciendo, cambiando su estructura y con ello generando nuevas incertidumbres [14]. El Control Automático de Generación o AGC (*“Automatic Generation Control”* en inglés) es un proceso de control que se encuentra operando en todo momento para mantener el balance entre generación y carga a un bajo costo. Es por ello, que este control se encarga de la regulación de la frecuencia y del intercambio de potencia valiéndose del despacho económico [48].

El Control Automático de Generación está conformado por el Control Automático de Carga-Frecuencia, el cual mantiene un nivel de frecuencia constante mediante la manipulación de la potencia activa de salida del generador; además comprende la

técnica de despacho económico para realizar la distribución de carga en forma óptima de acuerdo con la asignación de recursos de generación [8, 48]. Así entonces, el AGC tiene tres objetivos principales [17, 46]:

- Mantener la frecuencia en su valor nominal.
- Mantener el intercambio neto de potencia activa entre áreas de control en un valor deseado.
- Repartir la carga entre los generadores para optimizar costos de operación.

El Control Automático de Carga-Frecuencia está formado por un lazo de control primario y un lazo de control secundario, ambos se muestran en la Figura 2.1 dentro del recuadro segmentado en color rojo. El lazo de control primario es la primera acción de control que se toma sobre la frecuencia ante una variación de carga. Se inicia con la retroalimentación de la señal de velocidad hacia el gobernador y como resultado, se ajusta la potencia de la turbina en respuesta al cambio de velocidad (frecuencia) lo más rápido posible. La frecuencia puede caer y ser recuperada alrededor de 3 Hz con poca exactitud; el tiempo de respuesta se refleja en el comportamiento de la frecuencia de los 2 a los 20 segundos y está limitado por la inercia de la turbina y del sistema de potencia [8, 15, 17]. El lazo de control secundario tiene efecto sobre la frecuencia después de que el lazo de control primario operó. Este lazo de control cambia la potencia de referencia de los generadores para reajustar la frecuencia mediante un control integral y eliminar completamente cualquier error en su valor respecto del valor nominal; su operación es muy lenta y se comienza a notar después de varios minutos [3, 8, 15].

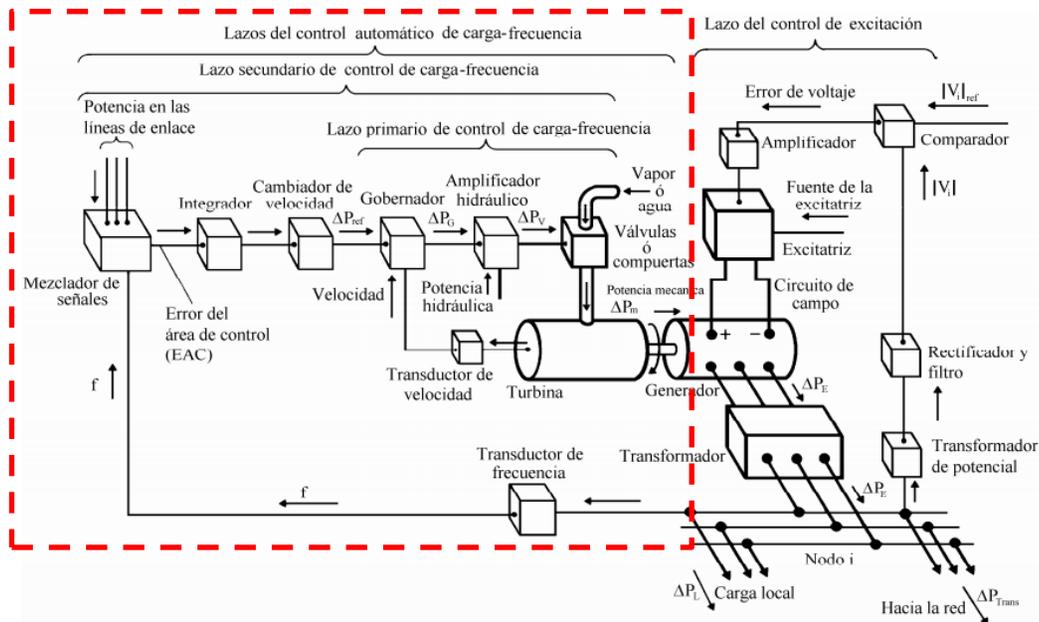


Figura 2.1 Lazos de Control Automático de Carga-Frecuencia [Adaptado de 15].

Los lazos de Control Automático de Carga-Frecuencia únicamente pueden regular la frecuencia en cambios pequeños y lentos de carga. Por otra parte, si se trata de un disturbio de pérdida de generación, este control no puede recuperar la frecuencia ya que ésta disminuye súbitamente con una razón de cambio mayor, de tal modo que el sistema habrá colapsado antes de que se alcancen los efectos de estos lazos de control ocasionando daños en las turbinas. Para ello es necesario emplear los esquemas remediales de tiro de carga por baja frecuencia [15].

## **2.4 PROTECCIÓN DE LAS TURBINAS DE VAPOR CONTRA BAJA FRECUENCIA**

Debido a que las turbinas de vapor son altamente sensibles a las variaciones de frecuencia, la protección de estos equipos busca resguardarlos contra daños severos provocados por operación a bajas o altas frecuencias durante periodos prolongados de tiempo y a la vez evitar un colapso o separación del sistema [1, 7].

Para proteger a las turbinas de vapor se utilizan los programas de tiro de carga por baja frecuencia; los cuales deben desconectar la cantidad de carga apropiada para recuperar la frecuencia del sistema a un valor suficientemente cercano al nominal. Sin embargo, en la práctica no es posible recuperar por completo el balance entre potencia generada y potencia demandada mediante los disparos de carga; ya que se desconoce la magnitud del disturbio que se puede presentar, así como la magnitud y distribución de las cargas del sistema. Por esta razón es prácticamente inevitable tener sobretiros de carga o déficit de tiro de carga durante la operación del esquema [5, 7].

El programa de tiro de carga en combinación con la acción del gobernador de velocidad permite obtener una frecuencia adecuada en la mayoría de las contingencias. Es decir, en los casos que se tiene un exceso de tiro de carga se presenta una sobrefrecuencia, misma que se puede reducir a 60 Hz siempre que no exceda los 61 Hz en el momento que se comienza a apreciar la acción del gobernador de velocidad; la cual típicamente se presenta entre 10 segundos y 12 segundos de ocurrido el disturbio. Por otra parte, en los casos en que la frecuencia queda en valores bajos (menores a 60 Hz y superiores a 59 Hz), el gobernador de velocidad recupera la frecuencia a su valor nominal. De estos dos problemas que se pueden suscitar durante la operación de los esquemas de tiro de carga, el déficit de desconexión de carga es el problema más riesgoso debido a la sensibilidad de las turbinas de vapor [4, 8, 13].

Las turbinas de vapor están compuestas por diversos bloques con varias filas de álabes de diferentes longitudes. Cada bloque de álabes tiene sus propias características de diseño con el fin de que cada uno sea impulsado por la cantidad necesaria de vapor a diferentes presiones. Por tal motivo cada bloque de álabes

presenta distintas frecuencias de resonancia mecánica; de esta manera si la cantidad de vapor que entra en la turbina no es la adecuada, los álabes se pueden deformar dando como consecuencia una rotación no deseada de la turbina y daños permanentes en la misma [7, 11]. Una turbina de vapor debe diseñarse cuidadosamente para evitar vibraciones y exceso de estrés [7].

Cuando se hace operar una turbina de vapor a frecuencias bajas o a frecuencias cercanas a las de resonancia, la turbina recibe y acumula cierto nivel de daño; es decir, el estrés en la turbina crece en forma exponencial [1, 7, 11]. Este efecto se aprecia en la Figura 2.2 a); donde A, B y C son los niveles de estrés, mismos que no causan ningún daño a la turbina cuando ésta trabaja en frecuencias permitidas. Por otra parte, se puede observar cómo aumenta el estrés en la turbina cuando se hace trabajar en frecuencias fuera de su región continua de operación; ya sea en baja frecuencia o sobrefrecuencia el daño en la turbina es acumulativo.

La Figura 2.2 b) muestra una curva típica de resistencia a la fatiga de los bloques de álabes de la turbina; donde A, B y C son los mismos niveles de estrés marcados en la Figura 2.2 a). Se puede observar que se obtiene una operación segura (sin daños) para amplitudes de estrés menores al nivel A. La operación de la turbina en el nivel de estrés B puede producir una falla en 10000 ciclos de vibración y para la operación en el nivel de estrés C la falla puede presentarse en 1000 ciclos de vibración [7].

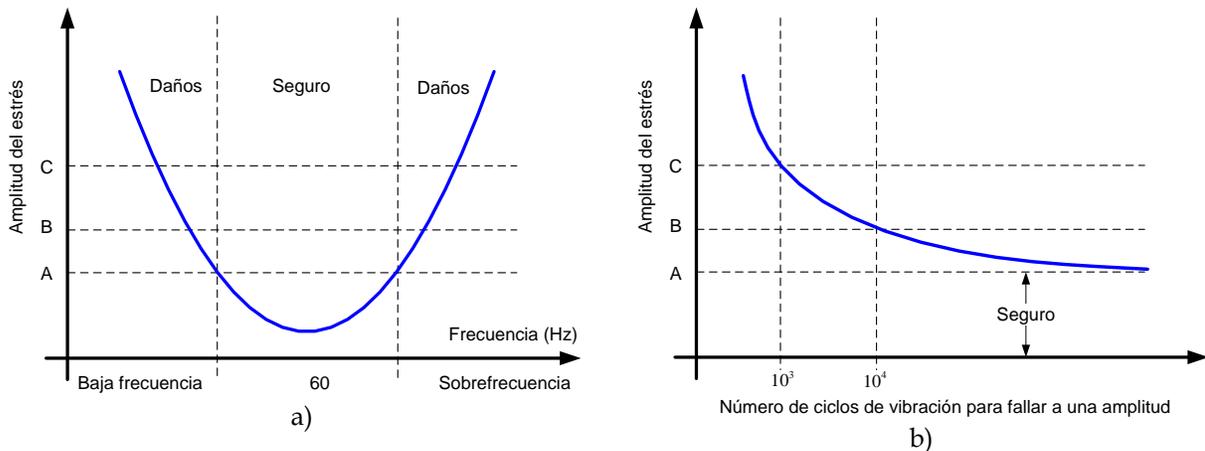


Figura 2.2 a) Incremento del estrés en la turbina debido a la operación en frecuencias anormales,  
 b) Curva típica de resistencia a la fatiga de los álabes de una turbina de vapor [7].

De acuerdo a un profundo estudio de vibraciones de frecuencia para diferentes bloques de álabes en turbinas de vapor, se recomiendan los límites de tiempo que se muestran en la Figura 2.3 para la operación a frecuencias anormales. Estos límites indican el tiempo mínimo estimado para la ruptura de los álabes más vulnerables de la turbina tanto para el caso de operación a baja frecuencia como el de operación a sobrefrecuencia.

Se puede notar que si la frecuencia se desvía en un 5% o más, los tiempos de operación son muy cortos. Por lo tanto, se observa que es posible la operación por 1 segundo a 56.5 Hz. Así mismo, se puede tener una operación sin daños a 59.4 Hz o a 60.6 Hz, lo que indica que un 1% de variación en la frecuencia nominal no afecta la vida útil de la turbina de vapor [4, 7].

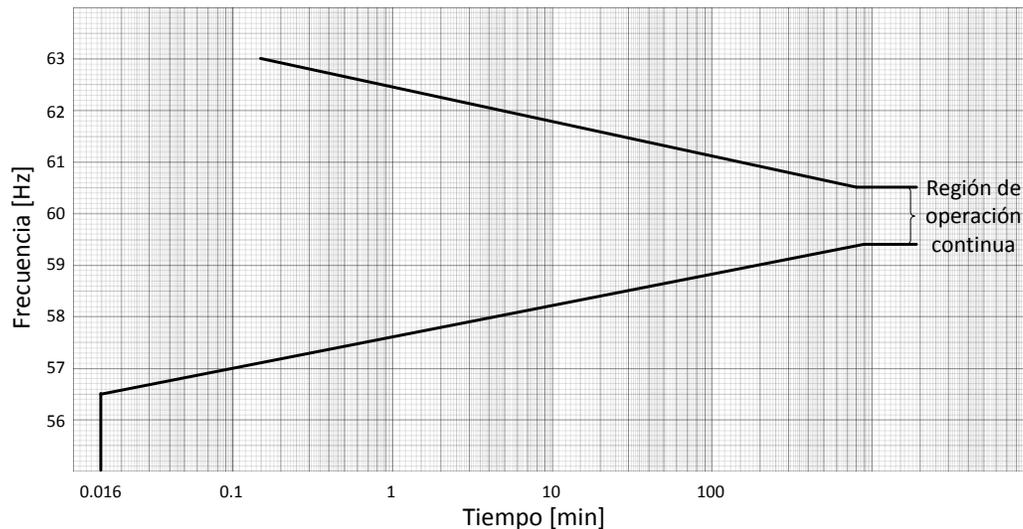


Figura 2.3 Límites de frecuencia para la operación de una turbina de vapor [7].

## 2.5 COMPORTAMIENTO DE LA FRECUENCIA EN SEP

La frecuencia del sistema tiene un comportamiento característico cuando se presenta un desbalance entre el par de carga y el par de generación. A continuación se analiza el comportamiento típico de la frecuencia considerando pares de generación y carga constantes y variables; en un estudio con un generador que representa a todos los generadores de un sistema.

### 2.5.1 Comportamiento de la Frecuencia con Pares de Carga y de Generación Constantes

La relación que define la variación de la frecuencia respecto al tiempo después de una pérdida súbita de generación se obtiene de la ecuación de movimiento de una máquina rotatoria [4, 7, 49].

$$\frac{H}{\pi f_0} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = T_G - T_L = T_a \quad (2.1)$$

Donde

- $H$  Constante de inercia del generador [s].
- $f_0$  Frecuencia base (60 Hz).
- $\delta$  Ángulo de desplazamiento eléctrico [°].
- $T_G$  Par mecánico [pu].
- $T_L$  Par eléctrico en la base de  $T_G$  [pu].
- $T_a$  Par de aceleración de la red [pu].

La velocidad de la máquina está dada por:

$$\frac{d\delta}{dt} + \omega_0 = 2\pi f \quad (2.2)$$

Donde:

- $\omega_0$  Velocidad síncrona [rad/s].
- $f$  Frecuencia real [Hz].
- $\delta$  Ángulo de desplazamiento eléctrico [°].

Derivando la ecuación (2.2) se tiene:

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = 2\pi \frac{df}{dt} \quad (2.3)$$

Sustituyendo (2.3) en (2.1) se obtiene:

$$\frac{2H}{f_0} \frac{df}{dt} = T_G - T_L = T_a \quad (2.4)$$

Despejando la velocidad de cambio de la frecuencia:

$$\frac{df}{dt} = \frac{(T_G - T_L)f_0}{2H} = \frac{T_a f_0}{2H} \quad (2.5)$$

Donde:

$\frac{df}{dt}$  Velocidad de cambio de la frecuencia  $\left[\frac{Hz}{s}\right]$ .

$H$  Constante de inercia del sistema. (Suma de las constantes de inercia de las máquinas que permanecen conectadas en la base de la generación restante del sistema) [s].

$T_G$  Par de generación restante del sistema [pu].

$T_L$  Par de la carga en la base de la generación restante del sistema [pu].

$T_a$  Par de aceleración de la red [pu].

Así mismo:

$$T_a = \begin{cases} \text{positiva y en aceleración} & ; T_G > T_L \\ \text{negativa y en desaceleración} & ; T_G < T_L \end{cases}$$

No es posible determinar en forma analítica las oscilaciones de frecuencia durante un disturbio; éstas se pueden obtener mediante estudios de computadora. Sin embargo, es posible determinar con buena exactitud la velocidad promedio con que decae la frecuencia para diferentes niveles de pérdida de generación [7]. La expresión (2.5) se puede utilizar para obtener la frecuencia del sistema cuando hay un cambio súbito en la generación, mientras que los pares de generación y de carga se mantienen constantes. Esta ecuación representa una línea recta comenzando en  $t = 0$  s y  $f = 60$  Hz con una pendiente igual a  $\frac{T_a f_0}{2H}$  como se muestra en la Figura 2.4.

La pérdida de generación es vista como una sobrecarga de mayor magnitud. Así entonces, de acuerdo con (2.5) un esquema remedial que desconecta una cantidad de carga igual al nivel de sobrecarga, provoca que el par de aceleración del sistema se vuelva cero y por lo tanto la velocidad de cambio de la frecuencia también es cero. Esta situación da como resultado que la frecuencia se mantenga constante al nivel en el que se encontraba al momento de la desconexión de carga.

Por otra parte si el esquema desconecta más carga que el nivel de sobrecarga, la frecuencia comienza a recuperarse debido a que el par de aceleración se vuelve positivo; es decir, se cuenta con generación suficiente para alimentar a las cargas restantes y regresar la frecuencia a un nivel adecuado de operación. En caso contrario, si el esquema desconecta menos carga que el nivel de sobrecarga, la frecuencia sigue disminuyendo con una razón de cambio diferente. Estos casos se ilustran en la Figura 2.5.

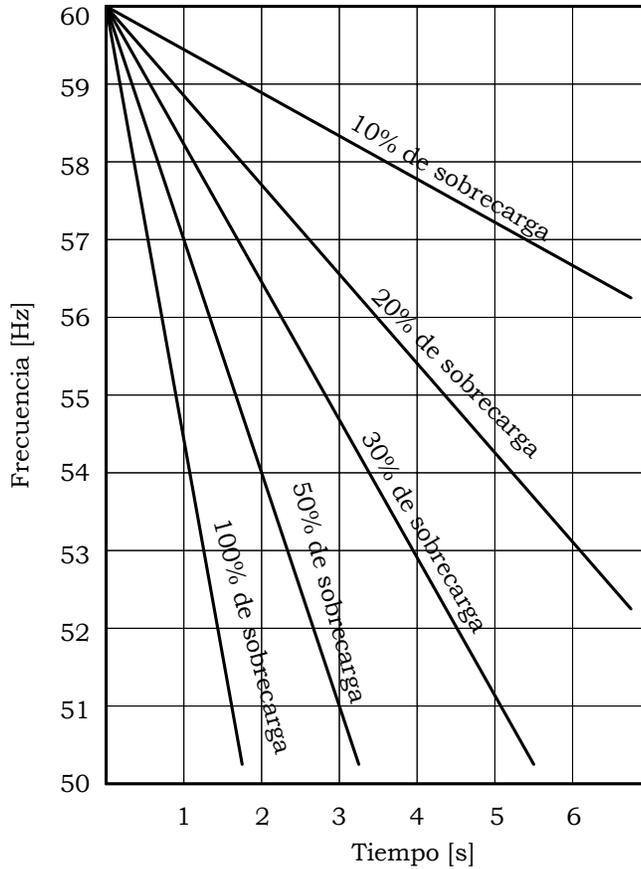


Figura 2.4 Comportamiento característico de la frecuencia para diferentes niveles de sobrecarga con pares de generación y carga constantes [7].

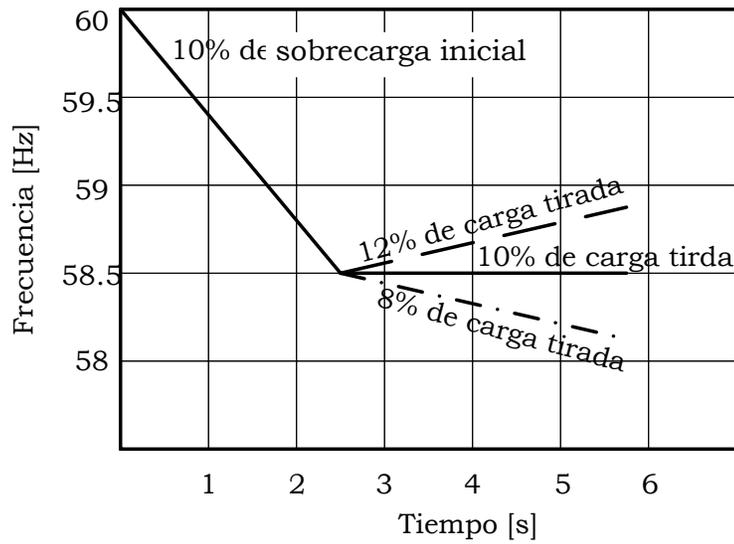


Figura 2.5 Comportamiento de la frecuencia ante diferentes niveles de carga desconectada para una misma contingencia [7].

En la Figura 2.6 se muestra la operación de un esquema que desconecta una cantidad de carga menor al valor de sobrecarga del sistema; debido a ello, el esquema realiza más disparos hasta que el par de aceleración de la red se vuelve positivo. En este caso se puede apreciar el cambio de velocidad de decaimiento de la frecuencia después de cada disparo de carga.

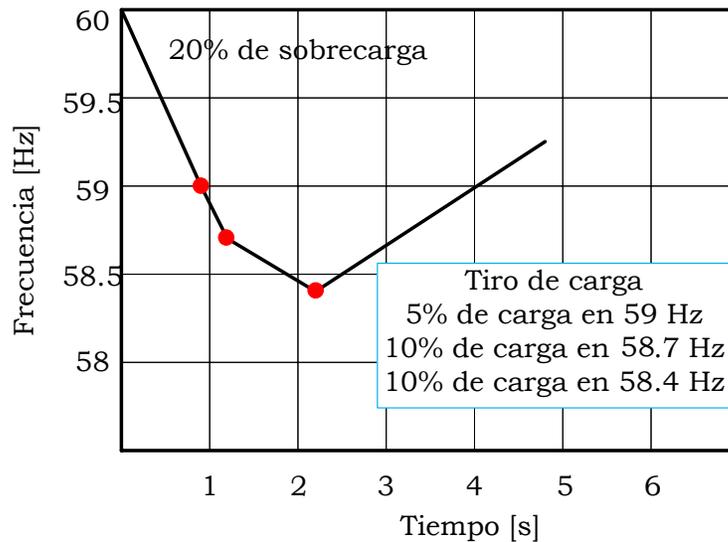


Figura 2.6 Efecto de tiro de carga en diferentes pasos con pares de generación y carga constantes.

## 2.5.2 Comportamiento de la Frecuencia con Pares de Carga y de Generación Variables

Cuando hay pérdida de generación en un sistema real, los pares de generación y carga varían con la frecuencia; esto provoca que la velocidad de decaimiento de la frecuencia disminuya. Debido a esta variación en los pares la frecuencia se va amortiguando, en lugar de presentar un comportamiento lineal como en el caso en que los pares se mantienen constantes [7].

De acuerdo con la ecuación (2.1) el par de aceleración del sistema se define como la diferencia entre el par de generación y el par de carga, por lo que un cambio en la frecuencia afecta a ambos pares.

### 2.5.2.1 Variación del Par de Carga

El par de carga varía en función de la frecuencia del sistema a través de la potencia de carga como se muestra en la ecuación (2.6).

$$P_L = kf^{D_L} \quad (2.6)$$

Donde:

- $P_L$  Potencia de carga [pu].
- $k$  Constante.
- $f$  Frecuencia [Hz].
- $D_L$  Factor de amortiguamiento de carga.

Si se divide la potencia de carga entre la frecuencia del sistema se obtiene el par de carga en por unidad; por lo tanto:

$$T_L = \frac{P_L}{f} = \frac{kf^{D_L}}{f} = kf^{D_L-1} \quad (2.7)$$

La variación del par de carga ante variaciones de frecuencia puede obtenerse a partir de la derivada de la ecuación (2.7) respecto a la frecuencia.

$$\frac{dT_L}{df} = (D_L - 1)kf^{D_L-2} \quad (2.8)$$

Por tanto el incremento del par de carga es:

$$\Delta T_L = (D_L - 1)kf^{D_L-2}\Delta f \quad (2.9)$$

De (2.7) y (2.9) se puede calcular el nuevo par de carga:

$$T_{L_{i+1}} = T_{L_i} + \Delta T_L = kf^{D_L-1} + (D_L - 1)kf^{D_L-2}\Delta f \quad (2.10)$$

Factorizando la expresión (2.10):

$$T_{L_{i+1}} = T_{L_i} + \Delta T_L = kf^{D_L-2}[f + (D_L - 1)\Delta f] \quad (2.11)$$

La ecuación (2.11) se puede reescribir como:

$$T_{L_{i+1}} = T_{L_i} + \Delta T_L = \frac{kf^{D_L-1}}{f} [f + (D_L - 1)\Delta f] \quad (2.12)$$

De (2.10) se observa que para una variación del par de carga, la condición inicial o par de carga inicial ( $T_{L_0}$ ) resulta ser el par de carga anterior respecto del que se está calculando. Es decir, para  $T_{L_{i+1}}$  la condición inicial es:

$$T_{L_0} = kf^{D_L-1} = T_{L_i} \quad (2.13)$$

Considerando la ecuación (2.13), es posible reescribir la ecuación (2.12) de la siguiente manera:

$$T_{L_{i+1}} = T_{L_i} + \Delta T_L = \frac{T_{L_0}}{f} [f + (D_L - 1)\Delta f] \quad (2.14)$$

Desarrollando (2.14) se tiene:

$$T_{L_{i+1}} = T_{L_i} + \Delta T_L = T_{L_0} [1 + (D_L - 1)f'] \quad (2.15)$$

Finalmente el nuevo par de carga después del corte de carga realizado por el esquema es:

$$T_{L_{i+1}} = T_{L_0} [1 + (D_L - 1)f'] \quad (2.16)$$

Donde

- $f'$  =  $\frac{\Delta f}{f}$  Cambio de la frecuencia [pu].
- $D_L$  Factor de amortiguamiento de carga.
- $T_{L_0}$  Par de carga inicial [pu].
- $T_{L_i}$  Par de carga actual [pu], funge como  $T_{L_0}$  para el cálculo de  $T_{L_{i+1}}$ .
- $T_{L_{i+1}}$  Par de carga nuevo [pu].

Además:

$$f' = \begin{cases} \text{negativa para un cambio por debajo de 60 Hz} \\ \text{positiva para un cambio por encima de 60 Hz} \end{cases}$$

### 2.5.2.2 Variación del Par de Generación

El par de generación varía inversamente respecto a la frecuencia del sistema; es decir:

$$T_G = \frac{k}{f} = kf^{-1} \quad (2.17)$$

Al igual que en el caso del par de carga, la variación del par de generación se puede obtener a través de la derivada de (2.17) respecto a la frecuencia.

$$\frac{dT_G}{df} = -kf^{-2} \quad (2.18)$$

De esta manera el incremento en el par de generación es:

$$\Delta T_G = -kf^{-2}\Delta f \quad (2.19)$$

Por lo tanto el nuevo par de generación es:

$$T_{G_{i+1}} = T_{G_i} + \Delta T_G = kf^{-1} - kf^{-2}\Delta f \quad (2.20)$$

Factorizando la expresión (2.20):

$$T_{G_{i+1}} = T_{G_i} + \Delta T_G = kf^{-2}[f - \Delta f] \quad (2.21)$$

La ecuación (2.21) se puede reescribir como:

$$T_{G_{i+1}} = T_{G_i} + \Delta T_G = \frac{kf^{-1}}{f} [f - \Delta f] \quad (2.22)$$

Para una variación en el par de generación, la condición inicial es el par de generación anterior respecto del que se está calculando. Por consiguiente el par de generación inicial ( $T_{G_0}$ ) para  $T_{G_{i+1}}$  es:

$$T_{G_0} = kf^{-1} = T_{G_i} \quad (2.23)$$

De acuerdo con la ecuación (2.23), la ecuación (2.22) se convierte en:

$$T_{G_{i+1}} = T_{G_i} + \Delta T_G = \frac{T_{G_0}}{f} [f - \Delta f] \quad (2.24)$$

Desarrollando (2.24) se tiene:

$$T_{G_{i+1}} = T_{G_i} + \Delta T_G = T_{G_0} [1 - f'] \quad (2.25)$$

Finalmente el par de generación obtenido después de la desconexión de carga realizada por el esquema es:

$$T_{G_{i+1}} = T_{G_0} [1 - f'] \quad (2.26)$$

Donde

- $f'$  =  $\frac{\Delta f}{f}$  Cambio de la frecuencia [pu].
- $T_{G_0}$  Par generador inicial [pu].
- $T_{G_i}$  Par generador actual [pu], funge como  $T_{G_0}$  para el cálculo de  $T_{G_{i+1}}$ .
- $T_{G_{i+1}}$  Par generador nuevo [pu].

Además:

$$f' = \begin{cases} \text{negativa para un cambio por debajo de 60 Hz} \\ \text{positiva para un cambio por encima de 60 HZ} \end{cases}$$

### 2.5.3 Variación de la Frecuencia con el Tiempo

La frecuencia varía respecto al tiempo debido a alguna variación en el par de generación y/o en el par de carga. De esta manera la ecuación (2.4) se puede escribir como:

$$2H \frac{df'}{dt} = T_G - T_L = T_a \quad (2.27)$$

Sustituyendo (2.16) y (2.26) en (2.27) se obtiene:

$$2H \frac{df'}{dt} = T_{G_0} [1 - f'] - T_{L_0} [1 + (D_L - 1)f'] \quad (2.28)$$

Desarrollando (2.28) se tiene:

$$2H \frac{df'}{dt} = T_{G_0} - T_{L_0} - [T_{G_0} + (D_L - 1)T_{L_0}]f' \quad (2.29)$$

Sea (2.30) el factor total de amortiguamiento:

$$D_T = T_{G_0} + (D_L - 1)T_{L_0} \quad (2.30)$$

Sustituyendo (2.30) en (2.29) se tiene:

$$2H \frac{df'}{dt} = T_{G_0} - T_{L_0} - D_T f' \quad (2.31)$$

Por lo tanto la ecuación diferencial de primer orden que modela el comportamiento de la frecuencia respecto al tiempo basada en los pares de generación y carga variables es (2.32):

$$2H \frac{df'}{dt} + D_T f' = T_{G_0} - T_{L_0} = T_a \quad (2.32)$$

El desarrollo matemático de la ecuación (2.32) se presenta en el apéndice A.

La solución de la ecuación anterior es:

$$f' = \frac{T_a}{D_T} \left[ 1 - e^{-\frac{D_T}{2H}t} \right] \quad (2.33)$$

Donde

- $f'$  Cambio de la frecuencia [pu].
- $T_a$  Par de aceleración en la base de la generación restante del sistema [pu].
- $D_T$  Factor total de amortiguamiento.
- $H$  Constante de inercia del sistema [s].
- $t$  Tiempo [s].

Como se puede notar, los pares de generación y carga se ven afectados por los cambios en la frecuencia de forma que el par de generación varía inversamente proporcional con la frecuencia mientras que el par de carga varía directamente proporcional con la misma. De esta manera cuando la frecuencia comienza a decaer, se presenta una tendencia de amortiguamiento como se muestra en la Figura 2.7.

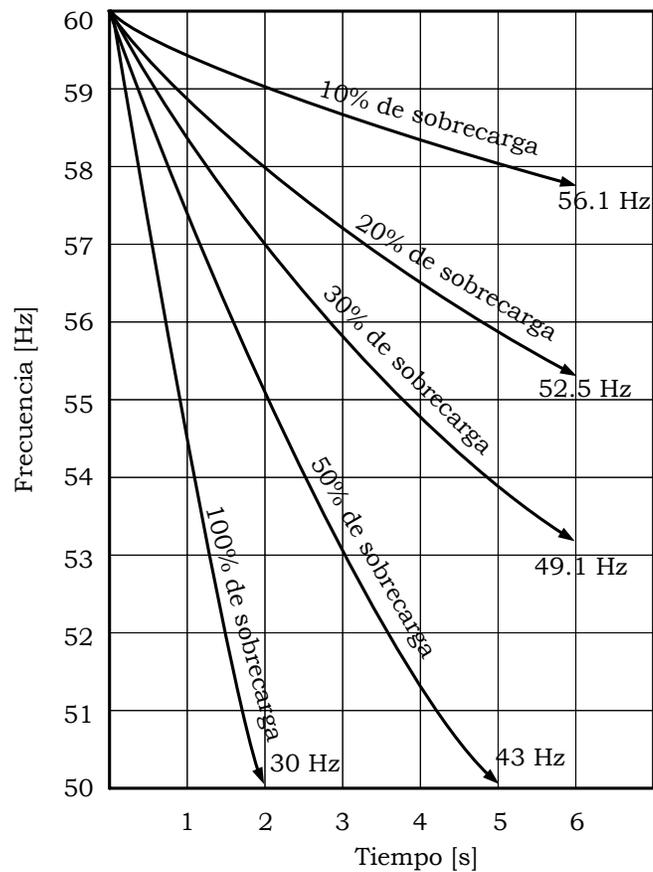


Figura 2.7 Comportamiento característico de la frecuencia para diferentes niveles de sobrecarga con pares de generación y carga variables [Adaptado de 7].

En la Figura 2.8 se puede apreciar cómo influye la cantidad de carga desconectada en la recuperación de la frecuencia nominal; se observa que a mayor porcentaje de carga desconectada más pronta es la recuperación de la frecuencia. Así, cuando el tiro de carga es del mismo valor que la sobrecarga, la frecuencia del sistema regresa a su valor nominal. Esto se debe a que los pares de generación y de carga están variando.

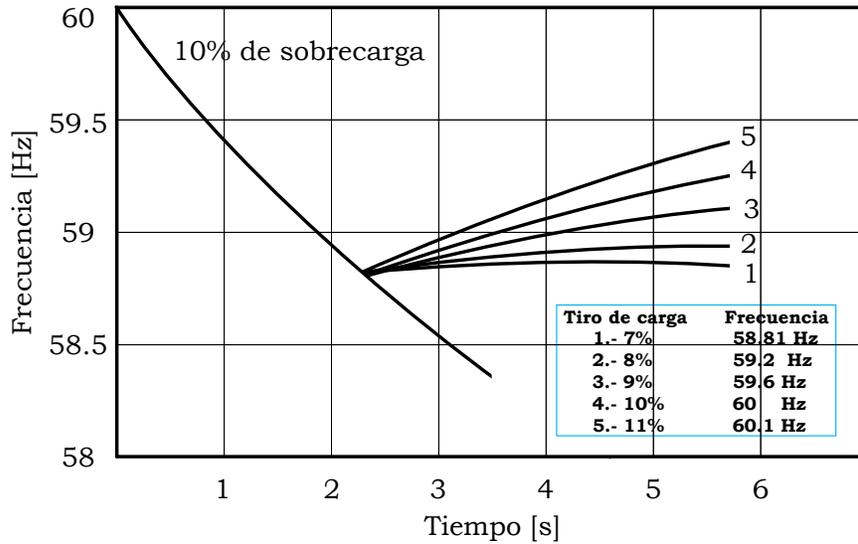


Figura 2.8 Efecto de diferentes tiros de carga para un mismo paso [Adaptado de 7].

Por lo tanto un programa de tiro de carga basado en las características de la frecuencia con pares de generación y carga variables, logra devolver la frecuencia a su valor nominal si desconecta una cantidad de carga igual a la de sobrecarga como se muestra en la Figura 2.9, misma donde se observa con claridad el amortiguamiento de la frecuencia debido a la variación en los pares.

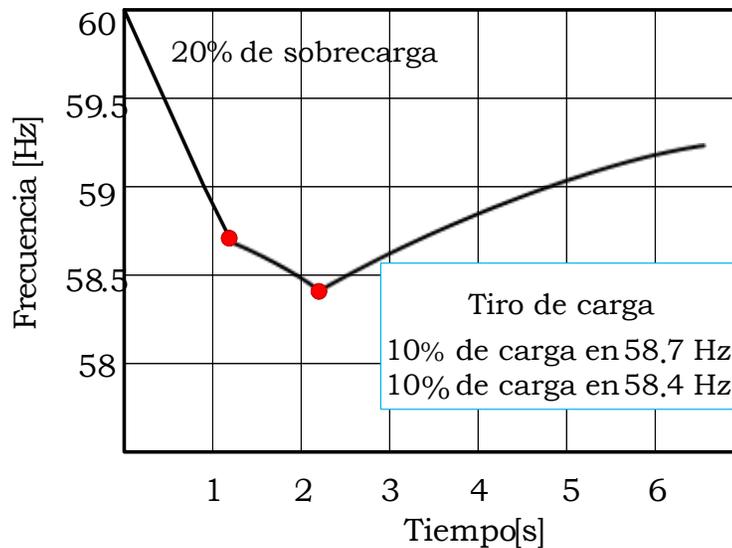


Figura 2.9 Efecto de tiro de carga en diferentes pasos con pares de generación y carga variables.

En la Figura 2.9 se observa que la frecuencia se comienza a recuperar hacia su valor nominal después de realizar el segundo disparo; es decir, cuando se ha desconectado la cantidad de carga igual a la sobrecarga inicial.

#### 2.5.4 Comportamiento de los Pares del Sistema después del Tiro de Carga

Cuando la frecuencia del sistema disminuye hasta alcanzar la frecuencia de corte inicial de un esquema de tiro de carga, la operación de éste se ve reflejada como una variación en los pares de generación, carga y aceleración de la siguiente manera [7]:

Debido a la variación de frecuencia que presenta el sistema, el par de carga justo antes del tiro de carga es:

$$T_{LBLS} = T_L [1 + (D_L - 1)f'] \quad (2.34)$$

Donde

- $T_{LBLS}$  Par de carga justo antes del tiro de carga [pu].
- $f'$  Cambio de la frecuencia [pu].
- $T_L$  Par de carga [pu].
- $D_L$  Factor de amortiguamiento de carga.

Por lo tanto, la carga tirada equivalente realizada por el esquema es:

$$LS_{EQ} = \frac{LS}{100} [1 + (D_L - 1)f'] \quad (2.35)$$

Donde

- $LS_{EQ}$  Carga tirada equivalente [pu].
- $f'$  Cambio de la frecuencia [pu].
- $LS$  Carga a tirar por el esquema [%].
- $D_L$  Factor de amortiguamiento de carga.

Después de que el esquema desconectó la carga, el par de carga del sistema se obtiene de la siguiente manera:

$$T_{L(i+1)} = T_{LBLS} - LS_{EQ} \quad (2.36)$$

El nuevo valor del par de generación es:

$$T_{G(i+1)} = T_{G(i)}(1 - f') \quad (2.37)$$

Situación que origina un nuevo valor para el par de aceleración del sistema:

$$T_{a(i+1)} = T_{G(i+1)} - T_{L(i+1)} \quad (2.38)$$

El nuevo factor de amortiguamiento total es:

$$D_{T(i+1)} = T_{G(i+1)} + (D_L - 1)T_{L(i+1)} \quad (2.39)$$

## 2.6 ESQUEMAS DE TIRO DE CARGA POR BAJA FRECUENCIA

Los programas de tiro de carga son acciones de control remedial diseñadas para asegurar la estabilidad de frecuencia del sistema mediante cortes de carga. Los esquemas de desconexión de carga por baja frecuencia protegen al sistema contra disminuciones excesivas de frecuencia una vez que éste ha entrado en condiciones de emergencia; estas condiciones generalmente se presentan por pérdida de generación [12, 47]. Esta situación provoca que el balance entre potencia generada y potencia demandada se pierda súbitamente reflejándose en una disminución extremadamente rápida de la frecuencia [1, 7]. La velocidad con que la frecuencia decae sólo depende de la magnitud de sobrecarga y de la inercia del sistema [7, 49]. La operación de los lazos de control primario y secundario de los demás generadores no es lo suficientemente rápida para recuperar el nivel de frecuencia antes de que el sistema colapse o se separe en varias islas; además de que se pueden causar daños irreparables en las turbinas de vapor al operarlas en bajas frecuencias [1, 8].

En un esquema remedial los cortes de carga se realizan a través de varios pasos o escenarios de desconexión, cada uno caracterizado por un umbral de frecuencia, una cantidad de carga a tirar y generalmente un retardo de tiempo antes del disparo [2, 14]. Ante una condición de emergencia, el esquema de tiro de carga opera cuando la frecuencia del sistema alcanza el primer nivel de disparo estipulado en el programa; es decir, si la frecuencia sigue disminuyendo después de transcurrir el retardo del escenario, el esquema desconectará la carga definida para dicho nivel. Así entonces, si la cantidad de carga desconectada fue suficiente para recuperar la frecuencia; o sea mayor o igual al nivel de sobrecarga, la frecuencia se recuperará a un valor dentro del

ancho de banda de 59.8 Hz y 60.2 Hz o a un nivel que puede regularse mediante el gobernador de velocidad para alcanzar los 60 Hz. En caso contrario ésta seguirá disminuyendo a una velocidad de cambio menor hasta alcanzar los siguientes niveles de disparo en los que debe recuperarse [12]. El objetivo principal de un programa de desconexión de carga es disparar la cantidad de carga mínima necesaria a manera de recobrar el balance de carga-generación y así recuperar en forma rápida y segura el nivel de frecuencia a 60 Hz o en un ancho de banda de  $\pm 0.2$  Hz. En caso de que el esquema no logre recuperar estos niveles deseados, es suficiente con que lleve la frecuencia a un valor por arriba de los 59 Hz para que los controles del generador puedan terminar de recuperarla y por debajo de los 61 Hz para evitar problemas de sobrefrecuencia. De esta manera se reduce la carga conectada a un nivel que pueda ser suministrado en forma segura por la generación disponible [3, 5, 8, 12, 14].

Tras la intervención del esquema remedial el sistema debe recobrar las siguientes características:

- Generación adecuada para suministrar energía a la demanda de carga.
- La frecuencia debe mantenerse entre 59.8 Hz y 60.2 Hz.
- En caso de operación interconectada, el flujo de potencia en las líneas de enlace debe mantenerse dentro de los niveles adecuados.

Con ello el sistema pasa de un estado de emergencia a un estado normal de equilibrio [48, 50].

### **2.6.1 Tipos de Esquemas de Desconexión de Carga por Baja Frecuencia**

Actualmente existen dos tipos de esquemas de tiro de carga que son los esquemas estáticos o fijos y los esquemas dinámicos o adaptables.

*Esquemas estáticos.* Estos esquemas desconectan una cantidad de carga fija en cada escenario, su diseño se basa en las características de la frecuencia. La principal desventaja que presentan es la incapacidad de interpretar las incertidumbres de las cargas en el momento de su diseño y operación; lo que resulta en una mayor o menor desconexión de carga respecto de la necesaria. Sin embargo son los más utilizados en la actualidad [9, 47, 48].

*Esquemas dinámicos.* Estos esquemas presentan más ventajas respecto a los o estáticos; y se debe a que tienen la capacidad de considerar las características de la frecuencia y/o de la magnitud del disturbio, así como las incertidumbres en la mayoría de los casos. Por lo tanto, los esquemas adaptables logran desconectar la cantidad de carga necesaria en la menor cantidad de disparos posibles; inclusive hay varios esquemas que recuperan la frecuencia en un solo disparo [48].

## 2.6.2 Diseño de Esquemas Estáticos Convencionales de Tiro de Carga por Baja Frecuencia

No es recomendable la operación de un SEP a frecuencias bajas ya que las turbinas y los auxiliares de las plantas presentan limitaciones al operar a estos niveles; resultando en una pésima calidad de energía para el usuario. Cuando un SEP entra en estas condiciones operativas, la única alternativa para mantener la integridad del sistema es el tiro de carga [17]. Para diseñar un esquema de desconexión de carga convencional es importante tomar en cuenta algunos criterios y parámetros del sistema.

Básicamente el diseño de EDCBF se divide en dos etapas [3, 5]:

- Primera etapa o etapa inercial (diseño de bloques de tiro de carga).
- Segunda etapa (Selección del lugar en la red donde se tirará la carga).

En la etapa inercial únicamente se considera la robustez del sistema a través de su inercia y amortiguamiento de carga para diseñar los escenarios de desconexión, mediante los cuales se cambiará la dirección de decaimiento de la frecuencia con la desconexión automática e inmediata de carga. En la segunda etapa se considera la topología de la red para determinar el lugar donde se tirará la carga y los tiempos de retardo de cada escenario [3].

Finalmente el resultado total del tiro de carga se logra con la operación del esquema en combinación con el efecto del gobernador de velocidad y considerando el tipo de generación que se tiene [16]. En éste trabajo únicamente se desarrolla la etapa inercial.

### 2.6.2.1 Consideraciones

Es necesario considerar los siguientes criterios en el desarrollo de un esquema de tiro de carga por baja frecuencia [4, 47]:

- Las plantas térmicas tienen mayor prioridad en el SEP.
- Debe existir una coordinación entre los sistemas térmicos y los relevadores de tiro de carga para comenzar a desconectar carga lo antes posible.
- Las instalaciones que son esenciales para la seguridad del sistema no deben ser disparadas.
- Disparar primero cargas cuya operación no se vea severamente afectada por el corte de energía eléctrica.
- Desconectar en primera instancia cargas que sean fáciles de restaurar antes que las cargas que requieran de grandes inversiones para reiniciar su proceso.

- Operación rápida del esquema antes de que el bajo nivel de frecuencia pueda dañar partes del sistema.
- Desconectar la cantidad mínima de carga que permita la recuperación de la frecuencia.

### 2.6.2.2 Pérdida de Generación

Cuando el SEP pierde una parte de la generación se presenta una disminución de voltaje y de frecuencia; sin embargo, la frecuencia es el indicador principal de que este tipo de disturbio ha ocurrido. El voltaje no es considerado para tal efecto ya que este problema también puede presentarse en fallas del sistema [49]. La magnitud de pérdida de generación se especifica como una *sobrecarga* y está directamente relacionada con la *inercia* del sistema. A mayor inercia se tiene un menor abatimiento de la frecuencia y a menor inercia la frecuencia disminuye con mayor velocidad [7, 17].

### 2.6.2.3 Cantidad Máxima de Sobrecarga

Los esquemas de tiro de carga son diseñados para solventar una contingencia máxima; la cual típicamente es del 30% al 50% de sobrecarga [1, 4]. La máxima carga a desconectar debe ser suficiente para restablecer la frecuencia a niveles aceptables. Debido a que se desconoce la magnitud del disturbio que se presentará, se genera una incertidumbre que impide saber si el esquema siempre funcionará adecuadamente y/o tendrá la cantidad de carga necesaria para desconectar [1, 4, 49]. Por lo tanto, el primer paso en el diseño es determinar la cantidad máxima de carga a tirar en el esquema; misma que se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$\%OL = \frac{Carga - Generación\ restante}{Generación\ restante} \times 100 \quad (2.40)$$

La cantidad de sobrecarga (*OL*) presente en el sistema tras perder generación se obtiene a través de (2.40); por lo tanto para una pérdida de 40% de generación la sobrecarga vista por el sistema será de 66.66%. Sin embargo, la frecuencia puede ser corregida desconectando una cantidad de carga igual al porcentaje de pérdida de generación, en este caso basta con desconectar 40% de carga.

Así mismo, la pérdida de generación (*LG*) se puede obtener mediante la diferencia entre la generación total y la generación restante.

$$\%LG = (Generación\ total - Generación\ restante) \times 100 \quad (2.41)$$

#### **2.6.2.4 Reducción Máxima de Frecuencia y Frecuencias de Paso**

Debido a la sensibilidad de las turbinas de vapor, los fabricantes recomiendan evitar su operación a niveles menores de 58.5 Hz. Del mismo modo no es permitida la operación de una planta térmica a 57 Hz por más de 30 ciclos ya que su rendimiento se ve afectado en forma crítica [1, 3, 8, 17].

Elegir un valor de frecuencia inicial cercano a la banda de operación aceptable puede resultar en la operación del esquema ante fenómenos dinámicos donde la frecuencia incursiona en niveles bajos por períodos cortos provocando un disparo de carga innecesario. Para evitar tiros de carga en falso la frecuencia inicial de corte suele seleccionarse en el límite de operación continua de las turbinas, que en su mayoría es de 59.4 Hz o de valores poco menores a éste [51]. Además se tiene un retardo de tiempo entre el relevador de baja frecuencia y el interruptor de potencia de alrededor de 10 a 15 ciclos además del retardo del esquema [1, 16, 17].

Es recomendable que las frecuencias de los siguientes pasos se determinen con una separación de 0.2 Hz en los primeros pasos y en los últimos pasos entre 0.3 Hz y 0.4 Hz [1, 7]. Con ello se permite la operación del esquema en sus siguientes escenarios en caso de ser necesario sin llegar a frecuencias demasiado bajas. En México la frecuencia inicial de corte operada por los esquemas del CENACE es 59.3 Hz [12].

#### **2.6.2.5 Número de Pasos del Esquema**

Típicamente los esquemas contienen de tres a seis pasos; sin embargo, no existe un número limitado de escenarios de desconexión [1, 4, 7, 17]. El objetivo es desconectar carga en forma gradual con el fin de no tirar cantidades muy grandes de carga para contingencias no muy severas; por lo tanto, son más utilizados los esquemas con mayor número de pasos. El principal problema que se presenta en el diseño de los esquemas de desconexión de carga es la incertidumbre en el número de pasos y en la cantidad de carga a desconectar en cada paso; ya que el esquema puede tirar más carga de la necesaria o tirar una cantidad insuficiente de carga sin lograr recuperar la frecuencia a un nivel aceptable [9, 17].

El número de pasos en el esquema remedial está estrechamente ligado a la cantidad máxima de sobrecarga que éste puede solventar. De esta manera, presenta más ventajas diseñar esquemas con varios pasos de desconexión para que la carga a tirar se pueda distribuir adecuadamente en ellos [1, 5, 6, 9].

### **2.6.2.6 Cantidad de Carga a Tirar por Paso**

Básicamente existen tres criterios para realizar la desconexión de carga en los pasos del esquema. El primer criterio consiste en desconectar mayor carga en los pasos iniciales y conforme aumentan los pasos ir desconectando menos carga; por otra parte, el segundo criterio se fundamenta en desconectar menor cantidad de carga en los pasos iniciales y gradualmente desconectar más carga hasta el último paso. Finalmente el tercer criterio consiste en desconectar en cada escenario la misma cantidad de carga [1, 9].

De los tres criterios anteriores el más utilizado debido a su mejor desempeño es el primer criterio; ya que ante cualquier contingencia, en los primeros pasos el esquema desconecta una cantidad considerable de carga; lo que conlleva a la recuperación del balance carga-generación casi en su totalidad. Así pues, en los pasos subsecuentes se desconectan sólo pequeñas cantidades de carga para lograr el equilibrio entre demanda y generación [9].

En contraste, el segundo criterio es el que mayor desventaja presenta puesto que el esquema necesita realizar varios disparos de pequeñas cantidades de carga para lograr casi la recuperación del balance carga-generación; entonces cuando se requiere la desconexión de poca carga, el esquema desconecta una cantidad considerable de la misma debido a su naturaleza de diseño. Esta acción provoca en muchos casos problemas de sobrefrecuencia debida a un exceso de tiro de carga. Cuando no se presenta este caso, generalmente el esquema no logra recuperar la frecuencia a un nivel aceptable [9].

No obstante, el tercer criterio tampoco es recomendable porque al desconectar en todos sus escenarios la misma cantidad de carga, no se tiene flexibilidad para la desconexión gradual de carga, lo que resulta en niveles de frecuencia fuera de la banda operativa para la mayoría de los disturbios [9].

La cantidad de carga recomendable a desconectar en cada paso depende de la sobrecarga máxima que puede solventar el esquema, por lo general el primer disparo es de alrededor del 10% de la carga total del sistema y los siguientes pasos se van coordinado de tal forma que la suma de los disparos sea igual a la contingencia máxima [6]. Por otra parte, también se pueden aplicar algoritmos de optimización que ajusten la cantidad de carga a tirar de acuerdo a la gama de sobrecargas a la que está expuesto el SEP. Estos algoritmos también permiten determinar la zona donde es recomendable llevar a cabo la desconexión [1, 16, 17].

### 2.6.2.7 Tiempo de Retardo

El retardo en cada paso del esquema de desconexión de carga por baja frecuencia se utiliza como una medida de selectividad para evitar una operación innecesaria del esquema ante oscilaciones de frecuencia. El tiempo de retardo que generalmente se utiliza es de 0.3 a 0.4 segundos; sin embargo, no es posible generalizar este tiempo para todos los sistemas [7]. El tiempo de retardo puede ser mayor o menor siempre que se tenga una buena coordinación con el turbogenerador [1].

### 2.6.3 Metodología para el Diseño de Esquemas Convencionales de Tiro de Carga por Baja Frecuencia

Tomando en cuenta las consideraciones y criterios descritos en la sección 2.6.2 y sus subsecciones (excepto el criterio de retardo de tiempo), se puede establecer una metodología para el diseño de esquemas convencionales de tiro de carga por baja frecuencia; la cual se expresa mediante el diagrama de flujo de la Figura 2.10.

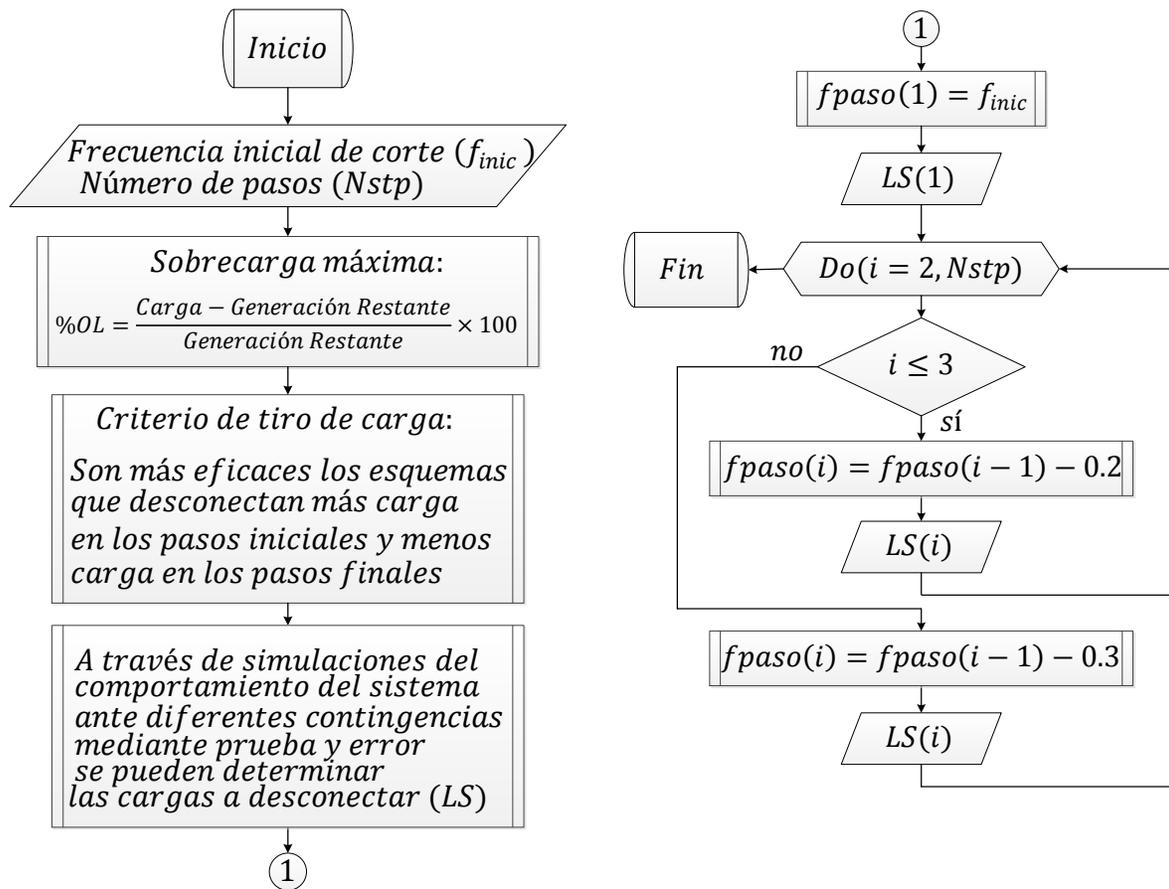


Figura 2.10 Metodología para el diseño de esquemas estáticos convencionales de tiro de carga.



## CAPÍTULO 3:

# TÉCNICA DE TIRO DE CARGA INTELIGENTE

### 3.1 INTRODUCCIÓN

En éste capítulo se detalla la importancia de la aplicación de los sistemas difusos en SEP; así mismo se explica cómo pueden intervenir en el control de la frecuencia mediante su aplicación en los EDCBF. Por tal motivo, este capítulo se centra en el desarrollo de una técnica de tiro de carga inteligente denominada EDCBF tipo difuso; cuya operación está basada en un sistema de inferencia difuso o FIS (*"Fuzzy Inference System"* en inglés). El FIS es una técnica de inteligencia artificial compuesta por dos técnicas inteligentes que son lógica difusa y un sistema aditivo difuso. Así pues, se analiza en primera instancia el comportamiento de la frecuencia en estado de emergencia con la operación de un esquema convencional; y posteriormente se realiza el mismo análisis mediante un FIS que funge como un esquema inteligente que es capaz de tomar decisiones para salvaguardar la frecuencia del sistema.

### 3.2 UTILIDAD DE LOS SISTEMAS DIFUSOS

Durante muchos años los sistemas difusos no fueron considerados como un tópico de gran importancia; sin embargo, a partir de 1937 con la simplificación del Teorema fundamental del análisis real del álgebra, conocido como el Teorema de Stone-Weierstrass; este campo comenzó a tomar la importancia debida [52]. Hoy en día la lógica difusa es una de las tecnologías más exitosas para desarrollar sistemas de control sofisticado [18].

En general, la lógica difusa puede aplicarse a fenómenos continuos que no pueden descomponerse fácilmente en segmentos discretos, cuando una o más variables de control son continuas y/o cuando no existe un modelo matemático o si existe es demasiado complejo capturar analíticamente todos sus datos. También se emplea cuando no se pueden controlar todas las variables mediante una técnica convencional [52, 18]. Otro beneficio es que tiene la capacidad de dar soluciones numéricas muy aproximadas en tiempos reducidos; es decir, se utiliza para hacer evaluaciones

suficientemente rápidas en tiempo real, o cuando se ocupa demasiada memoria en el diseño del sistema [18]. De este modo los sistemas difusos tienen un alto potencial para poder reproducir y/o evaluar el comportamiento de sistemas complejos; como pueden ser sistemas de ingeniería, biológicos, médicos, sociales, políticos, económicos, etc. [52]. Por lo tanto se dice que un sistema es difuso si su entrada  $u(t)$ , salida  $y(t)$ , estados  $x(t)$  o alguna combinación entre ellos puede ser representada mediante conjuntos difusos [53].

### **3.2.1 Aplicación de Sistemas Difusos para Tiro de Carga por Baja Frecuencia en SEP**

Un modelo difuso también puede considerarse como una relación entre el modelo de un sistema y el modelo de incertidumbres. Esto se debe a que un modelo difuso está diseñado para comprender el comportamiento de un sistema para el que no existe modelo. Otra característica es que a la vez son robustos, en el sentido de que la estructura del sistema se forma a partir de las incertidumbres de las variables de entrada y de salida [52]. Por lo tanto, estos modelos pueden ser ampliamente utilizados en el área de Ingeniería Eléctrica, ya que en los SEP existen muchas incertidumbres que se pueden manejar mediante lógica difusa [9]. De esta manera, con mayor frecuencia se van empleando modelos difusos para la automatización de plantas de potencia, puesto que el manejo de las incertidumbres hace posible la reproducción del comportamiento de cualquier sistema [54].

Los esquemas convencionales de desconexión de carga operan a través de pasos con niveles de baja frecuencia; a cada paso está asociada una cantidad de carga que se desconecta cuando la frecuencia del sistema alcanza dicho nivel. Sin embargo, aun siguiendo los criterios y recomendaciones de diseño, éste tipo de esquemas continúa presentando problemas cuando se requiere su operación, puesto que se desconoce la cantidad de generación que podría salir de operación en una contingencia. El esquema puede no llegar a recuperar la frecuencia por encima de los 59 Hz, incursionando en la zona de daño de las turbinas si la pérdida de generación es severa. Por otra parte, si el balance carga-generación se ha recuperado casi en su totalidad y la frecuencia cae al siguiente nivel, el esquema podría desconectar más carga de la requerida teniendo un problema de sobretiro de carga [30].

Así entonces, esta técnica puede ser implementada para mejorar el tiro de carga ya que en un SEP las cargas son inciertas y se pueden representar mediante conjuntos difusos que permiten modelar su incertidumbre [25, 38, 40]. De esta manera el ajuste de los relevadores de tiro de carga se puede adecuar con lógica difusa, ya que muchos de éstos son digitales. Logrando así que el esquema de protección contra baja frecuencia desconecte la cantidad de carga más adecuada en cada paso y recupere el valor de frecuencia en el menor tiempo posible [30, 39].

### 3.3 ANÁLISIS DE LA FRECUENCIA EN ESTADO DE EMERGENCIA MEDIANTE LA OPERACIÓN DE UN ESQUEMA ESTÁTICO DE TIRO DE CARGA

La lógica de operación de un esquema estático de tiro de carga por baja frecuencia se describe en el diagrama de flujo de la Figura 3.1. Éste programa se codificó en FORTRAN 90 y la nomenclatura utilizada se puede observar en el apéndice D.

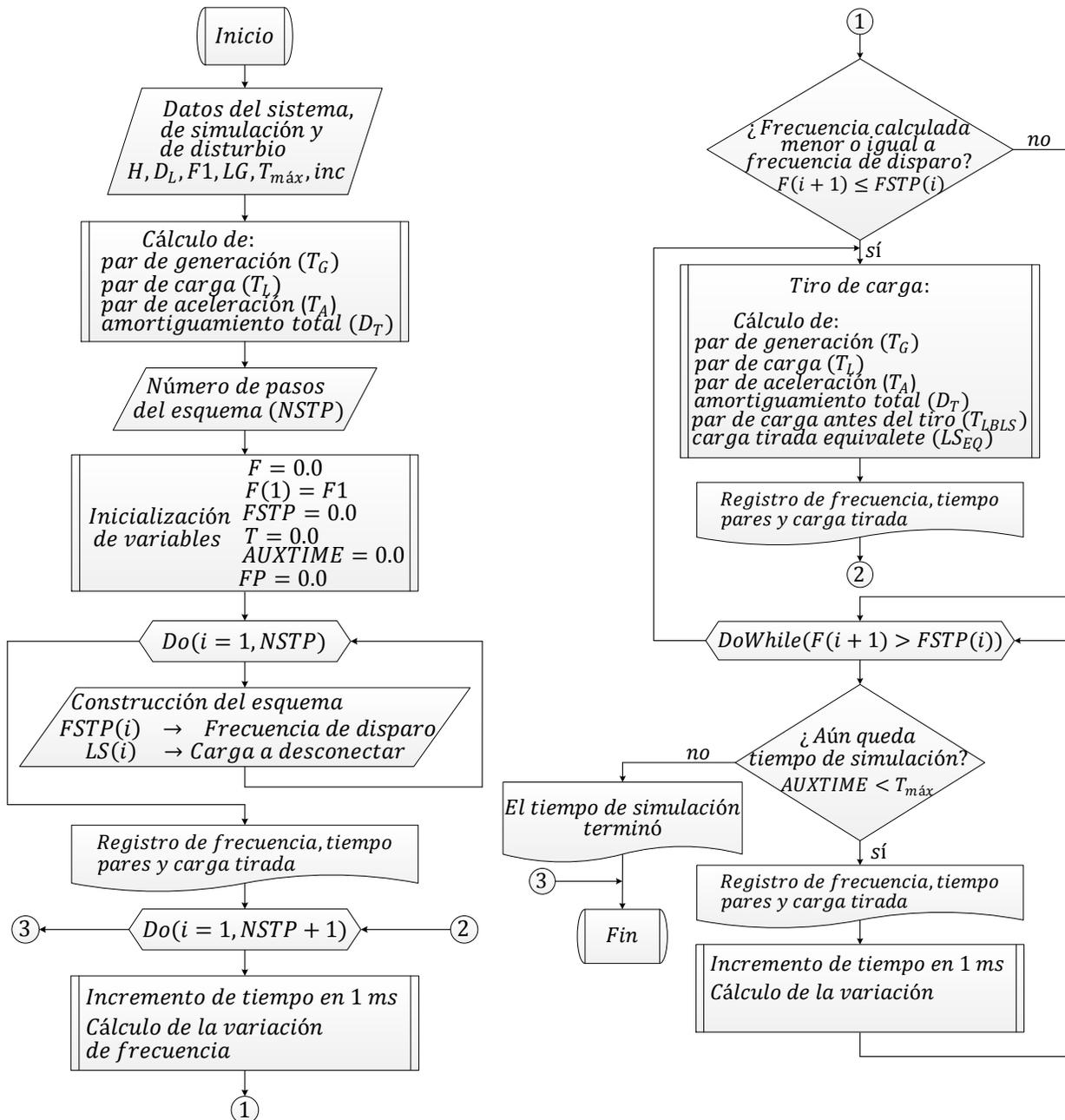


Figura 3.1 Lógica de operación de un esquema estático de desconexión de carga por baja frecuencia.

Para efectos de protección, se decidió que los esquemas de tiro de carga desconecten un máximo de 40% de carga en la contingencia más severa. Es decir:

$$\%OL = \frac{1 - \text{Generación restante}}{\text{Generación restante}} \times 100 = 40\% \quad (3.1)$$

Donde:

$$\text{Generación restante} = \frac{1}{1 + 0.4} = 0.7143 \text{ pu} \quad (3.2)$$

$$\%LG = (1 - 0.7143) \times 100 = 28.57\% \quad (3.3)$$

De acuerdo con la expresión (3.3) se observa que una sobrecarga de 40% vista por el sistema, se debe a una pérdida de generación de 28.57%. De aquí que los esquemas de tiro de carga pueden solventar una pérdida de generación máxima de 28.57%. Con base en los criterios de diseño mostrados en el capítulo 2 se diseñó un esquema de seis pasos, el cual será operado de acuerdo al diagrama de flujo de la Figura 3.1 para observar el comportamiento de la frecuencia en estado de emergencia. En la tabla 3.1 se muestra el esquema a utilizar en el ejemplo.

**Tabla 3.1 Esquema estático de tiro de carga.**

Frecuencia [Hz]	Carga a desconectar [%]
59.3	10
59.1	8
58.9	6
58.6	6
58.3	5
58	5

**Datos:**

- Datos del sistema [7]:

Inercia  $H = 5$   
 Amortiguamiento de carga  $D_L = 1.5$   
 Frecuencia nominal  $F1 = 60 \text{ Hz}$

- Datos de simulación:

Tiempo máximo de simulación  $T_{m\acute{a}x} = 60 \text{ s}$   
 Incremento de tiempo  $inc = 1 \text{ ms}$

- Datos de disturbio:

Sobrecarga vista por el sistema  $OL = 10\%$

**Cálculos:**

Par de generación inicial:

$$T_G = 1.0 - \left(\frac{OL}{100.0}\right) = 1.0 - \left(\frac{10}{100}\right) = 0.9 pu \quad (3.4)$$

Par de carga inicial:

$$T_L = 1.0 pu \quad (3.5)$$

Par de aceleración:

$$T_A = T_G - T_L = 0.9 - 1.0 = -0.1 pu \quad (3.6)$$

Factor de amortiguamiento total:

$$D_T = T_G + (D_L - 1)T_L = 0.9 + (1.5 - 1.0) \times 1.0 = 1.4 pu \quad (3.7)$$

**Datos del esquema:**

Número de pasos del esquema:

$$NSTP = 6 \quad (3.8)$$

Construcción de vectores:

$$ALLOCATE(F(NSTP + 2), FSTP(NSTP + 1), FP(NSTP + 1), LS(NSTP))$$

$F(NSTP + 2)$  Vector para la frecuencia. En cada localidad se almacena la frecuencia de corte durante la simulación. La localidad 1 es para la frecuencia nominal y la localidad  $NSTP+2$  es para que el programa se siga ejecutando en caso de que operen todos los escenarios del esquema; de lo contrario la simulación se detendrá al operar el último paso aun cuando el tiempo máximo de simulación no se haya alcanzado.

$FSTP(NSTP + 1)$  y  $FP(NSTP + 1)$  Vector para las frecuencias de corte del esquema y para las variaciones de frecuencia en pu del sistema respectivamente. Contienen  $NSTP+1$  localidades para que en caso de que el esquema realice todos sus disparos, el programa pueda seguirse ejecutando hasta que el tiempo de simulación finalice; de lo contrario tras el último disparo la simulación se detendrá.

$LS(NSTP)$  Vector que almacena en cada localidad la cantidad de carga a desconectar.

**Inicialización de variables:**

- $F = 0.0$  Se inicializa el vector de frecuencia en cero y se le asigna el valor de
- $F(1) = 60.0$  la frecuencia nominal a la primera localidad.
- $FSTP = 0.0$  Inicialización del vector de frecuencias de corte en cero.
- $T = 0.0$  La variable T se inicializa en cero. Esta variable se resetea cada que el esquema realiza un disparo.
- $AUXTIME = 0.0$  La variable AUXTIME se inicializa en cero. Esta variable cuenta el tiempo total de simulación.
- $FP = 0.0$  Se inicializa el vector FP en cero. En ésta variable se guarda el valor de la variación de frecuencia en pu.

**Construcción del esquema:**

$$FSTP = \begin{bmatrix} 59.3 \\ 59.1 \\ 58.9 \\ 58.6 \\ 58.3 \\ 58.0 \\ 0.0 \end{bmatrix} \quad LS = \begin{bmatrix} 10.0 \\ 8.0 \\ 6.0 \\ 6.0 \\ 5.0 \\ 5.0 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

**Registro de resultados:**

**Tabla 3.2 Registro de resultados al comenzar la simulación.**

Frecuencia [Hz]	Tiempo [s]	$T_G$ [pu]	$T_L$ [pu]	$T_A$ [pu]	$T_{LBLS}$ [pu]	$LS_{EQ}$ [pu]
60.0	0.0	0.9	1.0	-0.1	0.0	0.0

En la tabla 3.2 se observa que al inicio de la simulación el par de generación ( $T_G$ ) es de 0.9 pu debido a que le es restado el porcentaje de sobrecarga por la pérdida de generación. Esto implica que el desbalance entre carga y generación se aprecia en el par de aceleración ( $T_A$ ). Por lo tanto la frecuencia comenzará a disminuir desde este momento.

**Incremento de tiempo y variación de frecuencia:**

Incremento de tiempo:

$$T = 0.001 \text{ s} \quad (3.10)$$

$$AUXTIME = 0.001 \text{ s} \quad (3.11)$$

Cálculo de la variación de frecuencia en pu:

$$FP(1) = \frac{T_A}{D_T} \left( 1.0 - e^{-\frac{D_T}{2H}T} \right) = \frac{-0.1}{1.4} \left( 1.0 - e^{-\frac{1.4}{2.0 \times 5.0} 0.001} \right) = -9.9992 \times 10^{-6} pu \quad (3.12)$$

Cálculo de la variación de frecuencia en Hz durante 1 ms:

$$DF = FP(1) \times F(1) = (-9.9992 \times 10^{-6})(60.0) = -5.9995 \times 10^{-4} Hz \quad (3.13)$$

Cálculo de la nueva frecuencia en Hz:

$$F(2) = F(1) + DF = 60.0 + (-5.9995 \times 10^{-4}) = 59.9994 Hz \quad (3.14)$$

**Condicional de operación del esquema:**

¿La frecuencia calculada es menor o igual a la frecuencia de disparo?

$$59.9994 \leq 59.3 \rightarrow NO$$

**Ciclo Do While:**

Mientras la frecuencia calculada sea mayor a la frecuencia de corte:

$$DoWhile(59.9994 > 59.3) \rightarrow SÍ$$

Realiza lo siguiente:

**Condicional de tiempo:**

¿Aún hay tiempo de simulación?

$$0.001 < 60 \rightarrow SÍ$$

**Registro de resultados:**

**Tabla 3.3 Registro de resultados en 0.001 segundos.**

Frecuencia [Hz]	Tiempo [s]	T <sub>G</sub> [pu]	T <sub>L</sub> [pu]	T <sub>A</sub> [pu]	T <sub>LBS</sub> [pu]	LS <sub>EQ</sub> [pu]
60.0	0.0	0.9	1.0	-0.1	0.0	0.0
59.9994	0.001	0.9	1.0	-0.1	0.0	0.0

En la tabla 3.3 se puede notar que al transcurrir 1 milisegundo la frecuencia disminuyó a 59.9994 Hz, mientras que aún se tiene el desbalance entre los pares de carga y generación. Sin embargo, de acuerdo con la tabla 3.1 el esquema no operará hasta que la frecuencia alcance un valor de 59.3 Hz o menor. Después de 1.273 segundos, el estado del sistema es el siguiente:

**Registro de resultados:**

**Tabla 3.4 Registro de resultados en 1.273 segundos.**

Frecuencia [Hz]	Tiempo [s]	T <sub>G</sub> [pu]	T <sub>L</sub> [pu]	T <sub>A</sub> [pu]	T <sub>LBLS</sub> [pu]	L <sub>SEQ</sub> [pu]
60.0	0.0	0.9	1.0	-0.1	0.0	0.0
59.9994	0.001	0.9	1.0	-0.1	0.0	0.0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
59.30039	1.273	0.9	1.0	-0.1	0.0	0.0

En la tabla 3.4 se observa que después de transcurrir 1.273 segundos la frecuencia ha caído hasta 59.30039; no obstante, el esquema aún no opera ya que la frecuencia del sistema es mayor a 59.3 Hz.

**Incremento de tiempo y variación de frecuencia:**

Incremento de tiempo:

$$T = 1.274 \text{ s} \tag{3.15}$$

$$AUXTIME = 1.274 \text{ s} \tag{3.16}$$

Cálculo de la variación de frecuencia en pu:

$$FP(1) = \frac{T_A}{D_T} \left( 1.0 - e^{-\frac{D_T T}{2H}} \right) = \frac{-0.1}{1.4} \left( 1.0 - e^{-\frac{1.4}{2.0 \times 5.0} 1.274} \right) = -11.668487 \times 10^{-3} \text{ pu} \tag{3.17}$$

Cálculo de la variación de frecuencia en Hz durante 1 ms:

$$DF = FP(1) \times F(1) = (-11.66012 \times 10^{-3})(60.0) = -0.700109 \text{ Hz} \tag{3.18}$$

Cálculo de la nueva frecuencia en Hz:

$$F(2) = F(1) + DF = 60.0 + (-0.700109) = 59.29989 \text{ Hz} \tag{3.19}$$

Mientras la frecuencia calculada sea mayor a la frecuencia de corte, realiza lo siguiente:

*DoWhile*(59.29989 > 59.3) → ya no se cumple

**Tiro de carga 1:**

Al realizar el tiro de carga correspondiente al 10% como se indica en el primer escenario del esquema, los pares se modifican de la siguiente manera:

Par de carga antes del tiro:

$$T_{LBLS} = T_L[1.0 + (D_L - 1.0)FP(1)] = 1.0[1.0 + (1.5 - 1.0) \times -11.6684 \times 10^{-3}] = 0.994 \text{ pu} \quad (3.20)$$

Carga tirada equivalente:

$$LS_{EQ} = \frac{LS(i)}{100.0} [1.0 + (D_L - 1.0)FP(1)] = 0.1[1.0 + (1.5 - 1.0) \times -11.6684 \times 10^{-3}] = 0.099 \text{ pu} \quad (3.21)$$

Par de carga nuevo:

$$T_L = T_{LBLS} - LS_{EQ} = 0.9941 - 0.099 = 0.895 \text{ pu} \quad (3.22)$$

Par de generación nuevo:

$$T_G = T_G(1.0 - FP(i)) = 0.9(1.0 - (-11.668487 \times 10^{-3})) = 0.911 \text{ pu} \quad (3.23)$$

Par de aceleración nuevo:

$$T_A = T_G - T_L = 0.911 - 0.895 = 0.016 \text{ pu} \quad (3.24)$$

Factor de amortiguamiento total nuevo:

$$D_T = T_G + (D_L - 1)T_L = 0.911 + (1.5 - 1.0) \times 0.895 = 1.359 \text{ pu} \quad (3.25)$$

En la tabla 3.5 se muestra la variación de pares y frecuencia del sistema una vez que el esquema operó.

**Registro de resultados:**

**Tabla 3.5 Registro de resultados en 1.274 segundos.**

Frecuencia [Hz]	Tiempo [s]	$T_G$ [pu]	$T_L$ [pu]	$T_A$ [pu]	$T_{LBLS}$ [pu]	$LS_{EQ}$ [pu]
60.0	0.0	0.9	1.0	-0.1	0.0	0.0
59.9994	0.001	0.9	1.0	-0.1	0.0	0.0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
59.30039	1.273	0.9	1.0	-0.1	0.0	0.0
59.29989	1.274	0.911	0.895	0.016	0.994	0.099

En la tabla 3.5 se aprecia que al transcurrir 1.274 segundos, la frecuencia del sistema alcanzó el valor inicial de corte del esquema. Esto implica que al realizar el tiro de carga correspondiente al primer escenario del esquema mostrado en la tabla 3.1, los pares del sistema varían. Así, se puede observar como el par de carga disminuyó al desconectar el 10% de carga del sistema; esta variación en los pares permitió que el balance carga-generación se recuperara casi en su totalidad, teniendo un desbalance de 0.016 pu. El par de carga que se tenía justo antes de realizar la desconexión ( $T_{LBLS}$ ) era de 0.994 pu ya que los pares varían con la frecuencia; por otra parte la carga tirada equivalente del sistema ( $LS_{EQ}$ ) fue de  $\approx 0.1$  pu que equivale al 10%.

Después de 60 segundos, el estado del sistema es el siguiente:

**Registro de resultados:**

**Tabla 3.6 Registro de resultados en 60 segundos.**

Frecuencia [Hz]	Tiempo [s]	$T_G$ [pu]	$T_L$ [pu]	$T_A$ [pu]	$T_{LBLS}$ [pu]	$LS_{EQ}$ [pu]
60.0	0.0	0.9	1.0	-0.1	0.0	0.0
59.9994	0.001	0.9	1.0	-0.1	0.0	0.0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
59.30039	1.273	0.9	1.0	-0.1	0.0	0.0
59.29989	1.274	0.911	0.895	0.016	0.994	0.099
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
59.9957	60.0	0.911	0.895	0.016	0.994	0.099

Desde una perspectiva general, los esquemas de tiro de carga tipo estáticos tienen la capacidad de recuperar la frecuencia ante un severo disturbio que provoque la disminución súbita de la misma. En el ejemplo anterior el esquema logró recuperar la frecuencia del sistema a un valor de 59.9957 Hz mediante un solo disparo y sin la acción del gobernador de velocidad como se aprecia en la tabla 3.6. La razón del excelente funcionamiento se debe a que la cantidad de carga desconectada en el primer escenario fue igual a la sobrecarga vista por el sistema; sin embargo, la

funcionalidad de estos esquemas está limitada por las incertidumbres presentes en el momento de la operación. Ya que al presentarse un disturbio en el cual la carga desconectada no permita la recuperación del balance carga-generación, el esquema puede terminar por no recuperar la frecuencia a un valor aceptable, incursionando en la zona de daño de las turbinas o puede desconectar más carga de la necesaria.

Como se puede observar en el diagrama de flujo de la Figura 3.1, la operación de los esquemas no considera las incertidumbres generadas por las frecuencias de disparo y por las cantidades de carga a desconectar en cada escenario. Estas incertidumbres no pueden contemplarse de manera directa debido a que se desconoce la cantidad de generación que podría salir de operación y por tanto, es incierta la cantidad de carga a desconectar en cada frecuencia de disparo.

### **3.4 DISEÑO DE ESQUEMAS DINÁMICOS DE TIRO DE CARGA POR BAJA FRECUENCIA A TRAVÉS DE UN FIS**

A diferencia de los esquemas estáticos, los esquemas difusos realizan el tiro de carga de manera dinámica. Es decir, no se cuenta con una tabla con escenarios de desconexión, donde para cada uno se especifica un porcentaje de carga a desconectar asociado a un nivel de frecuencia; sino que la determinación de carga a tirar se hace a través de un sistema de inferencia difuso. El FIS interpreta las incertidumbres del nivel de frecuencia y de su variación respecto a la frecuencia medida un milisegundo antes para determinar la cantidad de carga apropiada a desconectar ante diferentes contingencias. Por lo tanto, el esquema inteligente es el diseño del sistema de inferencia difuso.

#### **3.4.1 Diseño del Sistema de Inferencia Difuso para Tiro de Carga por Baja Frecuencia**

La toma de decisiones del esquema inteligente de tiro de carga se realiza a través de un FIS que está basado en el análisis del comportamiento de la frecuencia del sistema. Por lo tanto, las entradas que se van a analizar en el FIS serán el nivel de frecuencia  $f$  y el cambio de la misma  $\Delta f$ . Las etapas del proceso de diseño del FIS o esquema difuso son:

- Difusificación
- Base de reglas-mecanismo de inferencia
- Dedifusificación

En el apéndice C se detalla el proceso de selección y sintonización de las funciones de membresía de entrada y salida, así como los cambios pertinentes en la base de reglas.

### 3.4.1.1 Difusificación

La difusificación convierte los valores de entrada en conjuntos difusos a través de variables lingüísticas. El número adecuado de variables lingüísticas para las entradas debe ser tal que las funciones de membresía (FM) que representan a los conjuntos difusos queden traslapadas entre sí. Lo anterior tiene como objetivo que cualquier valor que tome la frecuencia y su variación respecto a la frecuencia anterior activen más de una FM a la vez; de esta manera se puede modelar la incertidumbre ya que un valor de entrada pertenece al mismo tiempo a dos o más conjuntos difusos.

Si se escoge un número pequeño de FM, el sistema de inferencia puede no operar de la mejor manera ya que se tendría poca información de entrada; es decir, pocas FM introducen una incertidumbre muy grande como en los casos de la lógica clásica o Aristotélica donde sólo existe *verdadero* y *falso*, perdiendo así flexibilidad en el manejo de incertidumbres. Por otra parte, si se elige un gran número de FM el sistema se vuelve casi nítido en su totalidad, puesto que se tendría prácticamente una FM para cada valor que pudiera tomar la entrada. Esta situación no daría lugar a la existencia de incertidumbres.

Para determinar el número adecuado de FM para la difusificación, es necesario tener un conocimiento previo del comportamiento de la frecuencia; en otras palabras, es prescindible saber cómo varía la frecuencia cada milisegundo desde el momento en que se presenta el disturbio hasta que se alcanza la frecuencia inicial de corte. Así, se realizaron varias simulaciones con diferentes niveles de pérdida de generación utilizando el programa de comportamiento de la frecuencia desarrollado en FORTRAN 90; que permite el uso de esquemas estáticos de tiro de carga. En la tabla 3.7 se reportan los resultados de los primeros cinco milisegundos de la simulación, así como los últimos cinco milisegundos antes de alcanzar la frecuencia inicial de disparo (59.3 Hz); además se muestra la variación en  $\text{Hz/s}$  que hay de una medición a otra.

**Tabla 3.7 Comportamiento de la frecuencia ante diferentes disturbios.**

Sobrecarga [%]	Frecuencia [Hz]	Tiempo [s]	Variación de frecuencia [Hz/s]
10	59.9994	0.001	
	59.9988	0.002	
	59.9982	0.003	-0.6
	59.9976	0.004	
	59.997	0.005	
	59.3019	1.27	
	59.3014	1.271	
	59.30089	1.272	-0.5
	59.30039	1.273	
	59.29989	1.274	

	59.9991	0.001	
	59.9982	0.002	
	59.9973	0.003	-0.9
	59.9964	0.004	
	59.9955	0.005	
15	59.30299	0.818	
	59.30219	0.819	
	59.30138	0.820	-0.8
	59.30058	0.821	
	59.29977	0.822	
	59.9988	0.001	
	59.9976	0.002	
	59.9964	0.003	-1.2
	59.9952	0.004	
	59.994	0.005	
20	59.30403	0.603	
	59.30293	0.604	
	59.30182	0.605	-1.1
	59.30071	0.606	
	59.29960	0.607	
	59.9985	0.001	
	59.997	0.002	
	59.9955	0.003	-1.5
	59.994	0.004	
	59.9925	0.005	
25	59.30541	0.477	
	59.304	0.478	
	59.30259	0.479	-1.4
	59.30117	0.48	
	59.29976	0.481	
	59.9982	0.001	
	59.9964	0.002	
	59.9946	0.003	-1.8
	59.9928	0.004	
	59.991	0.005	
30	59.30559	0.395	
	59.30387	0.396	
	59.30215	0.397	-1.7
	59.30044	0.398	
	59.29872	0.399	

35	59.9979	0.001	
	59.9958	0.002	
	59.9937	0.003	-2.1
	59.9916	0.004	
	59.9895	0.005	
	59.30786	0.336	
	59.30584	0.337	
	59.30382	0.338	-2
	59.30180	0.339	
	59.29978	0.34	
40	59.9976	0.001	
	59.9952	0.002	
	59.9928	0.003	-2.4
	59.9904	0.004	
	59.988	0.005	
	59.30801	0.293	
	59.30569	0.294	
	59.30336	0.295	-2.3
	59.30104	0.296	
	59.29872	0.297	

De acuerdo con los resultados de la tabla 3.7 se observa que la variación de la frecuencia tiene un comportamiento amortiguado como el que se muestra en la Figura 2.7; es decir, no disminuye en forma de pendiente ya que existe una variación de 1mHz entre la razón de cambio en los primeros milisegundos de la simulación y los últimos milisegundos antes de llegar a la frecuencia de disparo inicial para todos los disturbios. Esto indica un comportamiento típico de la frecuencia con pares de generación y carga variables. Se puede identificar una variación de frecuencia de 0.3 mHz por cada 5% de sobrecarga que percibe el sistema durante 1 ms; es decir, la frecuencia varía 0.3 Hz/s de un disturbio a otro.

Por otra parte se puede notar que la frecuencia disminuye con mayor rapidez si el disturbio es grande; siendo así 59.29872 Hz la frecuencia más baja que se alcanza para iniciar el primer disparo de carga en los casos de 30% y 40% de sobrecarga. Con base en los datos de la tabla 3.7 es posible fijar un número de FM para la frecuencia y para el cambio de frecuencia; sin embargo, es necesario realizar varias simulaciones para determinar el número apropiado de éstas. En el apéndice C se muestra la operación del esquema con diferentes FM de entrada, habiendo obtenido la mejor difusificación con cinco FM.

Por lo tanto se utilizarán cinco FM para los valores que pueda tomar la frecuencia y cinco FM para los valores que pueda tomar la variación de ésta respecto a su medición anterior en 1 milisegundo. Las FM para los valores centrales serán triangulares y para los valores extremos serán trapezoidales. Cada FM está definida por una expresión matemática que a su vez utiliza parámetros que la convierten en una función específica. Las funciones triangulares requieren tres parámetros para su construcción mientras que las funciones trapezoidales izquierda y derecha se construyen con dos parámetros. Las expresiones matemáticas y los parámetros que modelan a cada FM se detallan en el apéndice B, sección B.3.3.

#### *Funciones de membresía para la frecuencia*

Las dos primeras FM a definir son: alta y aceptable ya que son valores claramente definidos para la correcta operación del sistema:

**Alta:** FM trapezoidal derecha con parámetros (60.0, 60.2).

**Aceptable:** FM triangular con parámetros (59.8, 60.0, 60.2).

Posteriormente se sabe que un valor de frecuencia menor a 59.8 Hz es considerado bajo y que el valor más bajo para el primer disparo en los casos considerados en tabla 3.7 es de 59.29872 Hz; por lo tanto es conveniente poner una FM que abarque las frecuencias de disturbios de menor impacto, otra función que comprenda frecuencias de disturbios de mediano impacto y otra función que contemple los disturbios más severos o de alto impacto. De aquí se entiende la necesidad de agregar tres FM más, las cuales son:

**Baja:** FM triangular con parámetros (59.299, 59.3, 60).

**Muy Baja:** FM triangular con parámetros (59.298, 59.299, 59.3).

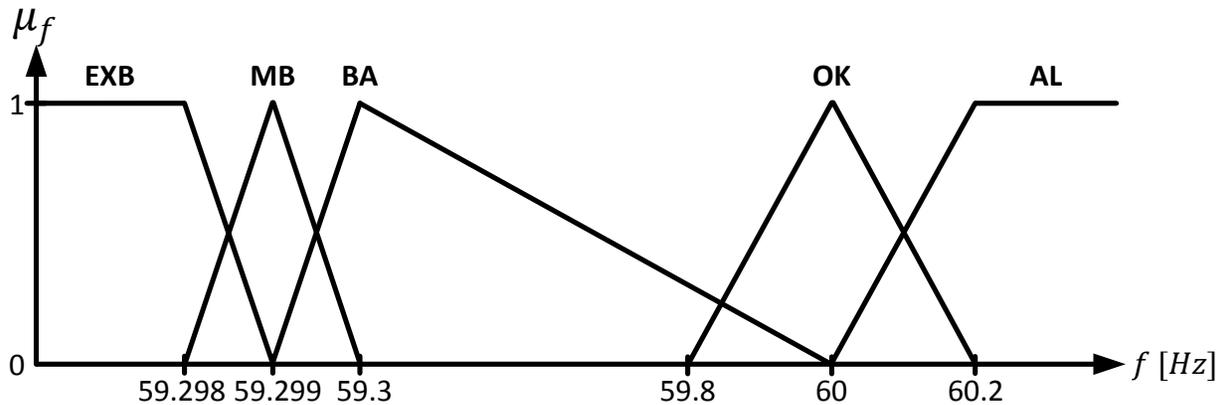
**Extremadamente Baja:** FM trapezoidal izquierda con parámetros ( 59.298, 59.299).

Las variables lingüísticas con que se identifican estas funciones de membresía se muestran en la tabla 3.8.

**Tabla 3.8 Variables lingüísticas para la frecuencia.**

Etiqueta	Variable lingüística
EXB	Extremadamente Baja
MB	Muy Baja
BA	Baja
OK	Aceptable
AL	Alta

En la Figura 3.2 se muestran las funciones de membresía para la difusificación de la frecuencia.



Como se puede observar en la Figura 3.2 las FM no son simétricas; esto se debe a que cada función cubre niveles de frecuencia correspondientes a diferentes sobrecargas como se describió en la definición de los parámetros de las FM.

*Funciones de membresía para el cambio de frecuencia:*

La variación de la frecuencia respecto a la frecuencia anterior está dada por:

$$\Delta f = f(i) - f(i - 1) \quad (3.26)$$

De tal forma que una variación positiva indica que la frecuencia se está recuperando mientras que una variación negativa indica que la frecuencia está decayendo.

Así entonces, las dos primeras FM a definir son: cero y positiva puesto que son valores fácilmente de delimitar.

**Positiva:** FM trapezoidal derecha con parámetros  $(0.0, 0.3 \times 10^{-3})$ .

**Cero:** FM triangular con parámetros  $(-0.9 \times 10^{-3}, 0.0, 0.3 \times 10^{-3})$ .

Las FM negativas al igual que las FM de frecuencia, deben cubrir las variaciones de disturbios bajos, medianos y severos. Por tanto, es necesario considerar tres FM negativas, las cuales deben traslaparse de acuerdo con las variaciones de la tabla 3.7 como se muestra a continuación:

**Negativa Pequeña:** FM triangular con parámetros  $(-1.8 \times 10^{-3}, -0.9 \times 10^{-3}, 0.0)$ .

**Negativa Mediana:** FM triangular con parámetros  $(-2.4 \times 10^{-3}, -1.8 \times 10^{-3}, -0.9 \times 10^{-3})$ .

**Negativa Grande:** FM trapezoidal izquierda con parámetros  $(-2.4 \times 10^{-3}, -1.8 \times 10^{-3})$ .

Las variables lingüísticas con que se identifican estas FM se muestran en la tabla 3.9.

**Tabla 3.9 Variables lingüísticas para la variación de frecuencia.**

Etiqueta	Variable lingüística
POS	Positiva
CE	Cero
NP	Negativa Pequeña
NM	Negativa Mediana
NG	Negativa Grande

En la Figura 3.3 se muestran las FM para la difusificación de la variación de la frecuencia.

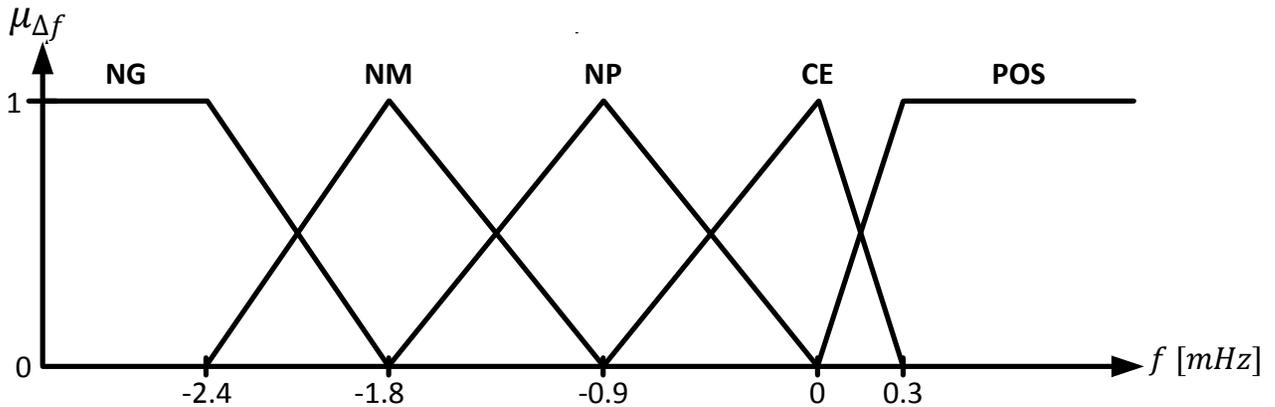


Figura 3.3 Funciones de membresía para difusificar la variación de frecuencia.

Para mostrar cómo se lleva a cabo la difusificación, se pueden tomar como datos de entrada los valores reportados en la tabla 3.7. Por ejemplo, para el disturbio en el cual el sistema percibe 10% de sobrecarga, se tiene un nivel de frecuencia de  $f = 59.29989 \text{ Hz}$  y una variación de  $\Delta f = -0.5 \text{ mHz}$  respecto a la medición de frecuencia en 1 ms anterior.

Estos valores de entrada activan a las FM **BA** y **MB** para la frecuencia; mientras que para la variación de frecuencia se activan las FM **CE** y **NP**. Los grados de pertenencia con que se activa cada conjunto difuso se calcula de acuerdo al tipo de FM y a la expresión matemática que la modela, en este caso todas son triangulares. En el apéndice B, sección B.3.3 se detallan las ecuaciones de cada FM para determinar su grado de activación. Entonces para este ejemplo la difusificación es:

*Difusificación de la frecuencia*

Función **BA**:

$$\text{activación} = \frac{59.29989 - 59.299}{59.3 - 59.299} = 0.891 \text{ grados de membresía} \quad (3.27)$$

Función **MB**:

$$\text{activación} = \frac{59.3 - 59.29989}{59.3 - 59.299} = 0.109 \text{ grados de membresía} \quad (3.28)$$

*Difusificación de la variación de la frecuencia*

Función **CE**:

$$\text{activación} = \frac{-0.5 - (-0.9)}{0 - (-0.9)} = 0.442 \text{ grados de membresía} \quad (3.29)$$

Función **NP**:

$$\text{activación} = \frac{59.3 - 59.29989}{59.3 - 59.299} = 0.558 \text{ grados de membresía} \quad (3.30)$$

### 3.4.1.2 Base de Reglas-Mecanismo de Inferencia

Hasta este punto el proceso de diseño del FIS se ha desarrollado únicamente con lógica difusa. Sin embargo, la base de reglas es una característica particular del sistema aditivo difuso; el cual utiliza razonamiento difuso para evaluarla y un método de dedifusificación para obtener un resultado nítido. En el apéndice B se detalla el diseño de un FIS a través de éstas dos técnicas inteligentes.

La base de reglas es un conjunto de reglas de inferencia difusa tipo *si-entonces* que contiene la información necesaria para realizar la toma de decisiones. Estas reglas son diseñadas por una persona o grupo de personas que transfieren su conocimiento acerca del comportamiento de un sistema en específico a través de este tipo de instrucciones. Para tomar acciones adecuadas en la recuperación de la frecuencia, las reglas de inferencia difusa deben contemplar en sus premisas todas las características que se presentan en el comportamiento de la frecuencia durante una contingencia; y en sus conclusiones la cantidad adecuada de carga a desconectar (*LS*) para corregir tal efecto que se tiene sobre la frecuencia.

Por tal motivo, es necesario definir las acciones de tiro de carga mediante conjuntos difusos. Esto se debe a que también en la desconexión de carga se presentan incertidumbres que no pueden manejarse en forma nítida. El número de FM para la salida del sistema debe ser tal que se contemplen cantidades de carga a desconectar desde nulas hasta las más severas, pasando por cantidades intermedias con el fin de obtener flexibilidad en el tiro de carga a diferentes niveles de frecuencia.

Las primeras FM que se determinan para el tiro de carga corresponden a los casos extremos en la toma de decisiones; es decir, una acción *nula* con 0% de desconexión de carga y un tiro de carga *alto*, el cual desconecta 40% de carga para el caso más severo. El resto de FM se divide en dos grupos, uno debe colaborar en la desconexión de cargas grandes para contingencias severas, y el otro debe permitir la desconexión de pequeñas cantidades de carga para reducir las incertidumbres que se tienen cuando el balance carga-generación se haya recuperado casi en su totalidad.

Para ello, las cargas grandes y relativamente grandes a desconectar se delimitan mediante dos FM que realizan un tiro de carga *mediano* y uno *bajo*. Por otra parte, se definen dos FM más para el manejo de cargas pequeñas; estas funciones logran realizar un tiro de carga *muy bajo* y otro *extremadamente bajo*. En la tabla 3.10 se pueden observar las acciones de tiro de carga, donde las cantidades de carga a desconectar se eligieron en forma arbitraria para después ajustarlas mediante la operación del FIS.

**Tabla 3.10 Acciones de tiro de carga mediante variables lingüísticas para la salida.**

Etiqueta	Variable lingüística	Carga a desconectar (LS) [%]
NA	Nada	0
EXB	Extremadamente Bajo	1
MB	Muy Bajo	15
BA	Bajo	20
ME	Mediano	30
AL	Alto	40

Las reglas difusas totales que conforman la base de reglas es igual al producto del total de membresías de las entradas; es decir, para este caso son necesarias 25 reglas difusas. De acuerdo con el conocimiento acerca del comportamiento de la frecuencia ante un disturbio mostrado en el capítulo 2 y detallado en la sección 3.4.1.1 de este capítulo, las reglas de inferencia difusa se pueden definir valiéndose de la Figura 3.4

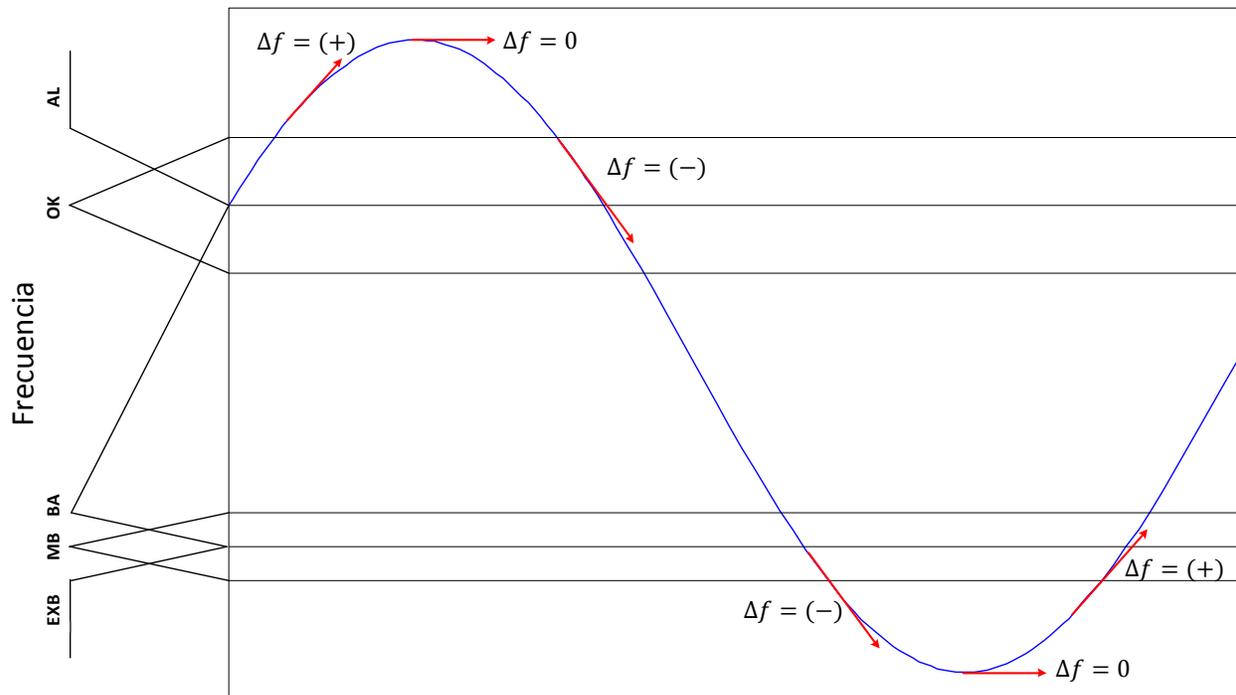


Figura 3.4 Comportamiento de la frecuencia en relación a su nivel y variación.

La Figura 3.4 muestra el comportamiento de la frecuencia en relación a su nivel y a la tendencia de variación que presenta para una situación determinada. Ésta figura se puede interpretar de la siguiente manera:

*Para un determinado valor difuso de  $f$  y  $\Delta f$ , la frecuencia tiende a comportarse de una manera en específico y por tanto, ésta se puede corregir mediante la desconexión de cierta carga. La carga desconectar puede ser una de las seis acciones de tiro de carga.*

Por ejemplo: si la frecuencia es *baja* y la variación es *positiva*, es un indicador de que la frecuencia se está recuperando; por consiguiente la carga a desconectar es *nada*. Por otro lado, si la frecuencia es *baja* y la variación es *negativa mediana*, significa que la frecuencia está disminuyendo a una velocidad considerable. Esta situación puede corregirse con un tiro de carga *mediano*. De esta manera, se pueden definir las siguientes reglas difusas:

- Si  $\langle f \rangle$  es  $\langle EXB \rangle$  &  $\langle \Delta f \rangle$  es  $\langle NG \rangle$  entonces  $\langle LS \rangle$  es  $\langle AL \rangle$
- Si  $\langle f \rangle$  es  $\langle EXB \rangle$  &  $\langle \Delta f \rangle$  es  $\langle NM \rangle$  entonces  $\langle LS \rangle$  es  $\langle ME \rangle$
- Si  $\langle f \rangle$  es  $\langle EXB \rangle$  &  $\langle \Delta f \rangle$  es  $\langle NP \rangle$  entonces  $\langle LS \rangle$  es  $\langle MB \rangle$
- Si  $\langle f \rangle$  es  $\langle EXB \rangle$  &  $\langle \Delta f \rangle$  es  $\langle CE \rangle$  entonces  $\langle LS \rangle$  es  $\langle EXB \rangle$
- Si  $\langle f \rangle$  es  $\langle EXB \rangle$  &  $\langle \Delta f \rangle$  es  $\langle POS \rangle$  entonces  $\langle LS \rangle$  es  $\langle NA \rangle$

*Si* « *f* » es « *MB* » & «  $\Delta f$  » es « *NG* » entonces « *LS* » es « *AL* »  
*Si* « *f* » es « *MB* » & «  $\Delta f$  » es « *NM* » entonces « *LS* » es « *ME* »  
*Si* « *f* » es « *MB* » & «  $\Delta f$  » es « *NP* » entonces « *LS* » es « *BA* »  
*Si* « *f* » es « *MB* » & «  $\Delta f$  » es « *CE* » entonces « *LS* » es « *EXB* »  
*Si* « *f* » es « *MB* » & «  $\Delta f$  » es « *POS* » entonces « *LS* » es « *NA* »

*Si* « *f* » es « *BA* » & «  $\Delta f$  » es « *NG* » entonces « *LS* » es « *ME* »  
*Si* « *f* » es « *BA* » & «  $\Delta f$  » es « *NM* » entonces « *LS* » es « *ME* »  
*Si* « *f* » es « *BA* » & «  $\Delta f$  » es « *NP* » entonces « *LS* » es « *MB* »  
*Si* « *f* » es « *BA* » & «  $\Delta f$  » es « *CE* » entonces « *LS* » es « *EXB* »  
*Si* « *f* » es « *BA* » & «  $\Delta f$  » es « *POS* » entonces « *LS* » es « *NA* »

*Si* « *f* » es « *OK* » & «  $\Delta f$  » es « *NG* » entonces « *LS* » es « *MB* »  
*Si* « *f* » es « *OK* » & «  $\Delta f$  » es « *NM* » entonces « *LS* » es « *EXB* »  
*Si* « *f* » es « *OK* » & «  $\Delta f$  » es « *NP* » entonces « *LS* » es « *EXB* »  
*Si* « *f* » es « *OK* » & «  $\Delta f$  » es « *CE* » entonces « *LS* » es « *NA* »  
*Si* « *f* » es « *OK* » & «  $\Delta f$  » es « *POS* » entonces « *LS* » es « *NA* »

*Si* « *f* » es « *AL* » & «  $\Delta f$  » es « *NG* » entonces « *LS* » es « *NA* »  
*Si* « *f* » es « *AL* » & «  $\Delta f$  » es « *NM* » entonces « *LS* » es « *NA* »  
*Si* « *f* » es « *AL* » & «  $\Delta f$  » es « *NP* » entonces « *LS* » es « *NA* »  
*Si* « *f* » es « *AL* » & «  $\Delta f$  » es « *CE* » entonces « *LS* » es « *NA* »  
*Si* « *f* » es « *AL* » & «  $\Delta f$  » es « *POS* » entonces « *LS* » es « *NA* »

Estas 25 reglas difusas construyen la base de reglas que se aprecia en la Figura 3.5.

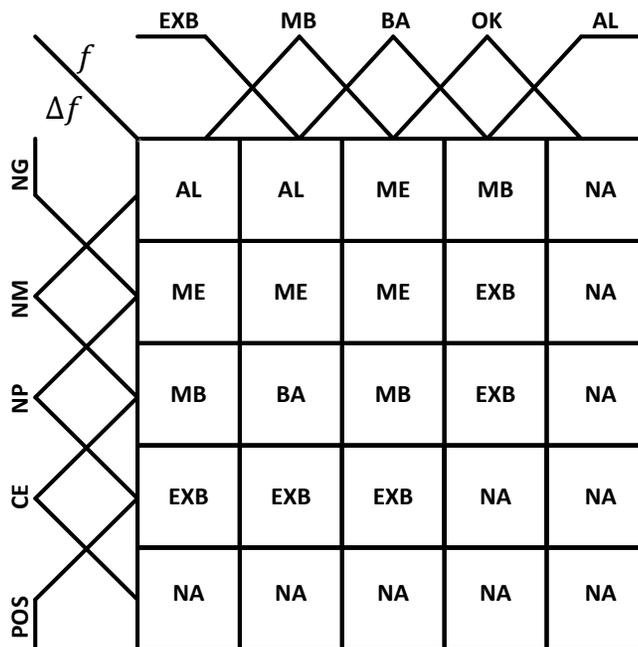


Figura 3.5 Base de reglas.

El mecanismo de inferencia es el encargado de evaluar la base de reglas. La elección de la acción de tiro de carga está basada en la composición *mín – máx*, de tal forma que el valor mínimo se obtiene de la comparación de cada FM de frecuencia activada respecto a cada FM de variación de frecuencia activada. Es decir, si durante la difusificación se activaron dos membresías de frecuencia y dos membresías de variación de frecuencia, se compara una membresía de frecuencia con una membresía de variación de frecuencia y el valor mínimo entre ellas es el grado de activación de la FM de tiro de carga que relaciona a ambas entradas en la tabla de reglas. Esta operación se realiza hasta comparar todas las membresías de frecuencia con todas las membresías de variación de frecuencia. Para el ejemplo anterior, la evaluación de la base de reglas de la Figura 3.5 de acuerdo a los valores difusos de entrada es la siguiente:

$$\text{mín}(BA, CE) = \text{mín}(0.891, 0.442) = 0.442 \text{ grados de membresía EXB} \quad (3.31)$$

$$\text{mín}(BA, NP) = \text{mín}(0.891, 0.558) = 0.558 \text{ grados de membresía MB} \quad (3.32)$$

$$\text{mín}(MB, CE) = \text{mín}(0.109, 0.442) = 0.109 \text{ grados de membresía EXB} \quad (3.33)$$

$$\text{mín}(MB, NP) = \text{mín}(0.109, 0.558) = 0.109 \text{ grados de membresía BA} \quad (3.34)$$

Como se puede observar en las ecuaciones (3.31) y (3.33), ambas activan la membresía **EXB** para el tiro de carga con diferentes grados de pertenencia. Para determinar el valor con que se activa dicha función de membresía se utiliza la composición *máx*; es decir:

$$\text{máx}(0.442, 0.109) = 0.442 \text{ grados de membresía EXB} \quad (3.35)$$

Como resultado de la evaluación de la base de reglas a través del mecanismo de inferencia, los grados de activación de las acciones de tiro de carga son los que se muestran en (3.32), (3.34) y (3.35).

### **3.4.1.3 Dedifusificación**

La dedifusificación es el proceso mediante el cual los resultados de la evaluación de la base de reglas se transforman en un resultado nítido o numérico. Existen diferentes métodos de dedifusificación; sin embargo, uno de los más ampliamente utilizados es el método del centro de área o gravedad, comúnmente conocido como centroide. Este método es utilizado por el sistema aditivo difuso y consiste en encontrar el centro de gravedad del total de activaciones de las funciones de

membresía de salida e indica la cantidad de carga exacta a tirar. A través de la ecuación (3.36) se puede encontrar el centroide.

$$\%LS = \frac{\sum_{i=1}^l LS_i \cdot \mu_{LS}(LS_i)}{\sum_{i=1}^l \mu_{LS}(LS_i)} \quad (3.36)$$

Donde:

$\%LS$  Carga a desconectar [%].

$LS_i$  Porcentaje de carga a desconectar definido para cada función de membresía.

$\mu_{LS}(LS_i)$  Grado de activación para cada función de membresía.

Las funciones de membresía convenientes para la salida son tipo Singletón debido al tipo de dedifusificación que se emplea. En la Figura 3.6 se aprecia este tipo de membresías con los grados de activación determinados en el ejemplo que se ha venido desarrollando en el proceso difuso.

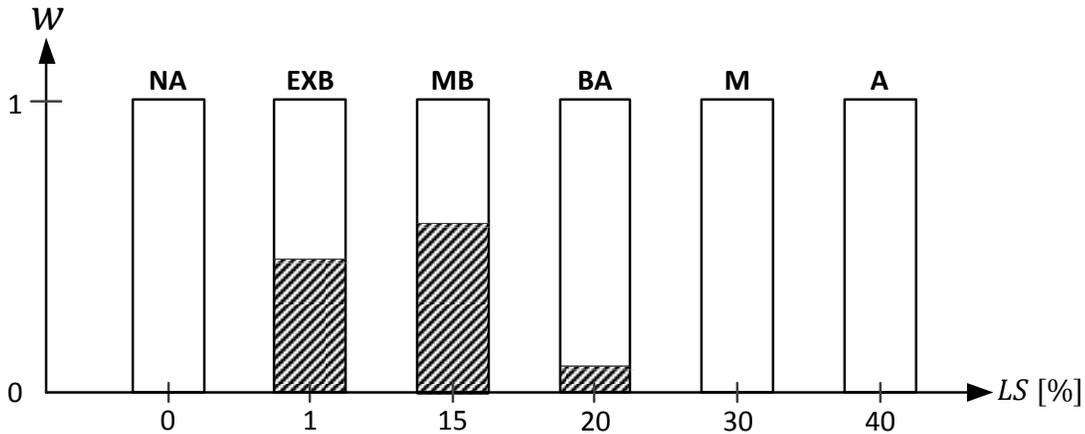


Figura 3.6 Funciones de membresía de salida tipo Singletón.

La dedifusificación del ejemplo es:

$$\%LS = \frac{(1 \times 0.442) + (15 \times 0.558) + (20 \times 0.109)}{0.442 + 0.558 + 0.109} = 9.91\% \quad (3.37)$$

De esta manera se puede decir que para una contingencia que provoca 10% de sobrecarga, el sistema difuso decide desconectar 9.91% de carga del SEP con base en el comportamiento de la frecuencia.

### 3.4.2 Metodología para el Diseño de Esquemas Difusos de Tiro de Carga

De acuerdo con el diseño del FIS mostrado en la sección 3.4.1 y sus subsecciones, se puede establecer una metodología para diseñar esquemas dinámicos de tipo difuso para tiro de carga por baja frecuencia a través del diagrama de flujo de la Figura 3.7.

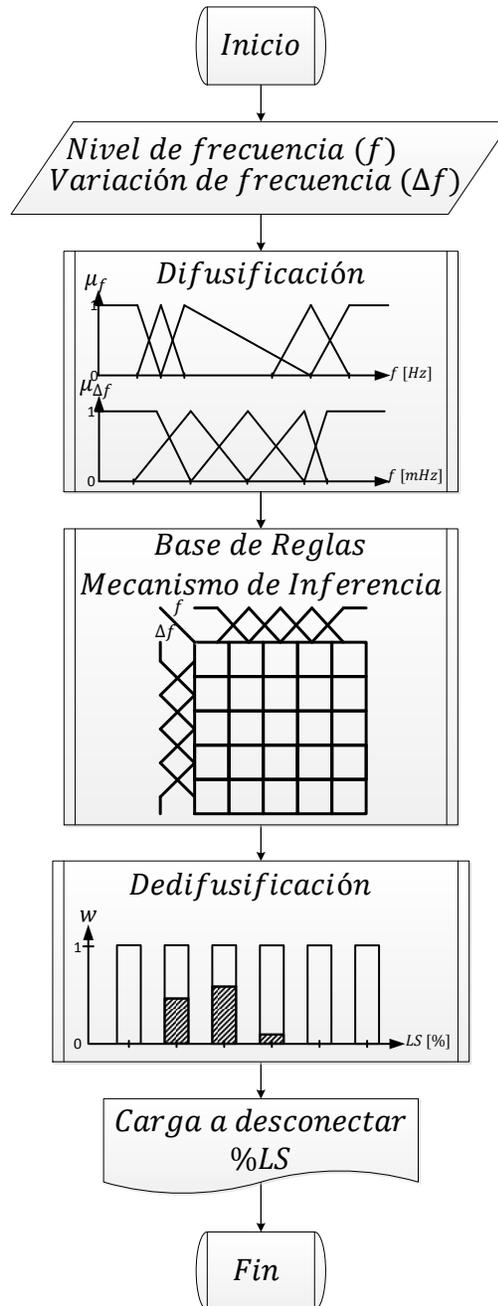


Figura 3.7 Metodología para el diseño de un esquema difuso de tiro de carga por baja frecuencia (FIS).

Como se puede observar en la Figura 3.7, el sistema difuso únicamente requiere un valor de frecuencia en Hz y un valor de variación de frecuencia en mHz respecto a la medición anterior en 1 ms para determinar la cantidad adecuada de carga a desconectar dependiendo del disturbio. Este FIS contempla tanto las incertidumbres presentes en los valores de entrada como las incertidumbres en las cantidades de carga a desconectar en las salidas; mismas que pueden ser vistas como diferentes escenarios de desconexión.

La sintonización de las FM de las entradas, las reglas difusas tipo sí-entonces y los porcentajes de carga a desconectar son definidos previamente por un experto en el área. Para este caso, las FM de entrada fueron ajustadas de acuerdo al comportamiento de la frecuencia ante diferentes magnitudes de disturbio. La base de reglas se elaboró con base en el conocimiento de la velocidad con que decae o se recupera la frecuencia a ciertos niveles difusos de frecuencia. Por otra parte, los porcentajes de carga a desconectar fueron elegidos de manera ascendente y arbitraria hasta un valor máximo de 40%. Estos valores posteriormente se pueden corregir a través de diferentes simulaciones del FIS para obtener una mejor operación del esquema difuso.

La combinación de las dos técnicas de inteligencia artificial que dan origen al sistema de inferencia difuso permite tomar acciones de control remedial para recuperar la estabilidad de frecuencia del sistema una vez que ésta se perdió por condiciones de pérdida de generación. De esta forma se pretende recobrar en forma más eficiente el valor de frecuencia con la menor intervención del gobernador de velocidad; es decir, se pretende recuperar el valor de frecuencia en la mayoría de los casos únicamente a través de los disparos del esquema remedial.

### **3.5 ANÁLISIS DE LA FRECUENCIA EN ESTADO DE EMERGENCIA MEDIANTE LA OPERACIÓN DE UN ESQUEMA DIFUSO DE TIRO DE CARGA**

Un programa dinámico de tiro carga por baja frecuencia se puede desarrollar al aplicar el sistema de inferencia difuso. El objetivo de incluir esta técnica inteligente es interpretar las incertidumbres involucradas en la operación del esquema remedial ante cualquier disturbio para lograr un tiro de carga adecuado; y así obtener un comportamiento de frecuencia que no sea perjudicial para el SEP. El diagrama de flujo de la Figura 3.8 muestra la lógica de operación de un esquema dinámico de tipo difuso para tiro de carga por baja frecuencia. Este programa se codificó en FORTRAN 90 y permite obtener el comportamiento de la frecuencia en estado de emergencia a través de la operación de este tipo de esquemas; la nomenclatura utilizada se detalla en el apéndice D.

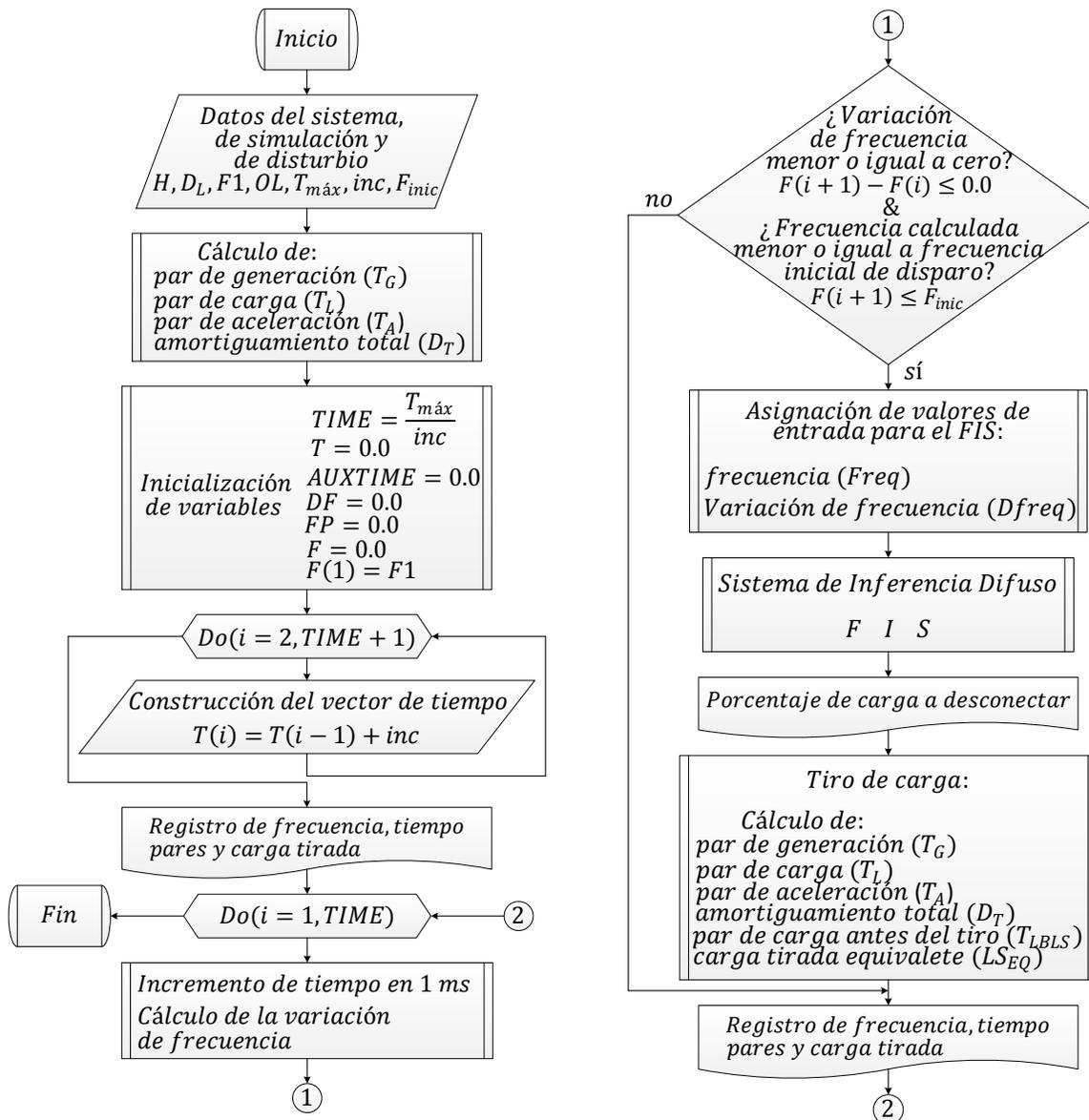


Figura 3.8 Lógica de operación de un esquema dinámico de desconexión de carga por baja frecuencia.

Como se puede observar en la Figura 3.8, el sistema de inferencia difuso sustituye al esquema convencional. De esta manera el FIS se convierte en un esquema dinámico ya que a través de sus membresías de entrada y salida, así como de la evaluación de su base de reglas, se obtiene la cantidad de carga necesaria a desconectar para cada evento. Por lo tanto, se pueden probar diversos esquemas al cambiar la base de reglas y/o los valores de las membresías para llegar a un esquema que responda de la mejor manera a todos los disturbios.

La operación de este programa de tiro de carga basado en el diagrama de flujo de la Figura 3.8 se detalla a continuación con el fin de observar el comportamiento de la frecuencia en estado de emergencia a través de la operación de un esquema difuso.

**Datos:**

- Datos del sistema [7]:

Inercia  $H = 5$   
 Amortiguamiento de carga  $D_L = 1.5$   
 Frecuencia nominal  $F1 = 60 \text{ Hz}$

- Datos de simulación:

Tiempo máximo de simulación  $T_{m\acute{a}x} = 60 \text{ s}$   
 Incremento de tiempo  $inc = 1 \text{ ms}$

- Datos de disturbio:

Sobrecarga vista por el sistema  $OL = 10\%$   
 Frecuencia inicial de corte  $F_{inic} = 59.3 \text{ Hz}$

**Cálculos:**

Par de generación inicial:

$$T_G = 1.0 - \left(\frac{OL}{100.0}\right) = 1.0 - \left(\frac{10}{100}\right) = 0.9 \text{ pu} \quad (3.38)$$

Par de carga inicial:

$$T_L = 1.0 \text{ pu} \quad (3.39)$$

Par de aceleración:

$$T_A = T_G - T_L = 0.9 - 1.0 = -0.1 \text{ pu} \quad (3.40)$$

Factor de amortiguamiento total:

$$D_T = T_G + (D_L - 1)T_L = 0.9 + (1.5 - 1.0) \times 1.0 = 1.4 \text{ pu} \quad (3.41)$$

**Inicialización de variables:**

$$TIME = \frac{T_{m\acute{a}x}}{inc} = \frac{60}{0.001} = 60000 \quad (3.42)$$

Construcción de vectores:

$$ALLOCATE(T(TIME + 1), F(TIME + 1), FP(TIME))$$

$T(TIME + 1)$  Vector para el tiempo. En este vector se almacena el tiempo de simulación desde el tiempo inicial hasta el tiempo final con su respectivo incremento en cada localidad, donde la localidad 1 almacena el tiempo =0s.

$F(TIME + 1)$  y  $FP(TIME)$  Vector para la frecuencia del sistema en Hz y para las variaciones de frecuencia en pu respectivamente. En cada localidad se almacena un valor de la variable correspondiente por cada milisegundo que transcurre de la simulación.

- $T = 0.0$  Se inicializa el vector de tiempo en cero. Este vector contiene el tiempo total de simulación.
- $AUXTIME = 0.0$  La variable AUXTIME se inicializa en cero. Esta variable se resetea cada que el esquema realiza un disparo.
- $F = 0.0$  Se inicializa el vector de frecuencia en cero y se le asigna el valor de la frecuencia nominal a la primera localidad.
- $F(1) = 60.0$
- $FP = 0.0$  Se inicializa el vector FP en cero. En este vector se guarda el valor de la variación de frecuencia en pu.
- $DF = 0.0$  Se inicializa la variable DF en cero. En ésta variable se guarda el valor de la variación de frecuencia en Hz

**Construcción del vector de tiempo:**

$$T = \begin{bmatrix} 0.0 \\ 0.001 \\ \vdots \\ 60.0 \end{bmatrix} \quad (3.43)$$

**Registro de resultados:**

**Tabla 3.11 Registro de resultados al iniciar la simulación.**

Frecuencia [Hz]	Tiempo [s]	$T_G$ [pu]	$T_L$ [pu]	$T_A$ [pu]	$T_{LBLS}$ [pu]	$LS_{EQ}$ [pu]
60.0	0.0	0.9	1.0	-0.1	0.0	0.0

En la tabla 3.11 se puede observar que se está analizando el mismo disturbio que se estudió en la sección 3.3 de éste capítulo. Se aprecia que se tiene un par de generación ( $T_G$ ) de 0.9 pu respecto de un par de carga ( $T_L$ ) de 1.0 pu debido a la sobrecarga de 10% que se presenta como consecuencia de la pérdida de generación. El par de aceleración del sistema ( $T_A$ ) es un indicador del desbalance que se tiene entre carga y generación.

**Incremento de tiempo y variación de frecuencia:**

Incremento de tiempo:

$$AUXTIME = 0.001 \text{ s} \quad (3.44)$$

Cálculo de la variación de frecuencia en pu:

$$FP(1) = \frac{T_A}{D_T} \left( 1.0 - e^{-\frac{D_T}{2H} AUXTIME} \right) = \frac{-0.1}{1.4} \left( 1.0 - e^{-\frac{1.4}{2.0 \times 5.0} 0.001} \right) = -9.9992 \times 10^{-6} \text{ pu} \quad (3.45)$$

Cálculo de la variación de frecuencia en Hz durante 1 ms:

$$DF = FP(1) \times F(1) = (-9.9992 \times 10^{-6})(60.0) = -5.9995 \times 10^{-4} \text{ Hz} \quad (3.46)$$

Cálculo de la nueva frecuencia en Hz:

$$F(2) = F(1) + DF = 60.0 + (-5.9995 \times 10^{-4}) = 59.9994 \text{ Hz} \quad (3.47)$$

**Condicional de operación del esquema:**

¿La variación de frecuencia es menor o igual a cero?

$$59.9994 - 60.0 \leq 0.0 \rightarrow \text{SÍ}$$

$$-0.6 \times 10^{-3} \leq 0.0 \rightarrow \text{SÍ}$$

y

¿La frecuencia calculada es menor o igual a la frecuencia inicial de disparo?

$$59.9994 \leq 59.3 \rightarrow \text{NO}$$

Como no se cumplieron ambos condicionales:

**Registro de resultados:**

**Tabla 3.12 Registro de resultados en 0.001 segundos.**

Frecuencia [Hz]	Tiempo [s]	T <sub>G</sub> [pu]	T <sub>L</sub> [pu]	T <sub>A</sub> [pu]	T <sub>LBLS</sub> [pu]	LS <sub>EQ</sub> [pu]
60.0	0.0	0.9	1.0	-0.1	0.0	0.0
59.9994	0.001	0.9	1.0	-0.1	0.0	0.0

En la tabla 3.12 se puede apreciar que después de 1 milisegundo de ocurrido el disturbio, la frecuencia ha caído a 59.9994 Hz mientras que los pares del sistema permanecen con el desbalance debido a la pérdida de generación. En la tabla 3.13 se observa el nivel de frecuencia después de transcurrir 1.273 segundos.

**Registro de resultados:**

**Tabla 3.13 Registro de resultados en 1.273 segundos.**

Frecuencia [Hz]	Tiempo [s]	T <sub>G</sub> [pu]	T <sub>L</sub> [pu]	T <sub>A</sub> [pu]	T <sub>L</sub> BLS [pu]	LS <sub>EQ</sub> [pu]
60.0	0.0	0.9	1.0	-0.1	0.0	0.0
59.9994	0.001	0.9	1.0	-0.1	0.0	0.0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
59.30039	1.273	0.9	1.0	-0.1	0.0	0.0

La tabla 3.13 muestra que el comportamiento de la frecuencia continua siendo descendente hasta alcanzar un valor muy cercano a la frecuencia inicial de disparo. Esto implica que cuando la frecuencia alcance los 59.3 Hz o un valor menor; el FIS recibirá en sus entradas el valor de frecuencia y su variación respecto de la medición registrada un milisegundo antes.

**Incremento de tiempo y variación de frecuencia:**

Incremento de tiempo:

$$AUXTIME = 1.274 \text{ s} \quad (3.48)$$

Cálculo de la variación de frecuencia en pu:

$$FP(1274) = \frac{T_A}{D_T} \left( 1.0 - e^{-\frac{D_T T}{2H}} \right) = \frac{-0.1}{1.4} \left( 1.0 - e^{-\frac{1.4}{2.0 \times 5.0} 1.274} \right) = -11.668487 \times 10^{-3} \text{ pu} \quad (3.49)$$

Cálculo de la variación de frecuencia en Hz durante 1 ms:

$$DF = FP(1274) \times F(1) = (-11.66012 \times 10^{-3})(60.0) = -0.700109 \text{ Hz} \quad (3.50)$$

Cálculo de la nueva frecuencia en Hz:

$$F(1275) = F(1) + DF = 60.0 + (-0.700109) = 59.29989 \text{ Hz} \quad (3.51)$$

**Condición de operación del esquema:**

¿La variación de frecuencia es menor o igual a cero?

$$59.29989 - 59.30039 \leq 0.0 \rightarrow \text{SÍ}$$

$$-0.5 \times 10^{-3} \leq 0.0 \rightarrow \text{SÍ}$$

y

¿La frecuencia calculada es menor o igual a la frecuencia inicial de disparo?

$$59.29989 \leq 59.3 \rightarrow \text{SÍ}$$

Como ambos condicionales se cumplieron:

**Asignación de valores de entrada para el FIS:**

$$FREQ = F(1275) = 59.29989 \text{ Hz} \quad (3.52)$$

$$DFREQ = F(1275) - F(1274) = 59.29989 - 59.30039 = -0.5 \times 10^{-3} \text{ Hz} \quad (3.53)$$

**Operación del FIS:**

De acuerdo al esquema difuso desarrollado en la sección 3.4, la cantidad de carga adecuada a desconectar para una sobrecarga de 10% es:

$$LS = 9.91\% \quad (3.54)$$

**Tiro de carga:**

Al realizar el tiro de carga correspondiente a 9.91%, los pares se modifican de la siguiente manera:

Par de carga antes del tiro:

$$T_{LBS} = T_L [1.0 + (D_L - 1.0)FP(1274)] = 1.0 [1.0 + (1.5 - 1.0) \times -11.6684 \times 10^{-3}] = 0.994 \text{ pu} \quad (3.55)$$

Carga tirada equivalente:

$$LS_{EQ} = \frac{CRISPLS}{100.0} [1.0 + (D_L - 1.0)FP(1274)]$$

$$LS_{EQ} = 0.0991[1.0 + (1.5 - 1.0) \times -11.6684 \times 10^{-3}] = 0.09 \text{ pu} \quad (3.56)$$

Par de carga nuevo:

$$T_L = T_{LBLS} - LS_{EQ} = 0.9941 - 0.0985 = 0.895 \text{ pu} \quad (3.57)$$

Par de generación nuevo:

$$T_G = T_G(1.0 - FP(1274)) = 0.9(1.0 - (-11.668487 \times 10^{-3})) = 0.911 \text{ pu} \quad (3.58)$$

Par de aceleración nuevo:

$$T_A = T_G - T_L = 0.911 - 0.895 = 0.016 \text{ pu} \quad (3.59)$$

Factor de amortiguamiento total nuevo:

$$D_T = T_G + (D_L - 1)T_L = 0.911 + (1.5 - 1.0) \times 0.895 = 1.359 \text{ pu} \quad (3.60)$$

**Registro de resultados:**

**Tabla 3.14 Registro de resultados en 1.274 segundos.**

Frecuencia [Hz]	Tiempo [s]	T <sub>G</sub> [pu]	T <sub>L</sub> [pu]	T <sub>A</sub> [pu]	T <sub>LBLS</sub> [pu]	LS <sub>EQ</sub> [pu]
60.0	0.0	0.9	1.0	-0.1	0.0	0.0
59.9994	0.001	0.9	1.0	-0.1	0.0	0.0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
59.30039	1.273	0.9	1.0	-0.1	0.0	0.0
59.29989	1.274	0.911	0.895	0.016	0.994	0.099

En la tabla 3.14 se aprecia que el esquema difuso realizó un disparo de carga ya que la frecuencia del sistema alcanzó un valor menor a la frecuencia inicial de disparo en 1.274 segundos. El FIS a través de la evaluación de las incertidumbres desconectó una cantidad de carga muy cercana al valor de sobrecarga; es decir, el esquema difuso desconectó 9.91% de carga para una contingencia de 10% de sobrecarga. Así mismo, se observa que los pares de generación y carga casi recuperaron su balance. El valor final de la frecuencia después de transcurrir 60 segundos se muestra en la tabla 3.15.

**Registro de resultados:****Tabla 3.15 Registro de resultados en 60 segundos.**

Frecuencia [Hz]	Tiempo [s]	T <sub>G</sub> [pu]	T <sub>L</sub> [pu]	T <sub>A</sub> [pu]	T <sub>LBLS</sub> [pu]	LS <sub>EQ</sub> [pu]
60.0	0.0	0.9	1.0	-0.1	0.0	0.0
59.9994	0.001	0.9	1.0	-0.1	0.0	0.0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
59.30039	1.273	0.9	1.0	-0.1	0.0	0.0
59.29989	1.274	0.911	0.895	0.016	0.994	0.099
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
59.95651	60.0	0.911	0.895	0.016	0.994	0.099

La tabla 3.15 muestra que para este ejemplo la frecuencia se recuperó casi al mismo nivel con ambos esquemas (convencional y difuso); sin embargo el esquema convencional recuperó mejor la frecuencia por centésimas de Hertz. Esto se debe a que el esquema convencional desconectó el mismo valor de carga que la sobrecarga en el sistema; mientras que el esquema difuso determinó dinámicamente un valor muy aproximado. A diferencia de los esquemas estáticos, los esquemas dinámicos de tipo difuso tienen la capacidad de tomar decisiones de acuerdo a lo establecido en la base de reglas. Por lo tanto, si la base de reglas está diseñada correctamente con base en el conocimiento de un experto y las membresías se sintonizan adecuadamente, un esquema dinámico puede brindar una operación mejor que un esquema convencional.

Esto indica que al considerar las incertidumbres del sistema, el esquema puede determinar con gran aproximación la cantidad de carga a desconectar. Así mismo la eficiencia y superioridad de este tipo de esquemas se nota cuando se simulan diferentes contingencias con un mismo esquema; puesto que al considerar las incertidumbres siempre se obtendrá la carga adecuada a desconectar mientras que un esquema convencional puede desconectar mayor o menor carga de la requerida.

### **3.6 METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO DE ESQUEMAS ESTÁTICOS DE TIRO DE CARGA POR BAJA FRECUENCIA A PARTIR DE UN ESQUEMA DIFUSO**

De acuerdo con las Figuras 2.10 y 3.7 se puede establecer una metodología para el diseño de esquemas estáticos que contemplen de manera implícita las incertidumbres del proceso de desconexión de carga. Así entonces, para poder diseñar un esquema estático que desconecte la cantidad de carga más apropiada en cada paso, es necesario considerar un esquema difuso. Ya que éste puede modelar las incertidumbres en el tiro de carga a través de su base de reglas y de su mecanismo de

inferencia cuando se alcanza el nivel de frecuencia de disparo para una contingencia determinada. Por lo tanto, en la Figura 3.9 se establece una metodología para el diseño de esquemas estáticos con éstas características; la cual que consiste en diseñar un esquema dinámico tipo difuso y con base en las decisiones que éste toma para contingencias de interés en específico, determinar el número de pasos y porcentajes de desconexión de carga de cada escenario para un esquema estático.

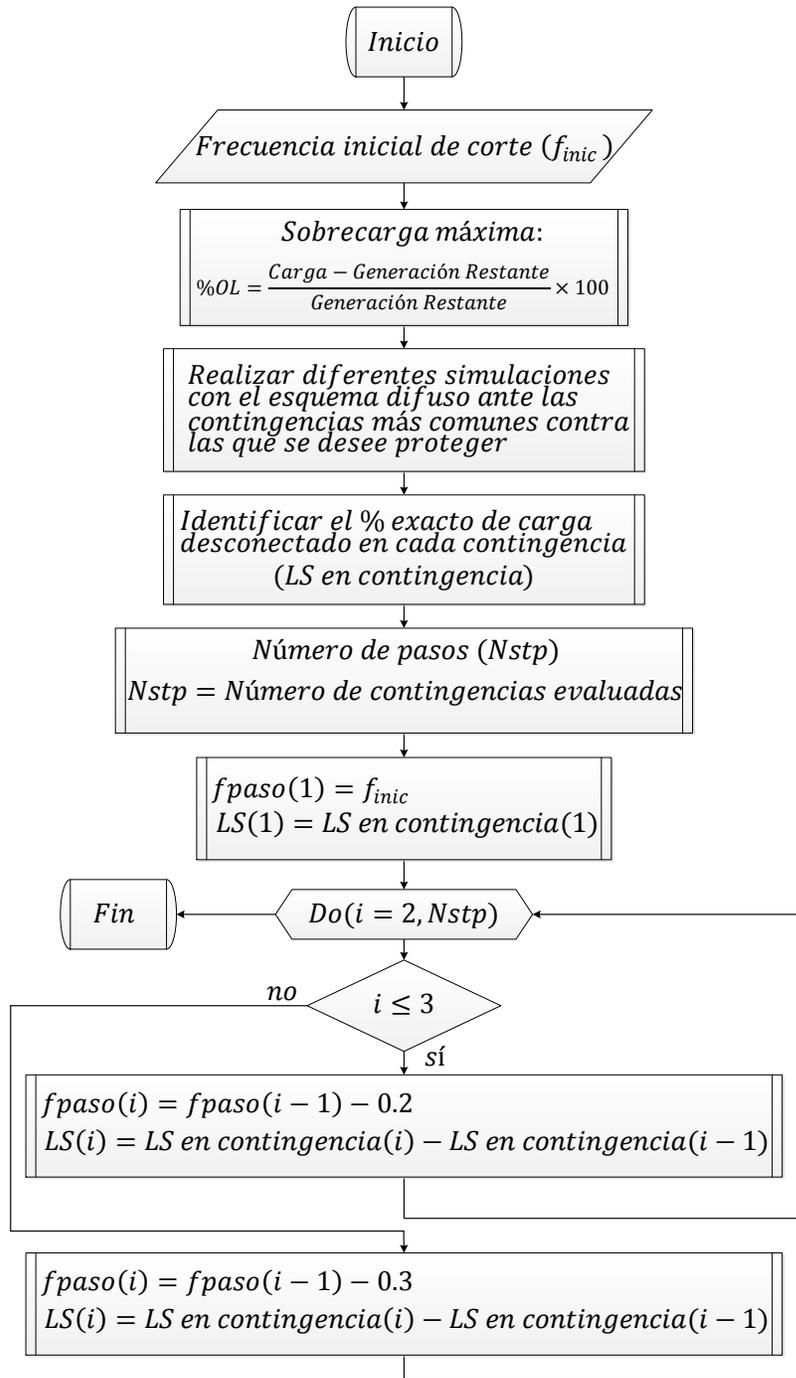


Figura 3.9 Metodología para el diseño de esquemas estáticos de tiro de carga a partir de un esquema difuso.

# CAPÍTULO 4:

## PRUEBAS Y RESULTADOS

### 4.1 INTRODUCCIÓN

En éste capítulo se desarrollan las pruebas de operación tanto de esquemas convencionales como de esquemas dinámicos de tiro de carga por baja frecuencia. Estas pruebas se realizan para determinar la funcionalidad de los esquemas bajo estudio ante diversas sobrecargas presentes en el sistema debido a pérdidas de generación. En todos los casos, los datos requeridos del sistema son: la frecuencia nominal, la inercia, el amortiguamiento de carga y el porcentaje de sobrecarga. No se considera el efecto del gobernador de velocidad, ni retardos de tiempo en la desconexión de carga; tampoco se consideran los modelos de las turbinas, ni el modelo de la red de transmisión. Esto se debe a que el estudio se realiza con una máquina equivalente que representa a toda la generación disponible del sistema.

Todos los esquemas se analizan en un sistema cuyos datos son los siguientes [7]:

Inercia	$H = 5$
Amortiguamiento de carga	$D_L = 1.5$
Frecuencia nominal	$F1 = 60 \text{ Hz}$

Datos de simulación:

Tiempo máximo de simulación	$T_{m\acute{a}x} = 60 \text{ s}$
Incremento de tiempo	$inc = 1 \text{ ms}$

Datos de disturbio:

Sobrecarga vista por el sistema  $OL = 10\%, 15\%, 20\%, 25\%, 30\%, 35\% \text{ y } 40\%$

En primera instancia se analiza la operación de los esquemas convencionales, posteriormente se analiza la operación de los esquemas difusos para finalmente obtener un esquema convencional a partir de las decisiones tomadas por el esquema difuso; el cual opere mejor que los esquemas convencionales analizados inicialmente.

## 4.2 PRUEBAS A ESQUEMAS CONVENCIONALES DE TIRO DE CARGA POR BAJA FRECUENCIA

De acuerdo con las consideraciones y criterios para el diseño de EDCBF descritos en el capítulo 2 sección 2.6.2, un esquema con varios escenarios que desconecta más carga en sus pasos iniciales y que gradualmente desconecta menores porcentajes de carga, funciona mejor que otro tipo de esquemas. Por lo tanto; con el fin de diseñar un esquema convencional que opere de la mejor manera, se realizaron pruebas con diferentes tipos de esquemas para determinar el número adecuado de pasos y el mejor criterio de desconexión. Así mismo, la frecuencia inicial de corte en todos los casos es de 59.3 Hz, siendo el umbral de frecuencia para los primeros escenarios de 0.2 Hz y de 0.3 Hz para el resto de los escenarios. Los esquemas aquí mostrados pueden operar exitosamente para una sobrecarga máxima de 40%.

### 4.2.1 Selección del Número de Pasos del Esquema

En la tabla 4.1 se muestran dos esquemas de 3, 4 y 6 pasos de desconexión; los cuales son probados ante diversas sobrecargas para identificar cuál opera mejor.

**Tabla 4.1 Esquemas convencionales con diferentes pasos de desconexión de carga.**

Esquema	Paso	Frecuencia de paso [Hz]	Carga a desconectar [%]	
3 pasos	A3	1	59.3	25
		2	59.1	10
		3	58.9	5
	B3	1	59.3	15
		2	59.1	15
		3	58.9	10
4 pasos	A4	1	59.3	15
		2	59.1	10
		3	58.9	10
		4	58.6	5
	B4	1	59.3	10
		2	59.1	10
		3	58.9	10
		4	58.6	10
6pasos	A6	1	59.3	10
		2	59.1	8
		3	58.9	6
		4	58.6	6
		5	58.3	5
		6	58	5
	B6	1	59.3	10
		2	59.1	8
		3	58.9	8
		4	58.6	5
		5	58.3	5
		6	58	4

En la Figura 4.1 se aprecia el comportamiento de los esquemas de tres pasos mostrados en la tabla 4.1.

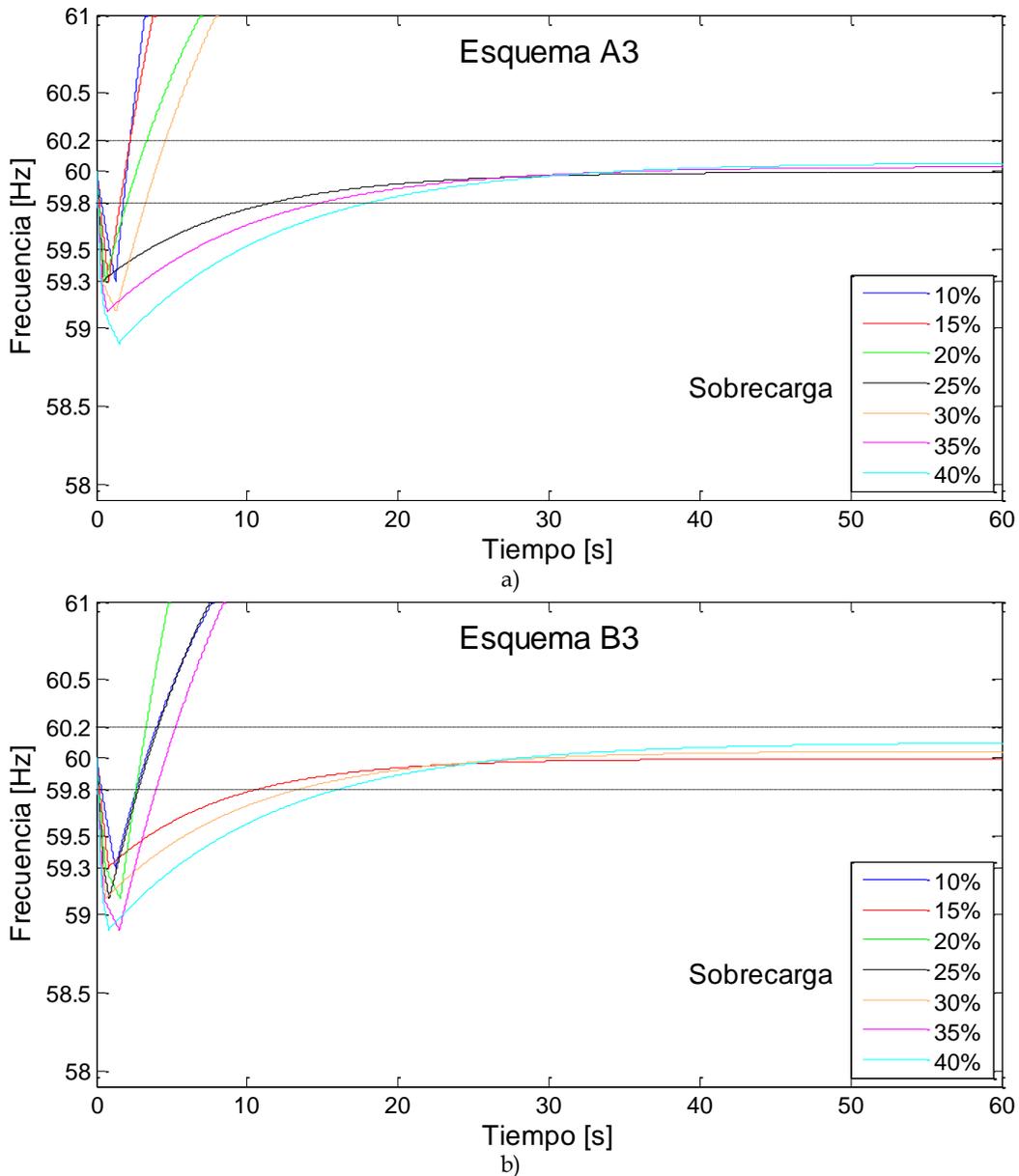


Figura 4.1 Operación de los esquemas convencionales de tres pasos.

En la Figura 4.1 se puede observar que ambos esquemas únicamente recuperan la frecuencia en tres de siete contingencias. Esto se debe a que en dichos casos la cantidad desconectada es igual a la sobrecarga presente en el sistema; por lo tanto, el esquema A3 coincide en las sobrecargas de 25%, 35% y 40%, mientras que el esquema B3 desconecta adecuadamente para 15%, 30% y 40% de sobrecarga. De aquí se puede notar que un esquema que desconecta hasta 40% de carga en tres pasos fallará especialmente en las de sobrecargas relativamente bajas.

En la Figura 4.2 se aprecia la operación de los esquemas de cuatro pasos de tiro de carga; donde el esquema A4 recupera la frecuencia para 15%, 25%, 35% y 40% de sobrecarga; mientras que el esquema B4 lo hace en sobrecargas de 10%, 20%, 30% y 40%.

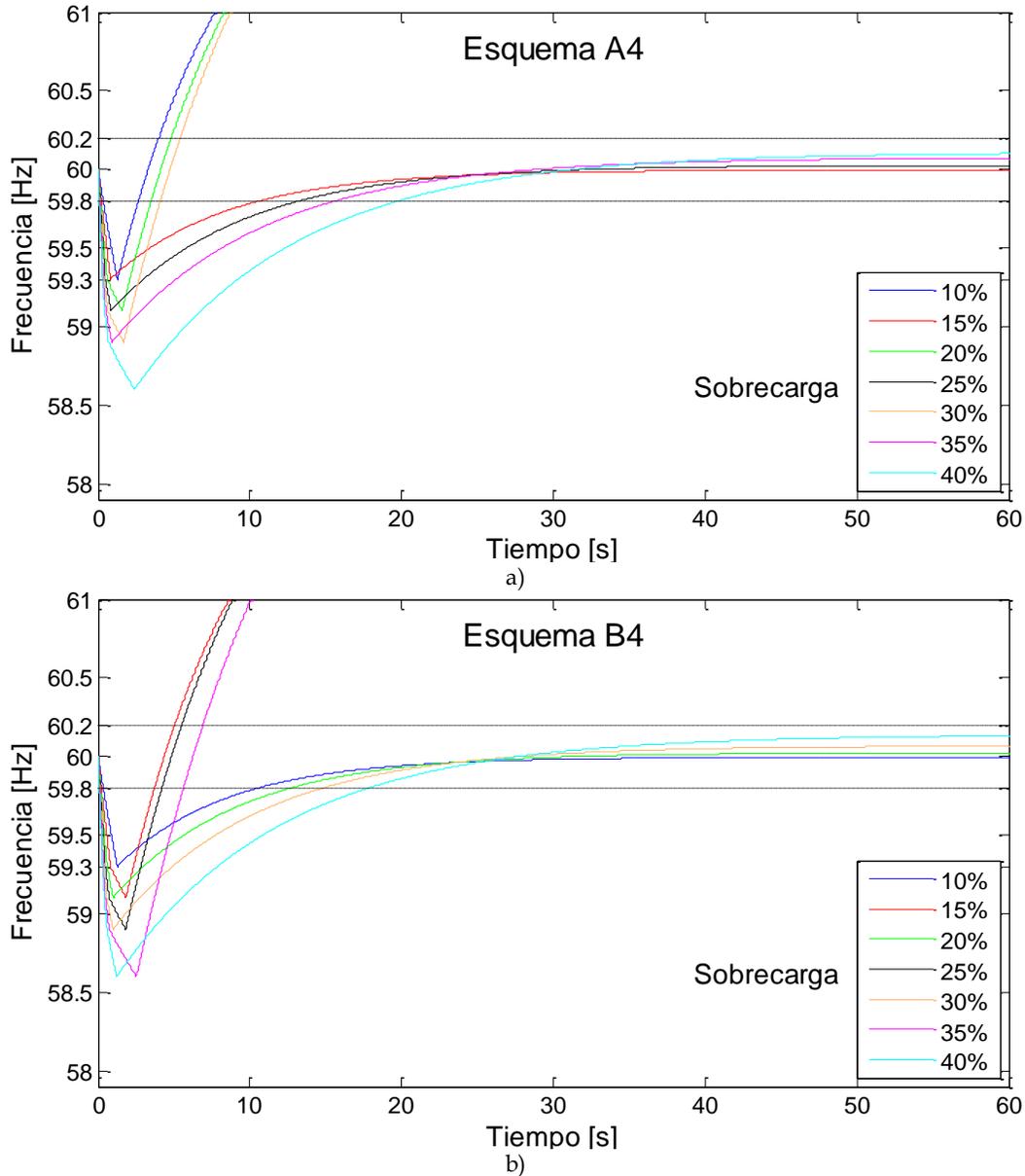


Figura 4.2 Operación de los esquemas convencionales de cuatro pasos.

Se puede observar que en estos esquemas hay un mejor manejo de la carga ya que la frecuencia se recupera tanto en sobrecargas bajas como en sobrecargas grandes; sin embargo, aún hay contingencias que resultan en una desconexión de carga excesiva. Para minimizar este problema es necesario tener más opciones en el manejo de los bloques de carga a desconectar; es decir, más escenarios de desconexión.

En la Figura 4.3 se presenta la operación de los esquemas de seis pasos.

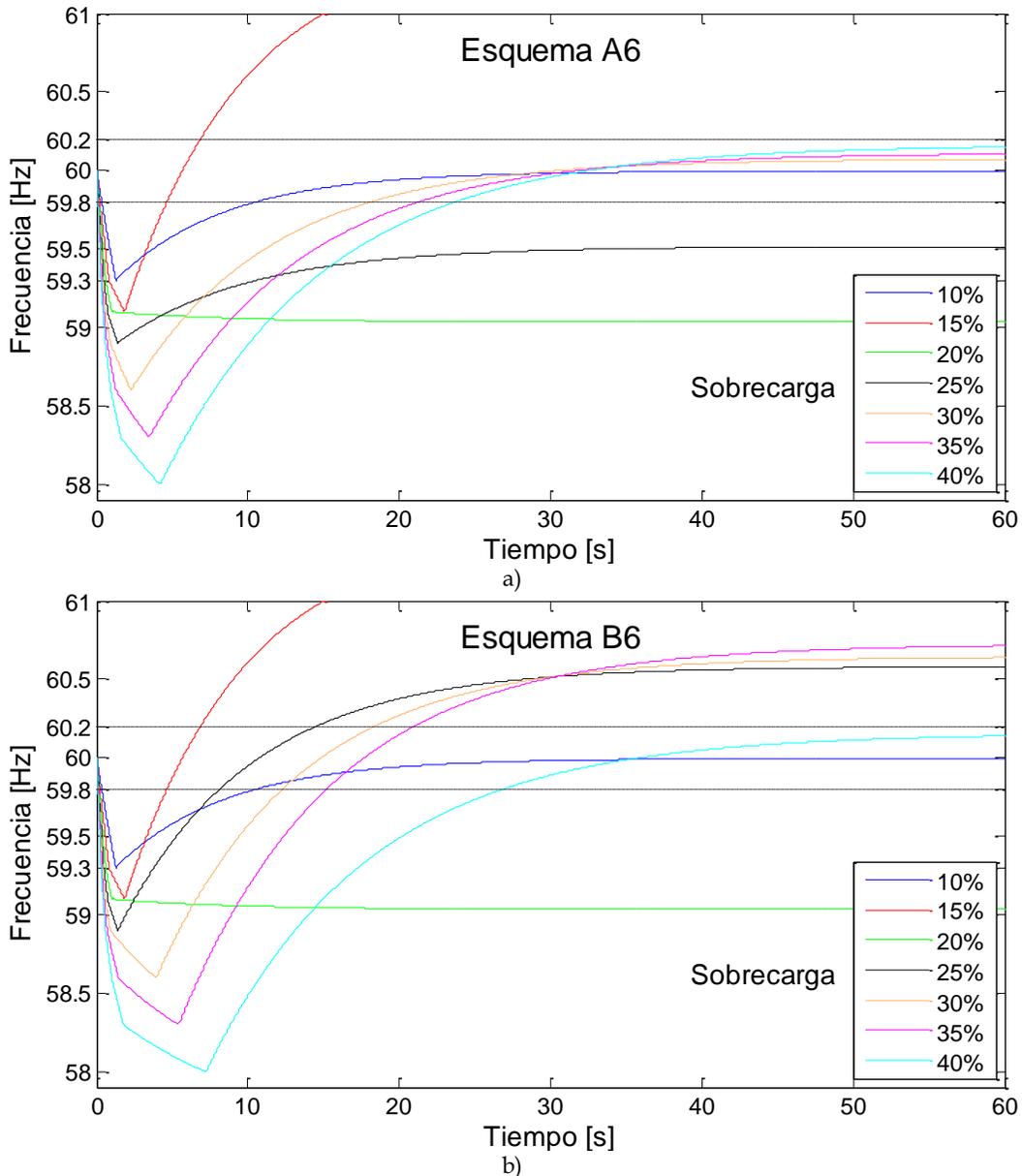


Figura 4.3 Operación de los esquemas convencionales de seis pasos.

Como se puede observar en las gráficas de la Figura 4.3, el esquema A6 recupera la frecuencia dentro de la banda operativa en 10%, 30%, 35% y 40% de sobrecarga, además recupera la frecuencia por arriba de los 59 Hz para 20% y 25% de sobrecarga. Esto se debe al mejor manejo en los bloques de desconexión; por lo tanto, la carga desconectada es muy cercana al valor de la sobrecarga. En estos casos el esquema desconectó 18% y 24% de carga respectivamente y presentó un exceso de desconexión de carga para 15% de sobrecarga.

Por otro lado, el esquema B6 únicamente recupera la frecuencia a un valor aceptable para las sobrecargas de 10% y 40%; sin embargo, la carga que desconecta durante su operación permite que la frecuencia alcance un valor mayor a 59 Hz para la sobrecarga de 20% al desconectar 18% de carga y valores mayores a la banda operativa pero menores a 61 Hz para 25%, 30% y 35% de sobrecarga ya que desconectó 26%, 31% y 36% de carga respectivamente. En este esquema también se presenta un exceso de tiro de carga para la contingencia de 15%.

Es importante tener en cuenta que la acción de los esquemas presentados únicamente atiende el problema inercial del sistema; es decir, la etapa inicial del tiro de carga por baja frecuencia. Si a la operación de estos esquemas se agrega la acción del gobernador de velocidad, el modelo de la turbina (tipo de generación) y los retardos de tiempo por desconexión, el comportamiento de la frecuencia se vería altamente favorecido. Por lo que los casos con niveles fuera de la banda operativa entre 59 Hz y 61 Hz pueden ser recuperados a 60 Hz al igual que los casos con sobretiro de carga, ya que la acción del gobernador se comienza a reflejar entre los 10 y 12 segundos de que ocurrió el disturbio, mismo tiempo en que la frecuencia es menor a 61 Hz.

Por lo tanto, se observa que un esquema con más escenarios de tiro de carga permite una mayor flexibilidad en el manejo de cantidades de carga a desconectar, misma que se refleja en frecuencias que pueden recuperarse con la acción de los controles del generador. De acuerdo con lo analizado en la Figura 4.1, 4.2 y 4.3 se puede decir que un esquema conformado por varios escenarios de desconexión funciona mejor que esquemas de pocos escenarios. Esto se debe a que al tener varios escenarios de desconexión el esquema brinda mayor seguridad mostrando más posibilidades de desconexión de carga.

#### **4.2.2 Evaluación de Criterios de Tiro de Carga**

Las pruebas realizadas en ésta sección son acerca de los tres criterios de tiro de carga descritos en el capítulo 2 apartado 2.6.2.6; con el fin de determinar de manera general el mejor criterio de tiro de carga, y así basar el diseño del resto de los esquemas en el mismo. Los criterios de desconexión se muestran en la tabla 4.2 y con base en ellos se desarrollaron los esquemas de la tabla 4.3.

**Tabla 4.2 Criterios de desconexión de carga.**

Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3
Esquemas que desconectan mayor cantidad de carga en sus primeros escenarios y gradualmente desconectan menos carga hasta su último escenario.	Esquemas que desconectan menor cantidad de carga en sus primeros escenarios y gradualmente desconectan más carga hasta su último escenario.	Esquemas que desconectan cantidades de carga iguales en cada escenario.

En la tabla 4.3 se pueden observar los tres esquemas correspondientes a los criterios de desconexión; cada uno está compuesto de seis pasos y los mismos umbrales de frecuencia entre pasos.

**Tabla 4.3 Esquemas de tiro de carga para evaluar los criterios de desconexión.**

Esquema	Paso	Frecuencia de paso [Hz]	Carga a desconectar [%]
Tipo 1	1	59.3	10
	2	59.1	8
	3	58.9	6
	4	58.6	6
	5	58.3	5
	6	58	5
Tipo 2	1	59.3	5
	2	59.1	5
	3	58.9	6
	4	58.6	6
	5	58.3	8
	6	58	10
Tipo 3	1	59.3	6.67
	2	59.1	6.67
	3	58.9	6.67
	4	58.6	6.67
	5	58.3	6.67
	6	58	6.67

El comportamiento de cada esquema ante diferentes pérdidas de generación se puede apreciar en la Figura 4.4.

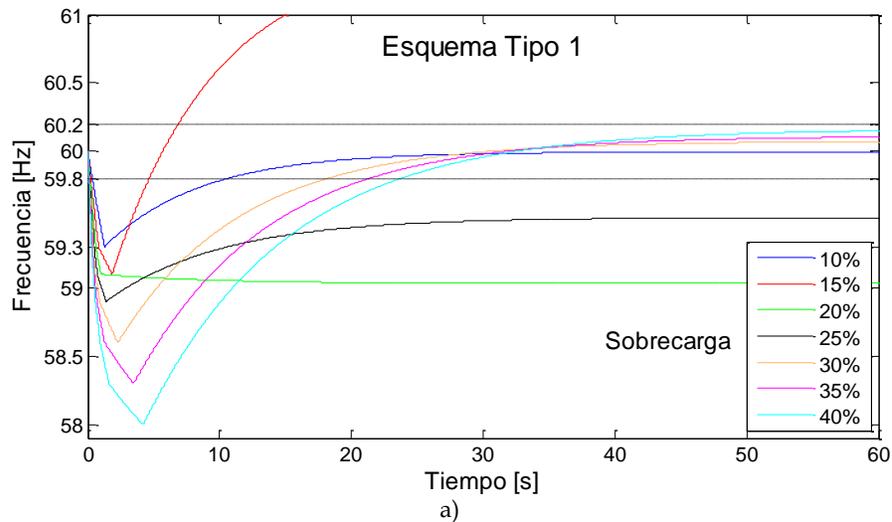


Figura 4.4 Operación de los esquemas convencionales con criterio: a) tipo 1, b) tipo 2 y c) tipo 3.

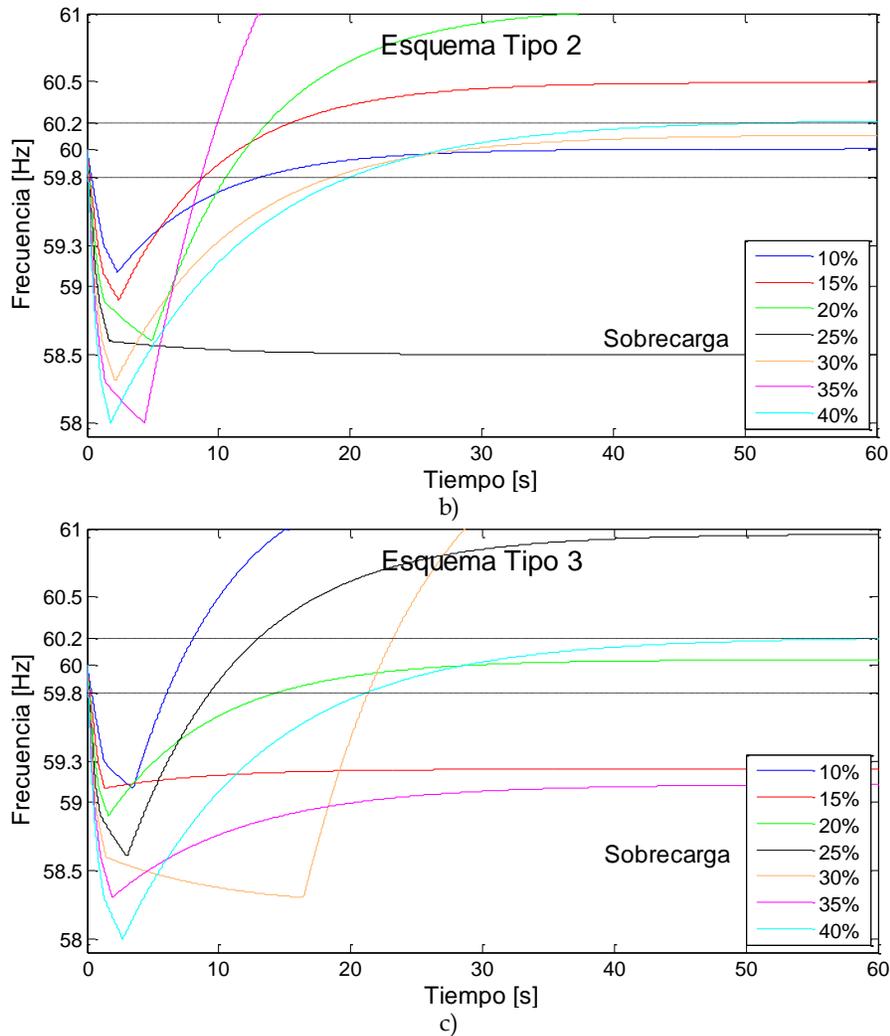


Figura 4.4 Operación de los esquemas convencionales con criterio: a) tipo 1, b) tipo 2 y c) tipo 3 (Continuación).

En la Figura 4.4 se puede observar que el esquema tipo 1 recupera cuatro casos de siete que son: 10%, 30%, 35% y 40% de sobrecarga; para 20% y 25% de sobrecarga la frecuencia se logra recuperar a un valor mayor a 59 Hz y para 15% de sobrecarga se tiene un exceso de tiro de carga. Así mismo el esquema tipo 2 recupera la frecuencia para 10%, 30% y 40% de sobrecarga; sin embargo, presenta dos casos de exceso de tiro de carga que corresponden a 20% y 35% de sobrecarga y un caso en que la frecuencia no es recuperada y disminuye hasta los 58.5 Hz que corresponde a 25% de sobrecarga. Finalmente el esquema tipo 3 recupera solamente dos contingencias que son 20% y 40% de sobrecarga; la contingencia de 15% y 35% son recuperadas a frecuencias mayores a 59 Hz y se tiene un sobretiro de carga en 10% y 30%.

Como se mencionó anteriormente, se puede notar que los casos en que la frecuencia logra ser recuperada a un valor dentro del ancho de banda aceptable son debidos a

que la cantidad de carga desconectada es igual a la magnitud de sobrecarga vista por el sistema. Por esta razón, los casos en que la carga desconectada por el esquema no es igual a la magnitud del disturbio, se presentan una operación inadecuada del esquema; como se muestra principalmente en los esquemas tipo 2 y tipo 3.

De acuerdo con el análisis de la Figura 4.4 se puede observar que el esquema que presenta la mejor operación para las contingencias simuladas es el esquema tipo 1, el cual se muestra en la Figura 4.4 a). Un esquema convencional cuya operación se basa en éste criterio tiene la capacidad de actuar de manera adecuada para más situaciones de emergencia que los esquemas basados en alguno de los otros dos criterios. Esto se debe a que si se desconecta inicialmente una cantidad de carga considerable, es altamente probable que el balance carga-generación se recupere casi en su totalidad en los primeros disparos. De esta manera si se requiere desconectar más carga, el esquema tirará pequeñas cantidades de carga que permiten que el balance entre potencia generada y potencia demandada se alcance, o en su defecto que no exista una gran diferencia llevando la frecuencia a valores que se pueden corregir por la acción del gobernador de velocidad.

En la Figura 4.5 se muestra la tendencia de sobretiro de carga que se presenta en la operación de cada esquema previamente analizado. Se puede observar que el esquema tipo 1 presenta mayor exceso de tiro de carga para cada punto de sobrecarga analizado; sin embargo, este esquema brinda una mejor operación que los esquemas tipo 2 y tipo 3 ya que estos últimos presentan un déficit de desconexión de carga durante su operación, principalmente el esquema tipo 2.

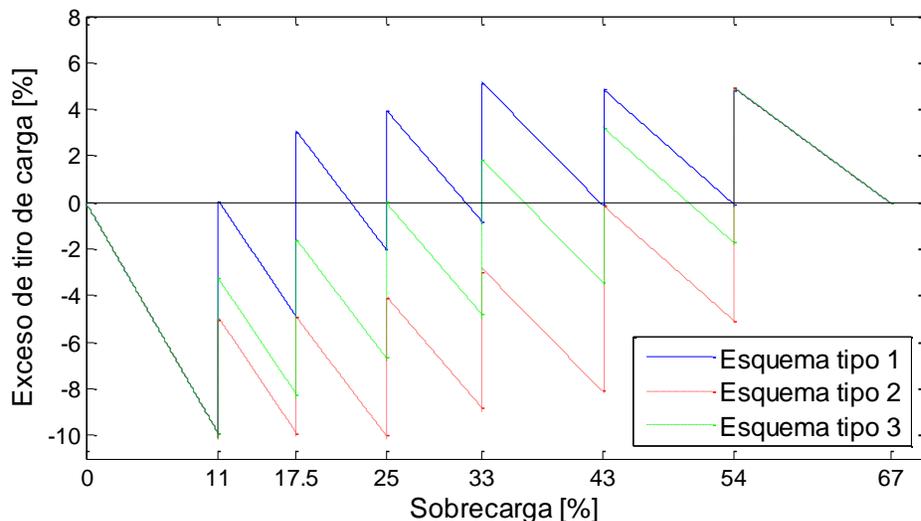


Figura 4.5 Tendencia de sobretiro de carga de los esquemas tipo 1, tipo 2 y tipo 3.

La tendencia de sobretiro de carga de la Figura 4.5 se calcula a partir de la pérdida de generación obtenida del punto de sobrecarga analizado, mediante las expresiones

(3.1), (3.2) y (3.3). De esta manera, cada nivel de sobrecarga donde el esquema dispara corresponde a 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35% y 40% de pérdida de generación; es decir, se busca que en cada uno de estos porcentajes se tenga un disparo del esquema. Para determinar los puntos mínimos en cada punto de sobrecarga, es necesario restar el porcentaje de generación perdida a la cantidad de carga total desconectada por el esquema hasta el paso anterior; mientras que los puntos máximos se obtienen restando la generación perdida a la cantidad de carga total desconectada por el esquema hasta el paso actual [1]. Por ejemplo, la tendencia de sobretiro de carga del esquema tipo 1 en los dos primeros puntos de sobrecarga de la Figura 4.5 es:

Para 11% de sobrecarga corresponde una pérdida de generación de 10%.

El punto mínimo es:  $\%LS_{i-1} - \%LG = 0\% - 10\% = -10\%$  de exceso de tiro de carga.

El punto máximo es:  $\%LS_i - \%LG = 10\% - 10\% = 0\%$  de exceso de tiro de carga.

Para 17.5% de sobrecarga corresponde una pérdida de generación de 15%.

El punto mínimo es:  $\%LS_{i-1} - \%LG = 10\% - 15\% = -5\%$  de exceso de tiro de carga.

El punto máximo es:  $\%LS_i - \%LG = 18\% - 15\% = 3\%$  de exceso de tiro de carga.

Por lo tanto, es posible encontrar una relación directa entre el criterio de desconexión de carga y la tendencia de sobretiro. Es decir, el esquema que funciona con el criterio tipo 1 desconecta cantidades adecuadas de carga o un poco mayores a las necesarias en cada punto de sobrecarga; mientras que el esquema que opera con el criterio tipo 2 desconecta menos carga de la que se requiere en los primeros cuatro puntos de sobrecarga analizados, convirtiéndose en el peor criterio de los tres. Así entonces, el esquema que se rige bajo el criterio tipo 3 presenta un déficit de tiro de carga en los primeros dos disparos, situación que hace que este esquema presente mejor funcionalidad que el esquema que opera con el criterio tipo 2 y a su vez que refleje una desventaja frente al esquema con el criterio tipo 1.

El sobretiro de carga que caracteriza a cada esquema se obtiene mediante un promedio de los puntos mínimos y máximos de su tendencia de sobretiro. En la tabla 4.4 se reportan los sobretiros promedio de los esquemas previamente analizados.

**Tabla 4.4 Sobretiro de carga promedio de los esquemas que utilizan los criterios de desconexión.**

Esquema	Promedio de exceso de tiro de carga [%]
Tipo 1	0.375
Tipo 2	-5.292
Tipo 3	-2.448

De acuerdo con la tabla 4.4 y con las Figuras 4.4 y 4.5 se puede decir que el mejor criterio para diseño de esquemas convencionales de tiro de carga por baja frecuencia es el criterio tipo 1.

### 4.3 DISEÑO Y DETERMINACIÓN DEL MEJOR ESQUEMA CONVENCIONAL DE TIRO DE CARGA POR BAJA FRECUENCIA

Con base en el criterio de desconexión tipo 1 se diseñaron cinco esquemas convencionales de tiro de carga por baja frecuencia, los cuales se muestran en la tabla 4.5. El comportamiento de cada esquema ante diferentes pérdidas de generación se puede apreciar en la Figura 4.6.

**Tabla 4.5 Esquemas convencionales de tiro de carga bajo estudio.**

Esquema	Paso	Frecuencia de paso [Hz]	Carga a desconectar [%]
A	1	59.3	10
	2	59.1	8
	3	58.9	6
	4	58.6	6
	5	58.3	5
	6	58	5
B	1	59.3	10
	2	59.1	9
	3	58.9	7
	4	58.6	5
	5	58.3	5
	6	58	4
C	1	59.3	10
	2	59.1	9
	3	58.9	7
	4	58.6	6
	5	58.3	4
	6	58	4
D	1	59.3	9
	2	59.1	9
	3	58.9	7
	4	58.6	5
	5	58.3	5
	6	58	5
E	1	59.3	10
	2	59.1	10
	3	58.9	6
	4	58.6	5
	5	58.3	5
	6	58	4

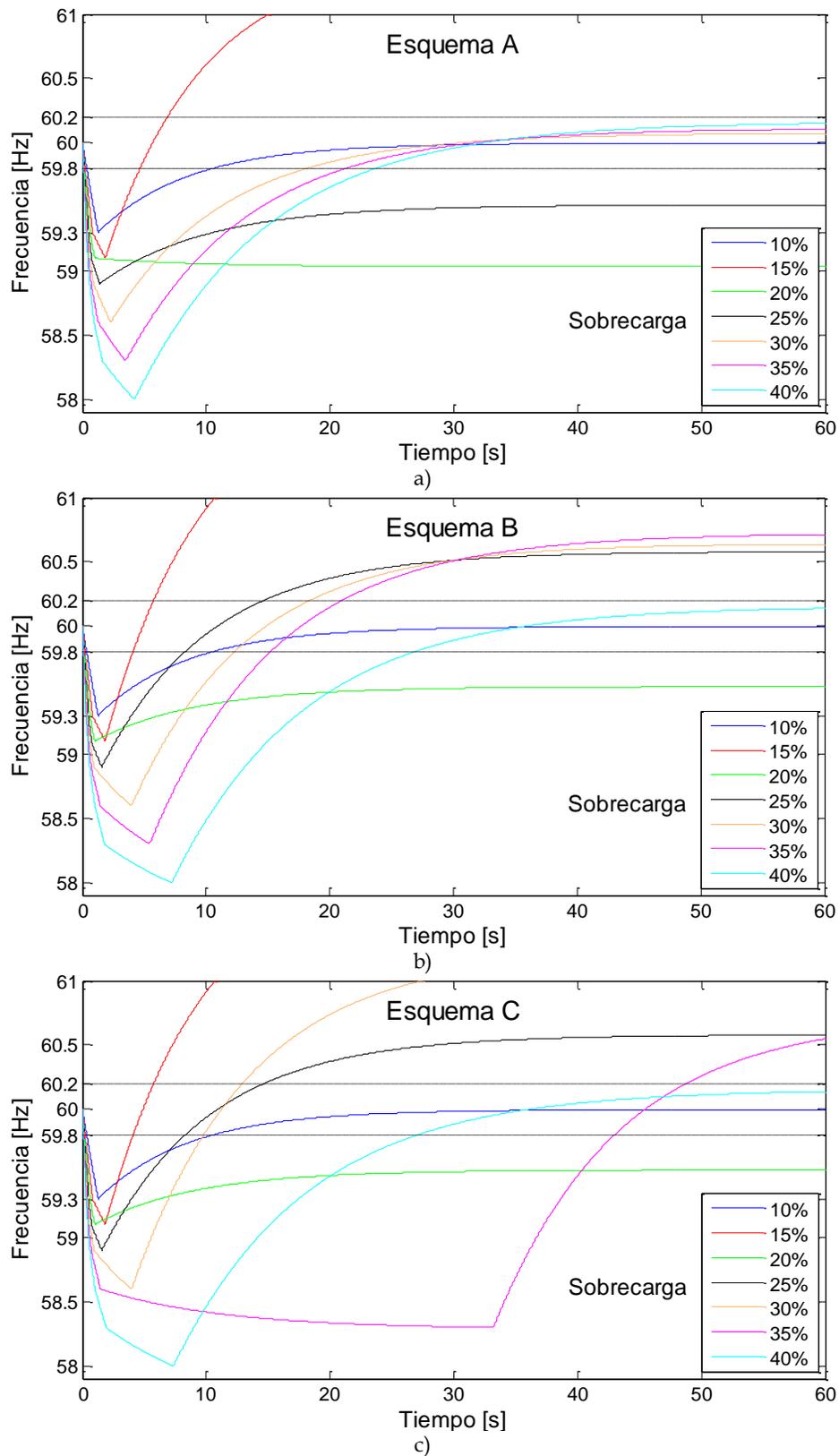


Figura 4.6 Operación de los esquemas convencionales bajo estudio ante diferentes pérdidas de generación.

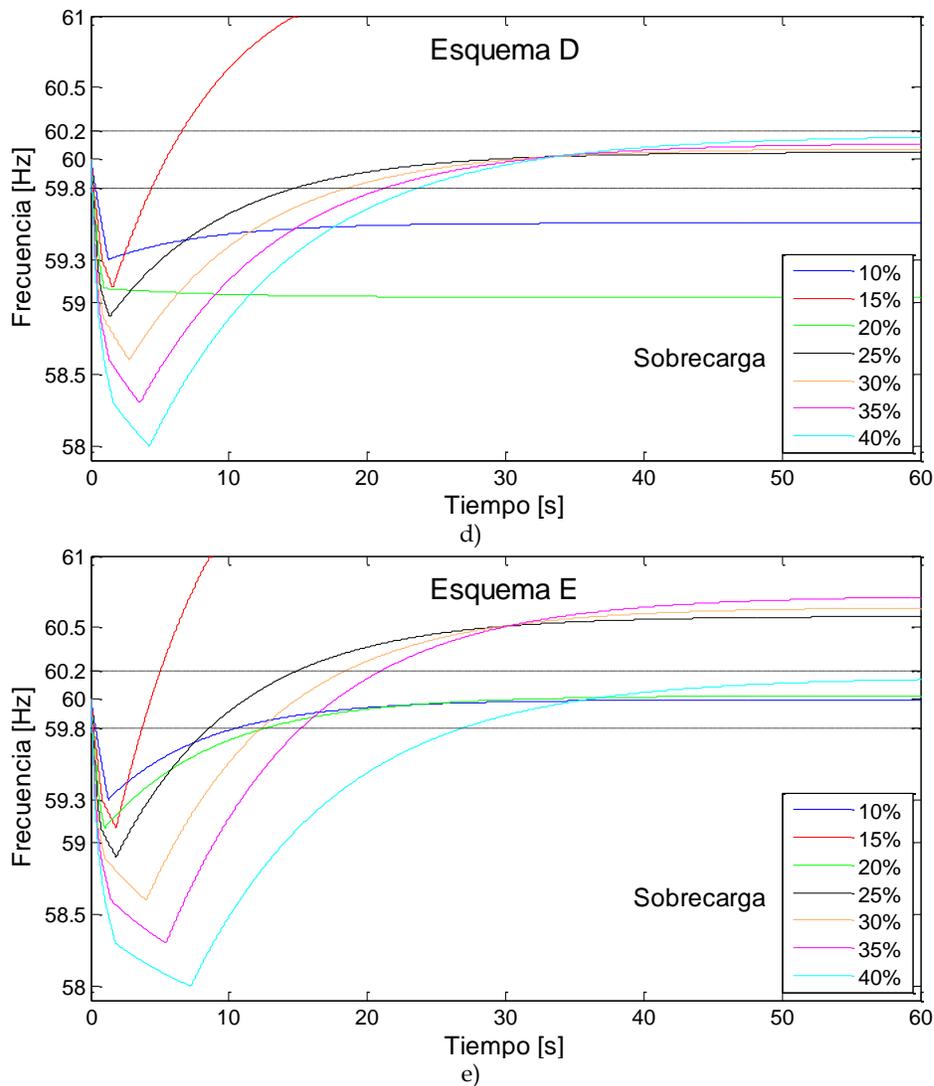


Figura 4.6 Operación de los esquemas convencionales bajo estudio ante diferentes pérdidas de generación (Continuación).

En la Figura 4.6 se observa el resultado de la operación de los esquemas convencionales de la tabla 4.5; así mismo es posible identificar a primera vista que la mejor operación se tiene con los esquemas A y D, ya que ambos recuperan la frecuencia a un valor dentro del ancho de banda aceptable en cuatro de siete contingencias. Además en ambos esquemas hay dos contingencias que son recuperadas por encima de 59 Hz; mientras que en el caso de 15% de sobrecarga la operación de ambos esquemas termina en sobrefrecuencia.

Por otra parte, se tiene una operación similar entre los esquemas B y E, los cuales fallan en la sobrecarga de 15% al desconectar más carga de la necesaria. De igual forma, estos esquemas recuperan el valor de frecuencia a un nivel superior respecto al intervalo aceptable y menor a 61 Hz en las sobrecargas de 25%, 30% y 35%. La principal diferencia radica en que el esquema E recupera exitosamente las tres

contingencias restantes que corresponden a 10%, 20% y 40% de sobrecarga; mientras que el esquema B únicamente lleva la frecuencia a un valor aceptable para el sistema en las sobrecargas de 10% y 40%, dejando la frecuencia debida a la operación por sobrecarga de 20% en un valor superior a los 59 Hz y menor a los 59.8 Hz; la cual mediante la acción del gobernador de velocidad puede alcanzar el valor nominal. Esta diferencia hace que el esquema E opere mejor que el esquema B; sin embargo, su desempeño no es comparable con el de los esquemas A y D.

El esquema C es el que presenta más problemas debido a que sólo recupera la frecuencia a un valor adecuado en dos de siete contingencias, y para la sobrecarga de 20% la frecuencia queda arriba de los 59 Hz. La operación de dicho esquema para los cuatro casos restantes resulta en dos frecuencias apenas arriba de 60.5 Hz y dos más en frecuencias superiores a los 61 Hz. Este análisis puede verse de manera más detallada en la tabla 4.6.

**Tabla 4.6 Resumen de la operación de los esquemas convencionales bajo estudio.**

Esquema	Sobrecarga [%]	Disparos realizados	LS total [%]	T <sub>G</sub> final [pu]	T <sub>L</sub> final [pu]	Frecuencia final [Hz]
A	10	1	10	0.911	0.895	59.99570
	15	2	18	0.863	0.813	61.43294
	20	2	18	0.812	0.813	59.03306
	25	3	24	0.764	0.752	59.51406
	30	4	30	0.716	0.690	60.06930
	35	5	35	0.669	0.639	60.10327
	40	6	40	0.620	0.587	60.14891
B	10	1	10	0.911	0.895	59.99570
	15	2	19	0.863	0.803	61.91551
	20	2	19	0.812	0.803	59.52592
	25	3	26	0.764	0.732	60.57736
	30	4	31	0.716	0.680	60.63751
	35	5	36	0.669	0.629	60.71210
	40	6	40	0.620	0.587	60.13813
C	10	1	10	0.911	0.895	59.99570
	15	2	19	0.863	0.803	61.91551
	20	2	19	0.812	0.803	59.52592
	25	3	26	0.764	0.732	60.57736
	30	4	32	0.716	0.671	61.21452
	35	5	36	0.669	0.629	60.54817
	40	6	40	0.620	0.587	60.13627
D	10	1	9	0.911	0.905	59.55563
	15	2	18	0.863	0.813	61.43579
	20	2	18	0.812	0.813	59.03592
	25	3	25	0.764	0.742	60.04697
	30	4	30	0.716	0.690	60.07150

	35	5	35	0.669	0.639	60.10576
	40	6	40	0.620	0.587	60.15159
E	10	1	10	0.911	0.895	59.99570
	15	2	20	0.863	0.793	62.40189
	20	2	20	0.812	0.793	60.02283
	25	3	26	0.764	0.732	60.57640
	30	4	31	0.716	0.680	60.63652
	35	5	36	0.669	0.629	60.71105
	40	6	40	0.620	0.587	60.13705

De acuerdo con la tabla 4.6 se puede observar en forma precisa el valor de la frecuencia final de cada caso analizado; así mismo es posible notar que los cinco esquemas realizaron la misma cantidad de disparos para las mismas contingencias. Sin embargo, debido a la cantidad de carga que desconecta cada esquema en cada paso, el balance entre el par de carga y el par de generación se recuperó más en la operación de los esquemas A y D. Esta situación se refleja en la frecuencia final, por ello tanto el esquema A como el esquema D recuperan la frecuencia a un valor operativo en cuatro casos aunque no son los mismos de un esquema a otro.

El esquema A presenta un mejor balance entre los pares de carga y generación; por lo tanto tiene más valores de frecuencia cercanos a 60 Hz que el esquema D. Para corroborarlo es necesario realizar un análisis de la tendencia de sobretiro de carga de cada esquema; la cual se muestra en la Figura 4.7.

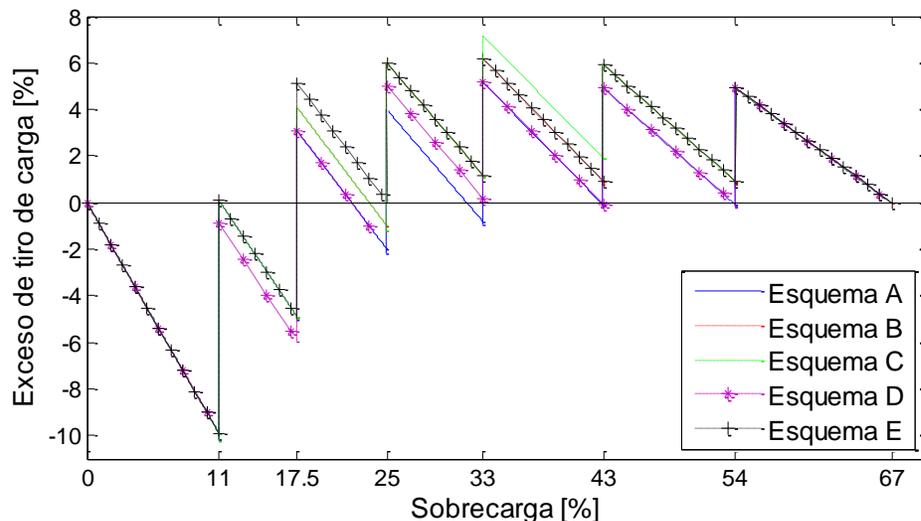


Figura 4.7 Tendencia de sobretiro de carga de los esquemas convencionales bajo estudio.

En la Figura 4.7 se aprecia la tendencia de exceso de desconexión de carga de los esquemas analizados previamente. Se puede notar que la tendencia del esquema A y

D son similares; sin embargo, el esquema A desconecta la cantidad de carga adecuada en el primer punto de sobrecarga, mientras que el esquema D presenta un déficit de desconexión de 1% respecto a éste. Para el segundo punto de sobrecarga se observa que ambos esquemas tienden a desconectar la misma cantidad de carga; sin embargo, en el tercer punto de sobrecarga, el esquema A tiene una tendencia a tirar la cantidad de carga más adecuada a pesar de que se desconecta el mismo porcentaje total en ambos esquemas. Esto indica que aunque el porcentaje total de carga desconectada por los esquemas sea igual, no implica que se esté desconectando la misma cantidad de MW ya que los pares de generación y carga se alteran con cada desconexión. Por tal motivo, el esquema A tiende a desconectar la carga de manera más adecuada que el esquema D. En el resto de los puntos de sobrecarga ambos esquemas tienen la misma tendencia de desconexión.

Por otra parte se observa que los esquemas C y E presentan una mayor tendencia a desconectar carga en exceso. Este análisis permite corroborar lo que se observó de la Figura 4.6 y de la tabla 4.6; así mismo, la tabla 4.7 permite sustentar el análisis anterior. Por lo tanto, se dice que el esquema convencional con mejor operación es el esquema A.

**Tabla 4.7 Sobretiro de carga promedio de los esquemas convencionales bajo estudio.**

Esquema	Promedio de exceso de tiro de carga [%]
A	0.375
B	1.208
C	1.375
D	0.375
E	1.375

#### **4.4 DISEÑO Y DETERMINACIÓN DEL MEJOR ESQUEMA DIFUSO DE TIRO DE CARGA POR BAJA FRECUENCIA**

De acuerdo con las bases para el desarrollo de un sistema de inferencia difuso mostradas en el apéndice B y con los criterios tomados para el tiro de carga difuso descritos en el capítulo 3 apartado 3.4, se desarrollaron esquemas difusos de tiro de carga con 3 y 5 funciones membresía para las entradas con el fin de comparar su operación y determinar el esquema que brinda un tiro de carga más adecuado.

##### **4.4.1 Esquema Difuso de 3 Membresías en las Entradas**

A continuación se muestra el esquema difuso de 3 membresías en las entradas que mejor funcionó respecto de cinco esquemas que se desarrollaron; la comparación entre ellos se muestra en el apéndice C.

El esquema difuso tiene las siguientes características:

- 3 funciones de membresía (2 trapezoidales y 1 triangular) para  $f$ .
- 3 funciones de membresía (2 trapezoidales y 1 triangular) para  $\Delta f$ .
- 4 funciones de membresía singletón para  $LS$ .
- Método de dedifusificación: centroide.

**Esquema D3E:**

*Difusificación:* En la Figura 4.8 se aprecian las funciones de membresía que conforman a los conjuntos difusos para la difusificación de la frecuencia y para la variación de la frecuencia.

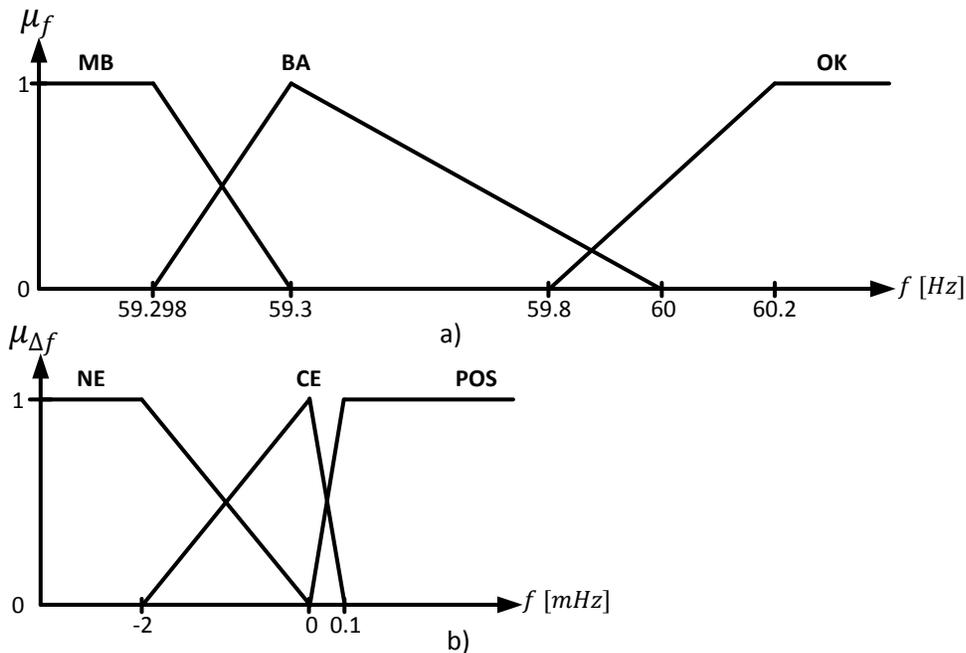


Figura 4.8 Funciones de membresía para difusificar las entradas del esquema D3E: a) Frecuencia y b) Variación de frecuencia.

En la tabla 4.8 se encuentra el nombre de las variables lingüísticas de la frecuencia y de la variación de frecuencia de la Figura 4.8.

**Tabla 4.8 Variables lingüísticas de entrada para el esquema D3E.**

Frecuencia		Variación de la frecuencia	
MB	Muy Baja	NE	Negativa
BA	Baja	CE	Cero
OK	Aceptable	POS	Positiva

Base de reglas: En la Figura 4.9 se muestra la base de reglas de inferencia difusa que será evaluada por el mecanismo de inferencia para la determinación de la cantidad de carga a desconectar en cada contingencia.

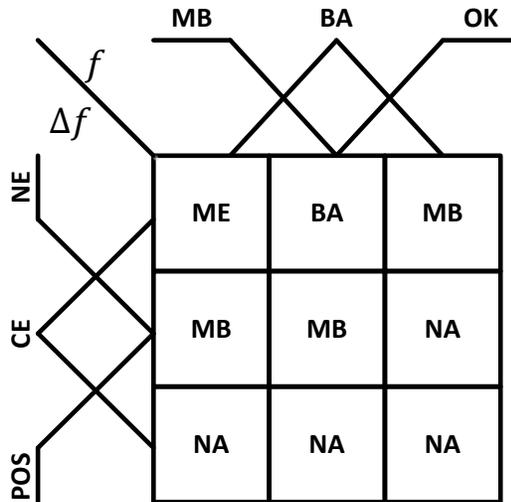


Figura 4.9 Base de reglas para el esquema D3E.

En la tabla 4.9 se expresan las variables lingüísticas de tiro de carga utilizadas en la base de reglas y en la Figura 4.10 se observan sus funciones de membresía.

Tabla 4.9 Acciones de tiro de carga para el esquema D3E.

Variable lingüística		Carga a desconectar [%]
NA	Nada	0
MB	Muy Bajo	1
BA	Bajo	10
ME	Mediano	40

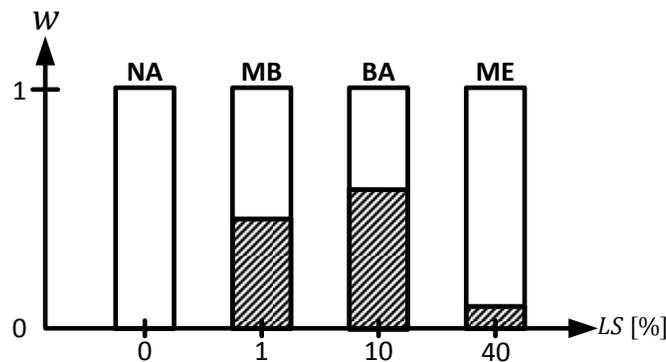


Figura 4.10 Funciones de membresía para el tiro de carga del esquema D3E.

Para probar la operación del esquema difuso se simularon las mismas contingencias con el mismo sistema utilizado para los esquemas convencionales; los resultados se pueden observar en la Figura 4.11 y en la tabla 4.10.

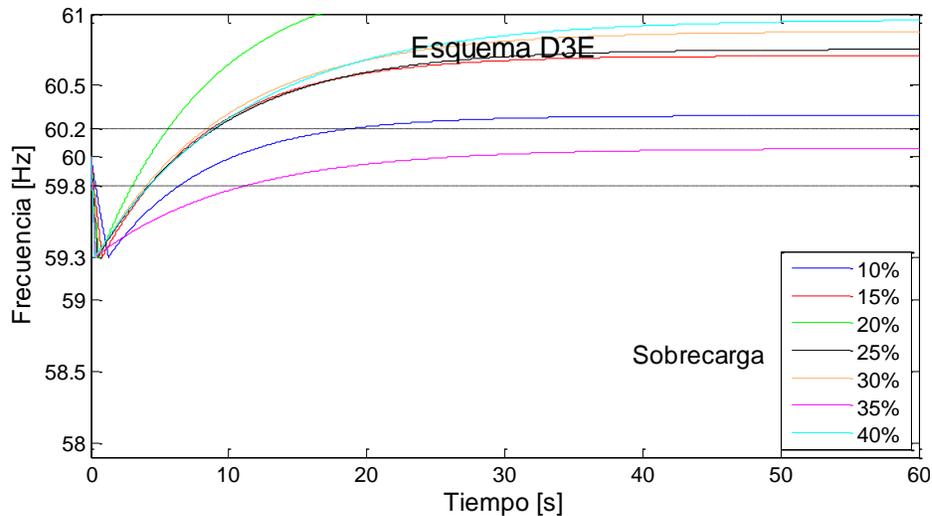


Figura 4.11 Operación del esquema difuso D3E ante diferentes pérdidas de generación.

**Tabla 4.10 Resumen de la operación del esquema D3E.**

Esquema	Sobrecarga [%]	Disparos realizados	LS [%]	LS total [%]	T <sub>G</sub> final [pu]	T <sub>L</sub> final [pu]	Frecuencia final [Hz]
D3E	10	2	5.16 5.47	10.63	0.911	0.888	60.28881
	15	2	8.26 8.2	16.46	0.860	0.830	60.70708
	20	2	11.68 10.84	22.52	0.809	0.770	61.29398
	25	2	10.83 15.5	26.33	0.759	0.732	60.75134
	30	2	25.66 5.85	31.51	0.708	0.681	60.87678
	35	2	13.32 21.66	34.98	0.658	0.645	60.05769
	40	2	29.23 12.14	41.37	0.607	0.582	60.95560

De acuerdo con la tabla 4.10 y con la Figura 4.11 se observa que el esquema difuso con tres membresías de entrada y cuatro membresías de salida realiza en todos los casos dos disparos de carga. Mediante el análisis de las incertidumbres este esquema es capaz de determinar cantidades de carga muy aproximadas a las requeridas; sin embargo, solamente puede recuperar la frecuencia a un nivel aceptable para la sobrecarga de 35%. El caso que presenta más problemas es el de 20% de sobrecarga ya que desconecta 2.52% de carga extra respecto de la necesaria; situación que se refleja en un mayor desbalance entre el par de generación y el par de carga de los casos analizados. El resto de las sobrecargas terminan en frecuencias mayores a la banda

operativa pero pueden ser fácilmente restauradas a 60 Hz mediante la acción del gobernador de velocidad. Cabe destacar que gráficamente no se aprecian los dos disparos que realiza el esquema ya que 1 ms después de tener lugar el primer disparo sucede el segundo disparo.

#### 4.4.2 Esquema Difuso de 5 Membresías en las Entradas

Se desarrolló un esquema difuso con 5 funciones de membresías en las entradas y a través de diversas pruebas se mejoró hasta obtener el esquema que se muestra a continuación; los diferentes esquemas obtenidos durante la sintonización de las membresías se detallan en el apéndice C.

El esquema difuso tiene las siguientes características:

- 5 funciones de membresía (2 trapezoidales y 3 triangulares) para  $f$ .
- 5 funciones de membresía (2 trapezoidales y 3 triangulares) para  $\Delta f$ .
- 6 funciones de membresía singletón para  $LS$ .
- Método de dedifusificación: centroide.

#### Esquema D5E:

*Difusificación:* En la Figura 4.12 se aprecian las funciones de membresía que conforman a los conjuntos difusos para la difusificación de la frecuencia y para la variación de la frecuencia.

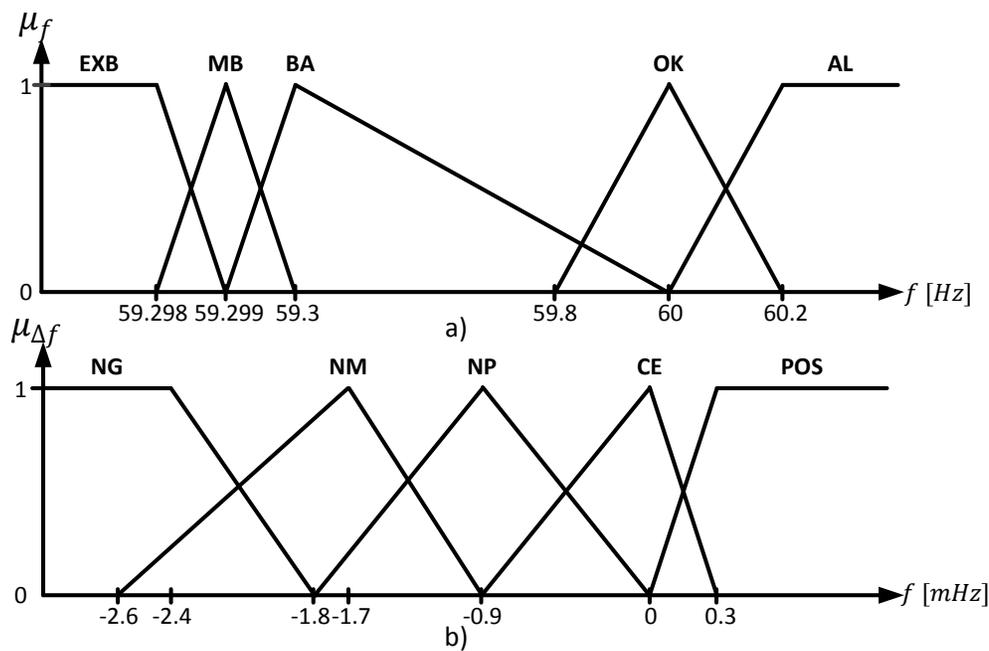


Figura 4.12 Funciones de membresía para difusificar las entradas del esquema D5E: a) Frecuencia y b) Variación de frecuencia.

En la tabla 4.11 se muestran las variables lingüísticas utilizadas en la difusificación.

**Tabla 4.11 Variables lingüísticas de entrada para el esquema D5E.**

Frecuencia		Variación de la frecuencia	
EXB	Extremadamente Baja	NG	Negativa Grande
MB	Muy Baja	NM	Negativa Mediana
BA	Baja	NP	Negativa Pequeña
OK	Aceptable	CE	Cero
AL	Alta	POS	Positiva

*Base de reglas:* La base de reglas para este esquema consta de 25 reglas de inferencia difusa; misma que se muestra en la Figura 4.13.

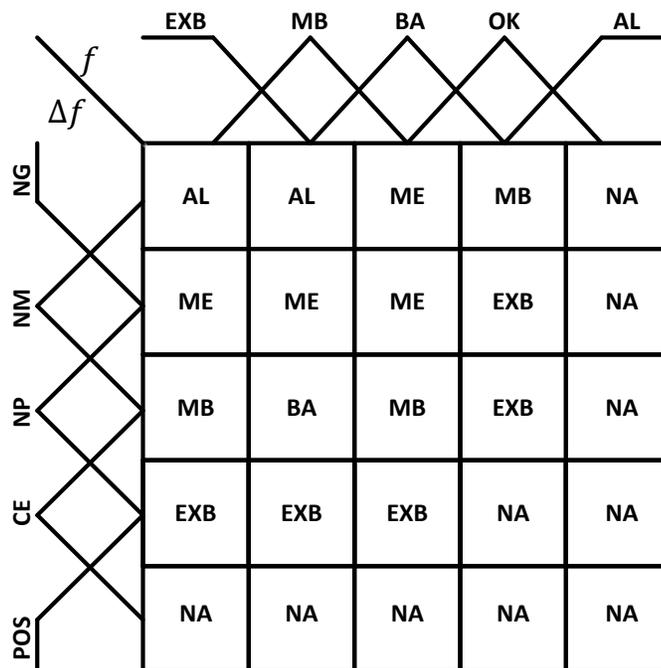


Figura 4.13 Base de reglas para el esquema D5E.

Las variables lingüísticas utilizadas para el tiro de carga se expresan en la tabla 4.12.

**Tabla 4.12 Acciones de tiro de carga para el esquema D5E.**

Variable lingüística	Carga a desconectar [%]	
NA	Nada	0
EXB	Extremadamente Bajo	2
MB	Muy Bajo	13.5
BA	Bajo	25
ME	Mediano	32.7
AL	Alto	42.8

Los porcentajes de carga a desconectar por cada conjunto difuso fueron determinados mediante pruebas en los diferentes esquemas, obteniendo un mejor tiro de carga con las cantidades mostradas en la tabla 4.12. Las funciones de membresía empleadas para el tiro de carga son membresías tipo singletón; las cuales se pueden apreciar en la Figura 4.14.

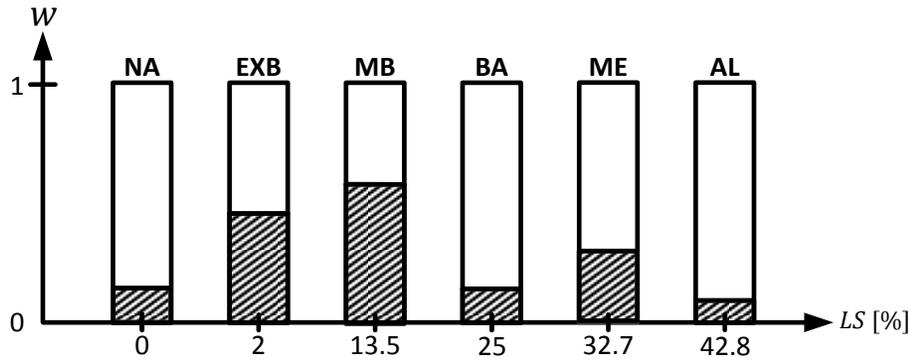


Figura 4.14 Funciones de membresía para el tiro de carga del esquema D5E.

Al igual que con el esquema difuso de 3 membresías de entrada, el esquema difuso de 5 membresías de entrada fue probado en el mismo sistema utilizado para los esquemas convencionales; los resultados se pueden observar en la Figura 4.15.

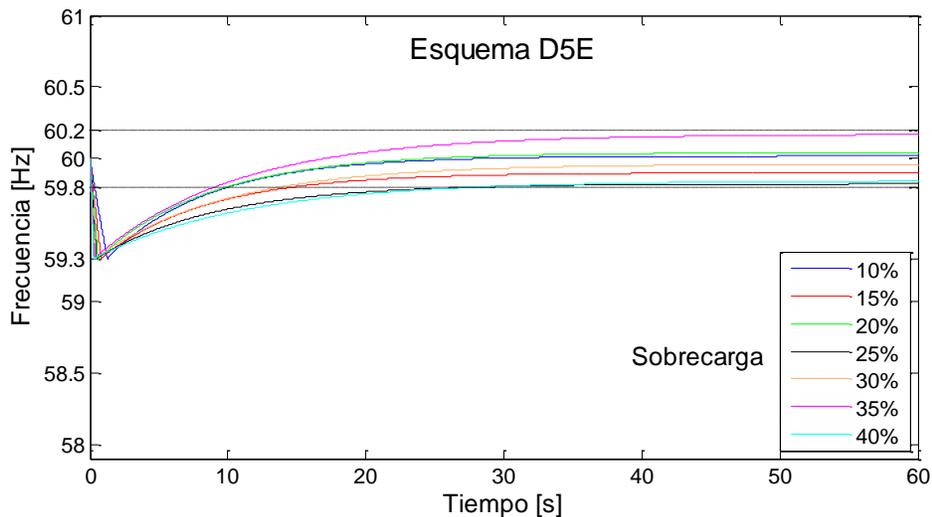


Figura 4.15 Operación del esquema difuso D5E ante diferentes pérdidas de generación.

En la tabla 4.13 se presenta un resumen de la operación del esquema D5E donde es posible observar la cantidad de disparos que realiza el esquema, la cantidad de carga que desconecta, los pares del sistema y la frecuencia final alcanzada en la operación para cada contingencia en cuestión.

**Tabla 4.13 Resumen de la operación del esquema D5E.**

Esquema	Sobrecarga [%]	Disparos realizados	LS total [%]	T <sub>G</sub> final [pu]	T <sub>L</sub> final [pu]	Frecuencia final [Hz]
D5E	10	1	10.05	0.911	0.894	60.01690
	15	1	14.79	0.860	0.847	59.89955
	20	1	20.09	0.809	0.794	60.03992
	25	1	24.67	0.759	0.749	59.82172
	30	1	29.94	0.708	0.697	59.95912
	35	1	35.28	0.658	0.643	60.16607
	40	1	39.77	0.607	0.599	59.84054

La tabla 4.13 muestra que la operación del esquema D5E fue exitosa debido a que logró recuperar todas las contingencias mediante un solo disparo de carga. Lo anterior implica que cinco funciones de membresía es suficiente base inteligente para poder interpretar las incertidumbres presentes en el proceso de tiro de carga. Por lo tanto, el esquema evalúa las incertidumbres de manera adecuada y toma la mejor decisión acerca de la cantidad de carga necesaria a desconectar; situación que se aprecia como una recuperación inmediata de la frecuencia dentro de la banda operativa con un mínimo desbalance entre generación y carga.

Al comparar los resultados de la operación del esquema D3E contra los resultados de la operación del esquema D5E mostrados en la tabla 4.10 y 4.13 respectivamente, se puede observar que el esquema D5E funciona mejor al realizar un único disparo y al llevar los pares de generación y carga a un mínimo desbalance respecto al otro esquema. Así entonces, cuando la acción de los controles del generador se vea reflejada en el sistema, solamente deberá eliminar un pequeño error en la frecuencia para llevarla exactamente a 60 Hz.

Debido a que el análisis de la tendencia de sobretiro de carga se realiza con base en la operación de cada paso del esquema bajo estudio, en los esquemas difusos no es posible realizar dicho análisis ya que estos esquemas no tienen un programa de pasos predeterminados, sino que determina de manera dinámica la cantidad de carga a tirar en el momento que se presenta la contingencia. Se observó que en los esquemas de 3 membresías de entrada la desconexión de carga se lleva a cabo en dos disparos y para el esquema de 5 membresías de entrada la acción se realiza en un solo disparo. De esta manera se puede tener una idea de que el esquema difuso de 5 membresías tiende a desconectar en todos los casos la carga mínima necesaria; es decir, no tiende al exceso de tiro de carga gracias al sistema inteligente bajo el que opera, el cual le permite interpretar las incertidumbres del proceso adecuando el tiro de carga en cada contingencia.

#### 4.5 DISEÑO DE ESQUEMAS ESTÁTICOS DE TIRO DE CARGA POR BAJA FRECUENCIA A PARTIR DEL ESQUEMA DIFUSO D5E

De acuerdo con la metodología establecida en el diagrama de flujo de la Figura 3.9 para diseñar esquemas estáticos a partir de un esquema difuso, es posible diseñar un esquema estático a partir de las decisiones tomadas por el esquema D5E. Para ello, es necesario fijar un porcentaje de carga a desconectar en cada paso de tal forma que para cada contingencia analizada el esquema dispare la misma cantidad de carga que el esquema difuso. Es decir, el primer disparo debe ser igual en magnitud que el disparo del esquema D5E en la primera contingencia; el segundo disparo debe ser de tal magnitud que la suma de la carga desconectada entre el primer y segundo paso resulte en el porcentaje de carga desconectado por el esquema D5E para la segunda contingencia, etc. Por lo tanto, siguiendo la metodología de la Figura 3.9, un esquema estático adecuado para estas contingencias debe contener 7 pasos de desconexión. Sin embargo, con el fin de comparar esquemas de 6 pasos, se diseñaron los esquemas de la tabla 4.14.

**Tabla 4.14 Esquemas estáticos de seis pasos a partir del esquema D5E.**

Esquema	Paso	Frecuencia de paso [Hz]	Carga a desconectar [%]
F	1	59.3	10.05
	2	59.1	4.74
	3	58.9	5.3
	4	58.6	4.58
	5	58.3	5.27
	6	58	5.34
G	1	59.3	10.05
	2	59.1	4.74
	3	58.9	5.3
	4	58.6	4.58
	5	58.3	5.27
	6	58	9.83

En la tabla 4.14 se observa que la suma de los porcentajes de carga a desconectar en cada paso es igual al porcentaje desconectado por el esquema difuso D5E para la respectiva sobrecarga. Sin embargo, debido a que los esquemas diseñados constan de 6 pasos, no hay cabida para considerar la última contingencia como es el caso del esquema F; el cual solamente puede tirar un máximo de 35% de carga. Por otra parte, si se diseña un esquema que pueda solventar una sobrecarga máxima de 40%, es necesario repartir la carga restante entre los otros pasos del esquema; no obstante, no se considera conveniente hacerlo entre todos los pasos ya que las cantidades que se han fijado están basadas en las decisiones tomadas por el esquema difuso, y si son alteradas el resultado no sería el esperado. Por tal motivo, se decidió que el último

paso contemplara la cantidad de carga restante para obtener el 40% como se detalla en el esquema G; además de que este nivel de sobrecarga tiene menor probabilidad de suscitarse al momento de ocurrir la pérdida de generación. En la Figura 4.16 se puede apreciar la operación de ambos esquemas y en la tabla 4.15 se detalla el resumen de la misma.

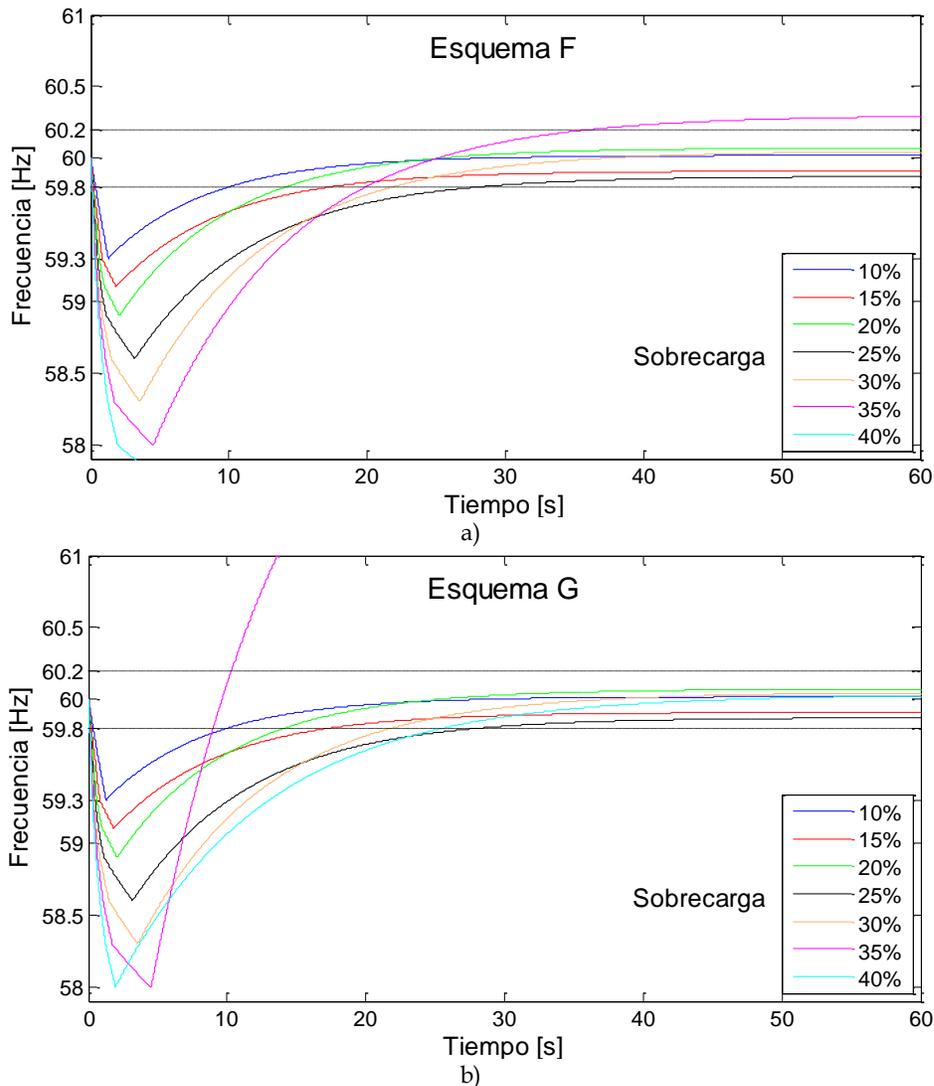


Figura 4.16 Operación de los esquemas estáticos de seis pasos a partir del esquema D5E.

De acuerdo con la operación del esquema difuso D5E, se espera que la frecuencia sea recuperada dentro de la banda operativa para 10%, 15%, 20%, 25%, 30% y 35% de sobrecarga y se espera una operación fallida para la sobrecarga de 40%. Sin embargo, en la Figura 4.16 a) se observa que el esquema F opera como se espera para 6 contingencias y para el caso de 35% la frecuencia termina en un valor por encima de los valores aceptables, misma que se puede recuperar mediante el gobernador de velocidad. Por lo tanto, se tienen 5 eventos recuperados con éxito que corresponden a

las sobrecargas de 10%, 15%, 20%, 25% y 30%; el caso de 35% de sobrecarga excede un poco el valor esperado debido a la variación de los pares a través de las diferentes desconexiones realizadas por el esquema; ya que éstos varían en forma diferente cuando se desconecta la carga en un solo disparo que al hacerlo mediante varios disparos; como se discutió en la operación de los esquemas A y D del apartado 4.3. Finalmente se tiene una operación fallida para la sobrecarga de 40%, misma que no es aceptable ya que al presentarse un disturbio de tal magnitud el esquema no será capaz de desconectar la carga suficiente, resultando en una disminución excesiva de la frecuencia que incursiona en la zona de daño de las turbinas. Así entonces, este primer esquema no es conveniente para sobrecargas mayores a 35%.

Por otro lado, la operación del esquema G que se aprecia en la Figura 4.16 b), muestra una operación adecuada para 6 sobrecargas que son 10%, 15%, 20%, 25%, 30% y 40%, y un exceso de tiro de carga para la contingencia de 35%. Esto se debe a la cantidad de carga disparada para dicha contingencia; sin embargo, la acción del gobernador de velocidad se comienza a ver reflejada aproximadamente a los 12 segundos de iniciado el disturbio; por lo tanto, la frecuencia se podría reducir a 60 Hz mediante los controles de los generadores. En la tabla 4.15 detalla el resumen de la operación de los esquemas F y G.

**Tabla 4.15 Resumen de la operación de los esquemas estáticos de seis pasos.**

Esquema	Sobrecarga [%]	Disparos realizados	LS total [%]	T <sub>G</sub> final [pu]	T <sub>L</sub> final [pu]	Frecuencia final [Hz]
F	10	1	10.05	0.911	0.894	60.01779
	15	2	14.79	0.863	0.845	59.90895
	20	3	20.09	0.815	0.791	60.06976
	25	4	24.67	0.768	0.743	59.87131
	30	5	29.94	0.720	0.689	60.04361
	35	6	35.28	0.672	0.634	60.29061
	40	6	35.28	0.620	0.634	57.12204
G	10	1	10.05	0.911	0.894	60.01779
	15	2	14.79	0.863	0.845	59.90895
	20	3	20.09	0.815	0.791	60.06976
	25	4	24.67	0.768	0.743	59.87131
	30	5	29.94	0.720	0.689	60.04361
	35	6	39.77	0.672	0.589	63.10951
	40	6	39.77	0.620	0.589	60.02385

En la tabla 4.15 se puede notar que el esquema F no es recomendable para sobrecargas mayores a 35%, aunque es difícil que se susciten no se considera conveniente la utilización del mismo ya que todos los esquemas aquí mostrados se han diseñado para recuperar contingencias de hasta 40% de sobrecarga y en tal caso, la frecuencia incursionaría en la zona de daño de las turbinas. Además se puede

observar que el esquema G opera adecuadamente para la mayoría de los disturbios; sin embargo, se alcanza una frecuencia excesivamente alta para el caso de 35% de sobrecarga, misma que se puede recuperar con los controles de carga-frecuencia de los generadores.

Así pues, se puede decir que el mejor esquema de 6 pasos diseñado a partir de las decisiones tomadas por el esquema difuso D5E es el esquema G. No obstante, de acuerdo con la metodología de la Figura 3.9 se diseñó un esquema de 7 pasos como el que se muestra en la tabla 4.16; el cual debe operar mejor que cualquier esquema estático previo.

**Tabla 4.16 Esquema estático de 7 pasos a partir del esquema D5E.**

Esquema	Paso	Frecuencia de paso [Hz]	Carga a desconectar [%]
H	1	59.3	10.05
	2	59.1	4.74
	3	58.9	5.3
	4	58.6	4.58
	5	58.3	5.27
	6	58	5.15
	7	57.7	4.68

En el esquema H mostrado en la tabla 4.16 se puede observar un pequeño cambio en el porcentaje de tiro de carga del escenario 6. De acuerdo con las decisiones del esquema D5E, dicho paso debería desconectar 5.34% de carga y por lo tanto el último paso tiraría 4.49% para completar los 39.77% de carga que desconecta el esquema D5E. Sin embargo, con base en la operación del esquema F y G se pudo observar que debido a la variación de pares durante las múltiples desconexiones, es conveniente reducir un poco dicho porcentaje en el paso 6 para obtener una frecuencia dentro de la banda operativa. De esta manera se ajustó a 5.15% de desconexión, lo que implica un 4.68% de tiro de carga para el paso 7.

Por otro lado es importante tener en cuenta que si este último cambio en los porcentajes de desconexión no se hubiera realizado, la metodología establecida en el capítulo 3 para el diseño de este tipo de esquemas resultaría en una operación adecuada; ya que únicamente se tendría una frecuencia fuera de la banda operativa, la cual fácilmente se puede recuperar a 60 Hz con los controles de los generadores.

La operación del esquema H se puede apreciar en la Figura 4.17, donde se espera una operación exitosa en todas las contingencias a analizar puesto que se están considerando las decisiones del esquema D5E y la respuesta de los esquemas F y G. Así mismo, en la tabla 4.17 se detalla numéricamente su operación.

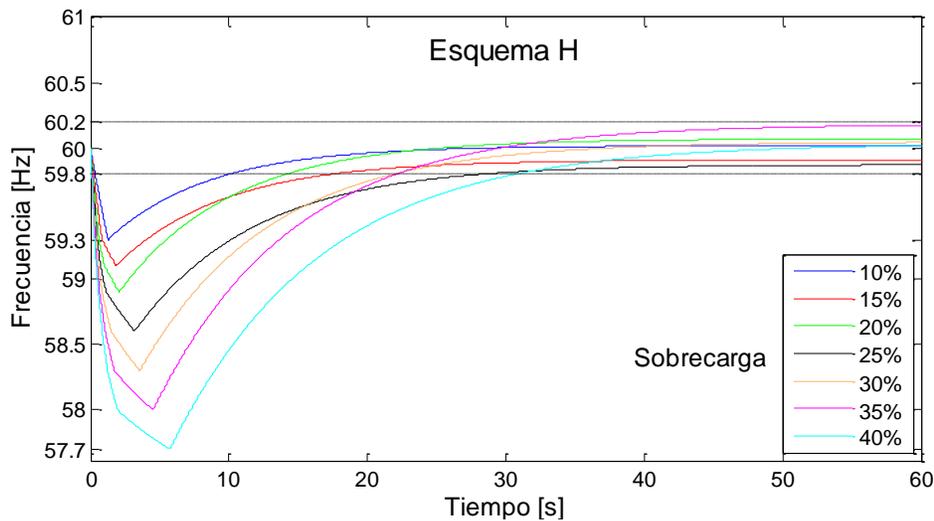


Figura 4.17 Operación del esquema estático de 7 pasos a partir del esquema D5E.

**Tabla 4.17 Resumen de la operación del esquema estático de 7 pasos.**

Esquema	Sobrecarga [%]	Disparos realizados	LS total [%]	T <sub>G</sub> final [pu]	T <sub>L</sub> final [pu]	Frecuencia final [Hz]
H	10	1	10.05	0.911	0.894	60.01779
	15	2	14.79	0.863	0.845	59.90895
	20	3	20.09	0.815	0.791	60.06976
	25	4	24.67	0.768	0.743	59.87131
	30	5	29.94	0.720	0.689	60.04361
	35	6	35.09	0.672	0.636	60.17406
	40	7	39.77	0.623	0.588	60.01955

Al observar la Figura 4.17, se encuentra que finalmente un esquema de 7 pasos cuyos escenarios de desconexión contemplan implícitamente las incertidumbres presentes en el tiro de carga, puede recuperar la frecuencia para todas las contingencias analizadas. Lo anterior implica que la operación del esquema remedial recupera casi en su totalidad el valor de la frecuencia; es decir, los lazos de control primario y secundario del generador tomarán parte mínima en la restauración de la frecuencia.

Como se puede observar en la tabla 4.17, el valor final de la frecuencia para cada una de las contingencias analizadas se encuentra entre los 59.8 Hz y 60.2 Hz, lo que hace del esquema remedial una acción confiable en la protección de las turbinas. En la Figura 4.18 se aprecia la tendencia de tiro de carga de los esquemas estáticos diseñados a partir del esquema difuso D5E y en la tabla 4.18 se reporta el exceso de tiro de carga promedio.

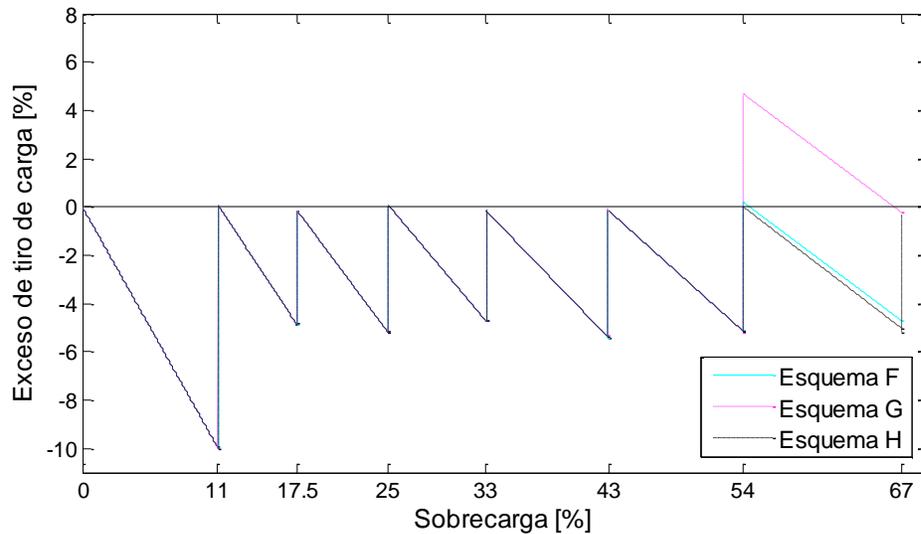


Figura 4.18 Tendencia de sobretiro de carga de los esquemas estáticos diseñados a partir del esquema D5E.

Como se puede observar en la Figura 4.18, los esquemas F, G y H operan de la misma manera durante los primeros 5 disparos; sin embargo, el esquema F termina su operación con un déficit de desconexión de carga de -4.72% ya que sólo puede desconectar una cantidad de carga máxima de 35%. Por otra parte, el esquema G tiene un exceso de tiro de carga cuando se presenta una pérdida de generación de 35%, debido a que se desconecta casi el equivalente a 40% de carga, situación que se ve compensada ante la última contingencia. Finalmente el esquema H al agregar un disparo más en sus escenarios, muestra durante toda su operación la desconexión adecuada de carga. Por tal motivo, es posible observar que en cada uno de los disparos el pico superior se encuentra prácticamente en 0% de exceso de desconexión o en valores muy cercanos a éste, razón por la que no se presenta un déficit de tiro de carga.

Tabla 4.18 Sobretiro de carga promedio de los esquemas estáticos a partir del esquema D5E.

Esquema	Promedio de exceso de tiro de carga [%]
F	-2.928
G	-2.554
H	-3.392

De acuerdo con la tabla 4.18, se nota que los tres esquemas presentan un promedio negativo de sobretiro de carga. Esto no implica que se tenga un déficit de desconexión, sino que durante toda la operación de los esquemas o en el mayor tiempo de operación, los valores de exceso de tiro de carga se encontraron entre cero y valores negativos. Por lo tanto, al promediar los valores de los extremos en cada disparo se obtiene un valor negativo. De aquí que para los esquemas F y G se tiene un

promedio más cercano a cero, puesto que se tuvieron valores positivos (desconexión de carga en exceso para la contingencia de 35%), especialmente para el esquema G. El promedio de exceso de tiro de carga reporta un dato valioso cuando los picos superiores de los esquemas no se encuentran cercanos a 0%. Es decir, el promedio de tiro de carga expresa la efectividad en la operación de un esquema cuando se presenta exceso y/o déficit de tiro de carga.

# CAPÍTULO 5:

## CONCLUSIONES

### 5.1 CONCLUSIONES

Éste trabajo se realizó bajo la motivación de aplicar técnicas de inteligencia artificial que permitan obtener mejores resultados en el diseño de esquemas de tiro de carga por baja frecuencia respecto de los resultados obtenidos convencionalmente.

En ésta tesis se combinaron dos técnicas inteligentes que son la lógica difusa y un sistema aditivo difuso para desarrollar un sistema de inferencia difuso. Por una parte la lógica difusa permite la representación del proceso de tiro de carga mediante conjuntos difusos para lograr la interpretación de las incertidumbres de las cargas a desconectar. Por otro lado, el sistema aditivo difuso permite crear una base de conocimiento para realizar la toma de decisiones y la inferencia de un porcentaje exacto de tiro de carga; el cual es el mínimo necesario para recuperar la estabilidad de frecuencia del sistema.

Los esquemas mostrados a lo largo del trabajo se probaron en un sistema equivalente; es decir, en un sistema cuya capacidad de generación, inercia y amortiguamiento de carga se representan a través una sola máquina. Por lo tanto, no se mostraron los tipos y características de las turbinas ni la topología de la red. Únicamente se diseñó la primera etapa del tiro de carga; la cual tiene lugar en los primeros segundos de la operación del esquema y consiste en la desconexión inmediata de bloques de carga para regular en lo mayor posible el balance entre generación y demanda sin la intervención de los controles del generador.

Esta primera acción del esquema es muy importante en una situación de emergencia, ya que evita que la frecuencia disminuya hasta incursionar en la zona de daño de las turbinas en un tiempo corto. Así, se da suficiente tiempo para que la acción de los controles de los generadores se vea reflejada en el comportamiento de la frecuencia, generalmente entre 10 y 12 segundos después de iniciado el problema. De lo contrario el sistema podría colapsar y/o presentar daños irreversibles en las turbinas, lo que generaría pérdidas económicas exorbitantes para la empresa en cuestión.

Con ésta tesis se logró establecer una metodología para el diseño de esquemas dinámicos de tipo difuso para el tiro de carga por baja frecuencia y una metodología para el diseño de esquemas estáticos de tiro de carga basados en la operación de un esquema difuso. Con ello, se crearon esquemas estáticos y dinámicos que desconectan cantidades de carga más apropiadas desde la primera etapa, con lo que la acción de los controles de los generadores será mínima. De esta manera es posible asegurar la estabilidad de frecuencia del sistema desde los primeros instantes del disturbio.

Los esquemas estáticos desarrollados a partir del esquema difuso contemplan las incertidumbres del proceso de tiro de carga de manera implícita.

Un esquema difuso de desconexión de carga presenta varias ventajas frente a un esquema estático. Esto se debe a que está compuesto por técnicas inteligentes que lo hacen adaptable, con capacidad de razonamiento y de toma de decisiones. Gracias al conocimiento que le es transmitido por el experto a través de las reglas de inferencia difusa y de la disposición de la tabla de reglas.

Un esquema difuso se encuentra monitoreando los niveles de frecuencia y su variación cada milisegundo. En el momento que la frecuencia disminuye a 59.3 Hz o a un nivel menor, el esquema realiza el cálculo de la carga que debe tirar a través del manejo de incertidumbres. Por lo tanto, este esquema entrega los resultados deseados para cualquier nivel de pérdida de generación.

El esquema difuso D5E tiene la capacidad de recuperar la frecuencia mediante un solo disparo de carga siempre que la contingencia sea de magnitud igual o menor a la sobrecarga máxima de diseño; en caso contrario, el esquema realizará más de un disparo.

El diseño del sistema de inferencia difuso permitió conocer el potencial que tiene la aplicación de la inteligencia artificial y al mismo tiempo adquirir experiencia en su diseño, ya que inicialmente se probó el sistema con 3 funciones de membresía en las entradas y 4 funciones de membresía en la salida. Sin embargo, no se obtuvieron resultados contundentes ya que muchos de ellos terminaban en frecuencias fuera de la banda operativa, aunque muy cercanos a ésta. Dicha situación permitió identificar que se requería considerar más incertidumbres en la base de reglas, por lo que se decidió incluir 2 funciones de membresía más en las variables de entrada y 2 funciones de membresía más en las variables de salida. Así, el esquema difuso de 5 funciones de membresía en sus entradas y 6 funciones de membresía en su salida fue compuesto por una base con 25 reglas de inferencia difusa. Este nuevo sistema difuso aportó los resultados esperados ya que con un solo disparo de carga logró recuperar la frecuencia para cada una de las contingencias analizadas.

No se consideró realizar un esquema difuso con más funciones de membresía ya que el esquema D5E contiene la suficiente base inteligente para solventar el problema de incertidumbres y por tanto de tiro de carga.

Después del desarrollo de ésta tesis se puede decir que la utilización de técnicas sofisticadas de inteligencia artificial como la lógica difusa y los sistemas aditivos difusos permiten mejorar el comportamiento de procesos continuos que no se puede discretizar fácilmente como el tiro de carga por baja frecuencia.

## 5.2 APORTACIONES

Las principales aportaciones de ésta tesis son:

- Aplicación de la lógica difusa y de un sistema aditivo difuso para diseñar un sistema de inferencia difuso.
- Elaboración de una metodología para diseñar esquemas dinámicos de tiro de carga por baja frecuencia utilizando un sistema de inferencia difuso.
- Elaboración de una metodología para diseñar esquemas estáticos de tiro de carga por baja frecuencia a partir de un esquema dinámico de tipo difuso.
- Desarrollo de un programa computacional en FORTRAN 90 para realizar el tiro de carga por baja frecuencia con esquemas estáticos en SEP.
- Desarrollo de un programa computacional en FORTRAN 90 para diseñar un sistema de inferencia difuso.
- Desarrollo de un programa computacional en FORTRAN 90 para realizar el tiro de carga por baja frecuencia con esquemas dinámicos de tipo difuso en SEP.

## 5.3 RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS

Se considera importante realizar las siguientes recomendaciones para trabajos futuros:

- Incluir el modelo de la turbina en las simulaciones.
- Incluir la acción del gobernador de velocidad.
- Determinar el lugar donde se tirará la carga.
- Utilizar un algoritmo de optimización para mejorar la sintonización de las funciones de membresía en el esquema difuso.
- Diseñar esquemas dinámicos con otras técnicas inteligentes como redes neuronales y redes neurodifusas para poder comparar su comportamiento y encontrar debilidades y fortalezas de cada uno.



# REFERENCIAS

- [1] Smaha D. W., Rowland C. R. y Pope J. W., "Coordination of Load Conservation with Turbine-Generator Underfrequency Protection", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-99, No. 3, Mayo-Junio 1980.
- [2] Xiong X. y Li W., "A New Under-Frequency Load Shedding Scheme Considering Load Frequency Characteristics", *IEEE International Conference on Power System Technology*, 2006.
- [3] Romero R. D., Instituto Politécnico Nacional, SEPI ESIME, "Control de Sistemas Eléctricos de Potencia", *Apuntes de Maestría*, México D. F., 2013.
- [4] Lokay H. E. y Burtnyk V., "Application of Underfrequency Relays for Automatic Load Shedding", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-87, No. 3, Marzo 1968.
- [5] Maliszewski R. M., Dunlop R. D. y Wilson G. L., "Frequency Actuated Load Shedding and Restoration, Part I-Philosophy", *IEEE Summer Power Meeting and EHV Conference*, Los Angeles, California, USA, 1970.
- [6] Horowitz S. H., Politis A. y Gabrielle A. F., "Frequency Actuated Load Shedding and Restoration, Part II-Implementation", *IEEE Summer Power Meeting and EHV Conference*, Los Angeles, California, USA, 1970.
- [7] Warren C. N., General Electric Company, Switchgear Business Department, "Load Shedding, Load Restoration and Generator Protection Using Solid-State and Electromechanical Underfrequency Relays", *Nota de Aplicación Vigente*, Philadelphia, 2014.
- [8] Kundur P., *Power System Stability and Control*, Mc. Graw-Hill, 1994.
- [9] Sánchez C. J. y Romero R. D., "Bases para el Diseño de Esquemas de Tiro de Carga por Baja Frecuencia Mediante Lógica Difusa", *Decimocuarto Congreso Nacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas (XIV CNIES)*, México D. F., 2013.
- [10] Faranda R., Pievatolo A. y Tironi E., "Load Shedding: A New Proposal", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 22, No. 4, Noviembre 2007.
- [11] IEEE Power Engineering Society, "C37.106™ IEEE Guide for Abnormal Frequency Protection for Power Generating Plants", *IEEE Standards*, IEEE USA, Febrero 2004.
- [12] Villa C. G. y Román V. N., "Actualización del Esquema de Desconexión de Carga por Baja Frecuencia en el Sistema Interconectado Nacional", *Primera Semana de la Ingeniería*, Comisión Federal de Electricidad (CFE), Centro Nacional de Control de Energía (CENACE), Guadalajara, Jalisco, México, Octubre 2012.
- [13] Anderson P. M., *Power System Protection*, John Wiley & Sons, New York, IEEE PRESS, 1999.
- [14] Bevrani H., *Robust Power System Frequency Control*, Springer, 2009.
- [15] Elgerd O. I., "Control of Electric Power Systems", IEEE Control Systems Society, *Control Systems Magazine*, Vol. 1, No. 2, 1981.
- [16] Guillermo Francis Medina, Análisis y Control de la Frecuencia de Sistemas Eléctricos de Potencia en Estado de Emergencia. Tesis para obtener el grado de Maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, División de Estudios de Posgrado, Monterrey, Nuevo León, Noviembre, 1995.
- [17] Aboytes G. F., Sánchez T. F., Dorantes G. E., Salinas B. H. y Ramírez B. R., "Control de Potencia Activa-Frecuencia en Sistemas Eléctricos de Potencia", *Programa de Actividades Regionales en el Subsector Eléctrico del Istmo Centroamericano (PARSEICA)*, CENACE-CFE, Monterrey, Nuevo León, México, Diciembre 1990.
- [18] Cox E., "Fuzzy Fundamentals", *Advanced Technology/Circuits IEEE Spectrum*, Octubre 1992.
- [19] Cox E., "Adaptive Fuzzy Systems", *Advanced Technology / Controls, IEEE Spectrum*, Febrero 1993.
- [20] Kosko B., *Fuzzy Engineering*, Prentice Hall, 1997.

- [21] Kosko B., "Fuzzy Systems as Universal Approximators", *IEEE Transactions on Computers*, Vol. 43, No. 11, Noviembre 1994.
- [22] Romero R. D., Instituto Politécnico Nacional, SEPI ESIME, "Control Inteligente", *Apuntes de Maestría*, México D. F., 2013.
- [23] Fox B., Thompson J. G. y Tindall C. E., "Adaptive Control of Load Shedding Relays Under Generation Loss Conditions", *IET Fourth International Conference on Developments in Power Protection*, 1989.
- [24] Thompson J. G. y Fox B., "Adaptive Load Shedding for Isolated Power Systems", *IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 141, No. 5, Septiembre 1994.
- [25] Tso S. K., Zhu T. X., Zeng Q. Y. y Lo. K. L., "Evaluation of Load Shedding to Prevent Dynamic Voltage Instability Based on Extended Fuzzy Reasoning", *IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 144, No. 2, Marzo 1997.
- [26] Maiorano A., Sbrizzai R., Torelli F. y Trovato M., "Intelligent Load Shedding Schemes for Industrial Customers with Congregation Facilities", *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, Vol. 2, 1998.
- [27] Sallam A. A. y Khafaga A. M., "Fuzzy Expert System Using Load Shedding for Voltage Instability Control", *Proceedings of the 2002 Large Engineering Systems Conference on Power Engineering*, IEEE, 2002.
- [28] Hery P. M., Aditya P. C. y Purwanto E., "Adaptive Load Shedding of the Power System Based on Neural Network", *Proceedings of IEEE TENCON*, 2002.
- [29] Terzija V. V. y Koglin H. J., "Adaptive Underfrequency Load Shedding Integrated with a Frequency Estimation Numerical Algorithm", *IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 149, No. 6, Noviembre 2002.
- [30] Shokooch F., Dai J. J., Shokooch S., Tastet J., Castro H., Khandelwal T. y Donner G., "An Intelligent Load Shedding (ILS) System Application in a Large Industrial Facility", *IEEE Industry Applications Conference, Fortieth IAS Annual Meeting*, Vol. 1, 2005.
- [31] Shokooch F., Dai J. J., Shokooch S., Tastet J., Castro H., Khandelwal T. y Donner G., "Intelligent Load Shedding-Case Study of the Application in a Large Industrial Facility", *IEEE Industry Applications Magazine*, 10.1109/MIAS.2010.939814, www.ieee.org/ias, Marzo-Abril 2011.
- [32] Hsu C. T., Kang M. S. y Chen C. S., "Design of Adaptive Load Shedding by Artificial Neural Networks", *IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 152, No. 3, Mayo 2005.
- [33] Terzija V. V., "Adaptive Underfrequency Load Shedding Based on the Magnitude of the Disturbance Estimation", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 21, No. 3, Agosto 2006.
- [34] Hsu C. T., Chuang H. J. y Chen C. S., "Artificial Neural Network Based Adaptive Load Shedding for an Industrial Cogeneration Facility", *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS'08)*, 2008.
- [35] Dong M., Lou C. y Wong C., "Adaptive Underfrequency Load Shedding", *Tsinghua Science and Technology* ISSN 1007-0214 14/18 pp 823-828, Vol. 13, No. 6, Diciembre 2008.
- [36] Chin V., Dong Z. Y., Saha T. K., Ford J. y Zhang J., "Adaptive and Optimal Underfrequency Load Shedding", *Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC'08)*, 2008.
- [37] Calderaro V., Galdi V., Cortes C. M. y Palma B. R., "Fuzzy Load Shedding Strategy in Distribution Systems", *11th International Conference on Intelligent Systems Design and Applications*, 2011.
- [38] Basaran C., Kang. K. D., Zhou Y. y Suzer M. H., "Adaptive Load Shedding via Fuzzy Control in Data Stream Management Systems", *5th IEEE International Conference on Service-Oriented Computing and Applications (SOCA)*, 2012.
- [39] Hong Y. Y. y Chen P. H., "Genetic-Based Underfrequency Load Shedding in a Stand-Alone Power System Considering Fuzzy Loads", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 27, No. 1, Enero 2012.
- [40] Laghari J. A., Mokhlis H., Halim A. B., Karimi M. y Shahriari A., "An Intelligent Underfrequency Load Shedding for Islanded Distribution Network", *IEEE International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO 2012)*, Meleka, Malasia, 6-7 Junio 2012.
- [41] Ben H. M., Jouini H y Chebbi S., "Load Shedding Strategy Application Using Fuzzy Logic", *IEEE International Conference on Electrical Engineering and Software Applications (ICEESA)*, Túnez, 2013.

- [42] Tang J., Liu J., Ponci F. y Monti A., “Adaptive Load Shedding Based on Combined Frequency and Voltage Stability Assessment Using Synchrophasor Measurements”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 28, No. 2, Mayo 2013.
- [43] Gustavo Velázquez Martínez, Diseño de un Esquema de Tiro de Carga por Bajo Voltaje en Sistemas de Potencia con Cargas Dinámicas. Tesis para obtener el grado de Maestría, Instituto Politécnico Nacional, SEPI ESIME, México, D. F., Septiembre, 2012.
- [44] Agustín Ramírez Sánchez, Simulación de la Protección de Baja Frecuencia en Redes de Distribución en Condición de Isla. Tesis para obtener el grado de Maestría, Instituto Politécnico Nacional, SEPI ESIME, México, D. F., Mayo, 2013.
- [45] Elgerd O. I., *Electric Energy Systems Theory: An Introduction*, Mc Graw-Hill, 1971, Edición TMH.
- [46] Wood A. J. y Wollenberg B. F., *Power Generation, Operation, and Control*, John Wiley & Sons, 1996, Segunda edición.
- [47] Mohd Z. A. A., Mohd H. H. y Aziz M. S., “A Review of Under-Frequency Load Shedding Scheme on TNB System”, *National Power and Energy Conference (PECon) Proceedings*, Malasia, 2004.
- [48] Bevrani H. y Hiyama T., *Intelligent Automatic Generation Control*, CRC Press, 2011.
- [49] Perumal N. y Che A. A., “Automatic Load Shedding in Power System”, *National Power and Energy Conference (PECon) Proceedings*, Malasia, 2003.
- [50] Murty P. S. R., *Operation and Control in Power Systems*, BS Publications, 2008.
- [51] Omar Y. R., Yusof S., Hashim H. y Abdul R. H. A., “Under Frequency Load Shedding (UFLS): Principles and Implementation”, *IEEE International Conference on Power and Energy (PECon)*, Malasia, 2010.
- [52] Ross T. J., *Fuzzy Logic With Engineering Applications*, John Wiley & Sons, 2010, Tercera edición.
- [53] Seising R., “The 40<sup>th</sup> Anniversary of Fuzzy Sets: A New View on System Theory”, *IEEE Annual Meeting of the North American Fuzzy Information Processing Society (NAFIPS 2005)*, 2005.
- [54] Hampel R., Chaker N. y Kästner W., “Fuzzy Control Application in Power Plants”, *IEE Colloquium on Fuzzy Logic Controllers in Practice*, Digest No. 1996/200, 1996.
- [55] Boyce W. E. y DiPrima R. C., *Elementary Differential Equations and Boundary Value Problems*, John Wiley & Sons, 2005, Octava edición.
- [56] Coddington E. A., *An Introduction to Ordinary Differential Equations*, Prentice Hall Mathematics Series, 1961.
- [57] Galán M. A., Instituto Politécnico Nacional, SEPI ESIME, “Cálculo Avanzado para Ingenieros I”, *Apuntes de Maestría*, México D. F., 2012.
- [58] Lin C. T. y Lee C. S. G., *Neural Fuzzy Systems: A Neuro-Fuzzy Synergism to Intelligent Systems*, Prentice Hall PTR, 1996.
- [59] Jang J. S. R. y Sun C. T., “Neuro-Fuzzy Modeling and Control”, *Proceedings of the IEEE*, Vol. 83, No. 3, Marzo 1995.
- [60] Jang J. S. R., Sun C. T. y Mizutani E., *Neuro-Fuzzy and Soft Computing: A Computational Approach to Learning and Machine Intelligence*, Prentice Hall, 1997.
- [61] Klir G. J. y Yuan B., *Fuzzy Sets and Fuzzy Logic: Theory and Applications*, Prentice Hall PTR, 1995.
- [62] Chen G. y Tat P. T., *Introduction to Fuzzy Sets, Fuzzy Logic and Fuzzy Control Systems*, CRC Press, 2001.
- [63] Michels K., Klawonn F., Kruse R. y Nürnberger A., *Fuzzy Control: Fundamentals, Stability and Design of Fuzzy Controllers*, Springer, 2006.
- [64] Chien L. C., “Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller-Part I”, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 20, No. 2, Marzo-Abril 1990.
- [65] Driankov D., Hellendoorn H. y Reinfrank M., *An Introduction to Fuzzy Control*, Springer, 1993.
- [66] Kosko B., *Neural Networks and Fuzzy Systems: A Dynamical Systems Approach to Machine Intelligence*, Prentice Hall, 1991.



## APÉNDICE A:

# DESARROLLO MATEMÁTICO DE LA ECUACIÓN DIFERENCIAL QUE MODELA EL COMPORTAMIENTO DE LA FRECUENCIA RESPECTO AL TIEMPO

### A.1 INTRODUCCIÓN

En éste apéndice se muestra el desarrollo matemático de la ecuación (2.32) que se presenta en el capítulo 2; la cual es una ecuación diferencial exacta de primer orden que modela el comportamiento de la frecuencia respecto al tiempo.

### A.2 DESARROLLO MATEMÁTICO

#### A.2.1 Solución de Ecuaciones Diferenciales Exactas de Primer Orden

Una ecuación diferencial exacta tiene la siguiente forma [55, 56, 57]:

$$M + Ny' = 0 \quad (A.1)$$

Donde

$M$ : Términos de la ecuación que no contienen derivada.

$N$ : Términos de la ecuación que multiplican a la derivada.

$y'$ :  $\frac{dy}{dx}$  Cambio de la variable dependiente respecto a la variable independiente.

$x$ : Variable independiente.

$y$ : Variable dependiente.

La solución de una ecuación diferencial exacta es una función  $\phi$  que se define por:

$$\phi = \psi(x, y) \quad (A.2)$$

Donde  $\psi$  es una función que depende tanto de la variable independiente como de la variable dependiente [55, 56].

La derivada parcial de (A.2) utilizando la regla de la cadena es igual a la ecuación diferencial original (A.1). Es decir [57]:

$$\phi' = \psi'(x, y) = \frac{\partial\psi(x, y)}{\partial x} x' + \frac{\partial\psi(x, y)}{\partial y} y' = M + Ny' \quad (A.3)$$

Debido a que  $x$  es una variable independiente, su derivada es igual a 1 y por tanto (A.3) se reduce a [55, 57]:

$$M + Ny' = \frac{\partial\psi(x, y)}{\partial x} + \frac{\partial\psi(x, y)}{\partial y} y' \quad (A.4)$$

La expresión (A.4) indica que una ecuación diferencial es exacta, sí y sólo sí existe una función  $\psi(x, y)$  tal que:

$$\frac{\partial\psi(x, y)}{\partial x} = M \quad (A.5)$$

y

$$\frac{\partial\psi(x, y)}{\partial y} = N \quad (A.6)$$

Además es importante tener en cuenta que:

$$\frac{\partial^2\psi(x, y)}{\partial x\partial y} = \frac{\partial^2\psi(x, y)}{\partial y\partial x} \quad (A.7)$$

Entonces (A.7) se puede reescribir como:

$$\frac{\partial M}{\partial y} = \frac{\partial N}{\partial x} \quad (A.8)$$

De acuerdo con (A.1) y con (A.4) se sabe que:

$$\psi'(x, y) = 0 \quad (A.9)$$

Por lo tanto al integrar (A.9) se obtiene:

$$\psi(x, y) = K \quad (A.10)$$

Donde  $K$  es una constante.

La ecuación (A.10) permite obtener implícitamente las soluciones de la ecuación diferencial exacta (A.1) [55].

### A.2.2 Solución de la Ecuación Diferencial (2.32)

La ecuación diferencial que modela el comportamiento de la frecuencia respecto al tiempo basada en los pares de generación y carga variables es:

$$2H \frac{df'}{dt} + D_T f' = T_a \quad (A. 11)$$

Donde:

- $H$  Constante de inercia del sistema [s].
- $f'$  Cambio de la frecuencia [pu].
- $D_T$  Factor total de amortiguamiento.
- $T_a$  Par de aceleración en la base de la generación restante del sistema [pu].
- $t$  Tiempo [s].

Dividiendo (A. 11) entre 2H se tiene:

$$\frac{df'}{dt} + \frac{D_T}{2H} f' = \frac{T_a}{2H} \quad (A. 12)$$

Igualando (A. 12) con cero:

$$-\frac{T_a}{2H} + \frac{D_T}{2H} f' + \frac{df'}{dt} = 0 \quad (A. 13)$$

Se puede observar que la ecuación (A. 13) tiene la forma de una ecuación diferencial exacta; por lo tanto, al relacionar (A. 13) con (A. 1) se define que:

$$M = -\frac{T_a}{2H} + \frac{D_T}{2H} f' \quad (A. 14)$$

y

$$N = 1 \quad (A. 15)$$

Donde la variable independiente es el tiempo ( $t$ ) y la variable dependiente es el cambio de la frecuencia en pu ( $f'$ ). De acuerdo con (A. 8) se tiene:

$$\frac{\partial \left( -\frac{T_a}{2H} + \frac{D_T}{2H} f' \right)}{\partial f'} = \frac{\partial(1)}{\partial t} \quad (A. 16)$$

Desarrollando (A. 16):

$$\frac{D_T}{2H} \neq 0 \quad (A. 17)$$

La expresión (A. 17) muestra que (A. 13) no es una ecuación diferencial exacta; por lo tanto, se busca un factor integrante  $\mu = \mu(t)$  que la vuelva exacta como se aprecia en (A. 18) [55].

$$\mu \left[ -\frac{T_a}{2H} + \frac{D_T}{2H} f' \right] + \mu \left[ \frac{df'}{dt} \right] = 0 \quad (A. 18)$$

Esto implica que:

$$\frac{\partial \left( \mu \left[ -\frac{T_a}{2H} + \frac{D_T}{2H} f' \right] \right)}{\partial f'} = \frac{\partial(\mu)}{\partial t} \quad (A. 19)$$

Desarrollando (A. 19):

$$\frac{D_T}{2H} \mu = \frac{d\mu}{dt} \quad (A. 20)$$

Reescribiendo (A. 20) se tiene una ecuación diferencial homogénea de primer orden:

$$\frac{d\mu}{dt} - \frac{D_T}{2H} \mu = 0 \quad (A. 21)$$

Desarrollando (A. 21) por el método de variables separables se tiene [57]:

$$\frac{d\mu}{dt} = \frac{D_T}{2H} \frac{1}{\mu} \quad (A. 22)$$

Agrupando términos:

$$\frac{1}{\mu} \frac{d\mu}{dt} = \frac{D_T}{2H} \quad (A. 23)$$

Integrando (A. 23) respecto a la variable independiente ( $t$ ):

$$\int \frac{1}{\mu} \frac{d\mu}{dt} dt = \int \frac{D_T}{2H} dt \quad (A. 24)$$

Debido a que el término de la izquierda en la ecuación (A. 24) no se puede integrar, se aplica el Teorema del Valor Medio; el cual permite que dicha ecuación se pueda reescribir de la siguiente manera [57]:

$$\int \frac{1}{\mu} d\mu = \int \frac{D_T}{2H} dt \quad (\text{A. 25})$$

Es decir  $\frac{d\mu}{dt} dt$  se reescribe como  $d\mu$ . Resolviendo (A. 25) se obtiene:

$$\ln(\mu) = \frac{D_T}{2H} t + k \quad (\text{A. 26})$$

Donde  $k$  es la constante de integración.

Despejando a  $\mu$  de (A. 26) se tiene:

$$\mu = e^{\frac{D_T}{2H} t + k} \quad (\text{A. 27})$$

Aplicando propiedades de los exponentes que se suman, (A. 27) se reescribe como:

$$\mu = e^{\frac{D_T}{2H} t} e^k \quad (\text{A. 28})$$

Donde  $e^k$  es otra constante; la cual será  $\lambda$ , por lo tanto:

$$\mu = \lambda e^{\frac{D_T}{2H} t} \quad (\text{A. 29})$$

Sea  $\lambda = 1$ , el valor de  $\mu$  es:

$$\mu = e^{\frac{D_T}{2H} t} \quad (\text{A. 30})$$

Sustituyendo (A.30) en (A. 18) se tiene:

$$e^{\frac{D_T}{2H} t} \left[ -\frac{T_a}{2H} + \frac{D_T}{2H} f' \right] + e^{\frac{D_T}{2H} t} \left[ \frac{df'}{dt} \right] = 0 \quad (\text{A. 31})$$

La expresión (A. 31) debe ser una ecuación diferencial exacta ya que se ha encontrado el factor integrante  $\mu$ . Para comprobar que esta ecuación realmente es exacta, se debe cumplir la siguiente igualdad [55, 57]:

$$\frac{\partial \left( e^{\frac{D_T}{2H}t} \left[ -\frac{T_a}{2H} + \frac{D_T}{2H} f' \right] \right)}{\partial f'} = \frac{\partial \left( e^{\frac{D_T}{2H}t} \right)}{\partial t} \quad (\text{A. 32})$$

Desarrollando (A. 32):

$$\frac{D_T}{2H} e^{\frac{D_T}{2H}t} = \frac{D_T}{2H} e^{\frac{D_T}{2H}t} \quad (\text{A. 33})$$

Por lo tanto, se dice que (A. 31) es una ecuación diferencial exacta; lo que implica que existe una función  $\phi(t) = \psi(t, f')$  tal que [55]:

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} = e^{\frac{D_T}{2H}t} \left[ -\frac{T_a}{2H} + \frac{D_T}{2H} f' \right] \quad (\text{A. 34})$$

y

$$\frac{\partial \psi}{\partial f'} = e^{\frac{D_T}{2H}t} \quad (\text{A. 35})$$

Integrando parcialmente (A. 34) respecto al tiempo se tiene:

$$\int \frac{\partial \psi}{\partial t} \partial t = \int e^{\frac{D_T}{2H}t} \left[ -\frac{T_a}{2H} + \frac{D_T}{2H} f' \right] \partial t \quad (\text{A. 36})$$

Desarrollando el término de la izquierda de (A. 36):

$$\psi = \left[ -\frac{T_a}{2H} + \frac{D_T}{2H} f' \right] \int e^{\frac{D_T}{2H}t} \partial t + \eta_{(f')} = k_1 \quad (\text{A. 37})$$

Donde  $\eta_{(f')}$  es una constante que depende de  $f'$  debido a que se está integrando parcialmente respecto a  $(t)$  y la función  $\psi$  depende tanto de  $(t)$  como de  $(f')$ . Por otra parte  $k_1$  indica que  $\psi$  es una función constante de acuerdo con lo descrito por (A. 10) [55, 57].

Para determinar el valor de  $\eta_{(f')}$  se sustituye (A. 37) en (A. 35) [55, 57]:

$$\frac{\partial \left( \left[ -\frac{T_a}{2H} + \frac{D_T}{2H} f' \right] \int e^{\frac{D_T}{2H}t} \partial t + \eta_{(f')} \right)}{\partial f'} = e^{\frac{D_T}{2H}t} \quad (\text{A. 38})$$

Desarrollando (A. 38):

$$\frac{D_T}{2H} \int e^{\frac{D_T}{2H}t} \partial t + \frac{d\eta_{(f')}}{df'} = e^{\frac{D_T}{2H}t} \quad (\text{A. 39})$$

Resolviendo la integral:

$$e^{\frac{D_T}{2H}t} + \frac{d\eta_{(f')}}{df'} = e^{\frac{D_T}{2H}t} \quad (A.40)$$

Agrupando términos:

$$\frac{d\eta_{(f')}}{df'} = 0 \quad (A.41)$$

Por lo tanto:

$$\eta_{(f')} = \int \frac{d\eta_{(f')}}{df'} df' = \int 0 df' = k_2 \quad (A.42)$$

Donde  $k_2$  es una constante.

Sustituyendo (A.42) en (A.37):

$$\psi = \left[ -\frac{T_a}{2H} + \frac{D_T}{2H} f' \right] \int e^{\frac{D_T}{2H}t} dt + k_2 = k_1 \quad (A.43)$$

Desarrollando (A.43) se tiene:

$$\psi = \left[ -\frac{T_a}{2H} + \frac{D_T}{2H} f' \right] \frac{2H}{D_T} e^{\frac{D_T}{2H}t} = K \quad (A.44)$$

Donde  $K = k_1 - k_2$  es una constante.

Sea  $K = -\frac{T_a}{D_T}$ :

$$\psi = \left[ -\frac{T_a}{2H} + \frac{D_T}{2H} f' \right] \frac{2H}{D_T} e^{\frac{D_T}{2H}t} = -\frac{T_a}{D_T} \quad (A.45)$$

Despejando  $f'$  de (A.45):

$$f' = \left( -\frac{T_a}{2H e^{\frac{D_T}{2H}t}} + \frac{T_a}{2H} \right) \frac{2H}{D_T} \quad (A.46)$$

Desarrollando (A. 46):

$$f' = \left( -\frac{T_a}{D_T e^{\frac{D_T t}{2H}}} + \frac{T_a}{D_T} \right) \quad (A. 47)$$

La ecuación (A. 47) se puede reescribir como:

$$f' = \left( -\frac{T_a}{D_T} e^{-\frac{D_T t}{2H}} + \frac{T_a}{D_T} \right) \quad (A. 48)$$

Factorizando (A. 48) se obtiene la expresión mostrada como resultado de la ecuación diferencial (2.32) del capítulo 2; misma que se referencía como (A.11) en éste apéndice.

$$f' = \frac{T_a}{D_T} \left[ 1 - e^{-\frac{D_T t}{2H}} \right] \quad (A. 49)$$

## APÉNDICE B:

# DISEÑO DE UN SISTEMA DE INFERENCIA DIFUSO

### B.1 INTRODUCCIÓN

En éste apéndice se describe el proceso para diseñar un sistema de inferencia difuso; el cual consta de tres etapas que son la difusificación, la base de reglas-máquina de inferencia y la dedifusificación. Las tareas que comprende cada etapa se ejecutan a través de dos técnicas de inteligencia artificial que son: lógica difusa y un sistema aditivo difuso. La lógica difusa se encarga de la difusificación que convierte los valores de entrada en valores difusos mediante funciones de membresía. Por otra parte el sistema aditivo difuso efectúa la segunda y tercera etapa; es decir, la base de reglas que se compone por un conjunto de declaraciones difusas tipo si-entonces es evaluada a través del mecanismo de inferencia. En esta etapa se hace la toma de decisiones en forma lógica basada en la experiencia humana. Finalmente los resultados difusos pasan al módulo o etapa de dedifusificación para obtener los valores de salida en forma nítida. Previo a ello es necesario definir una serie de conceptos de teoría de conjuntos difusos y de lógica difusa, ya que en esta ciencia está el soporte de este tipo de sistemas inteligentes.

### B.2 IMPORTANCIA DE LOS SISTEMAS DIFUSOS

Durante muchos años los sistemas difusos no fueron considerados como un tópico de gran importancia. Sin embargo, a partir de 1937 con la simplificación del Teorema fundamental del análisis real del álgebra, conocido como el Teorema de Stone-Weierstrass; este campo comenzó a tomar la importancia debida [52]. Hoy en día la lógica difusa es una de las tecnologías más exitosas para desarrollar sistemas de control sofisticado [18].

En general, la lógica difusa puede aplicarse a fenómenos continuos que no pueden descomponerse fácilmente en segmentos discretos, cuando una o más variables de control son continuas y/o cuando no existe un modelo matemático o si existe es demasiado complejo capturar analíticamente todos los datos. También se emplea

cuando no se pueden controlar todas las variables mediante una técnica convencional [18, 52]. Otro beneficio es que tiene la capacidad de dar soluciones numéricas muy aproximadas en tiempos reducidos; es decir, se utiliza para hacer evaluaciones suficientemente rápidas en tiempo real, o cuando se ocupa demasiada memoria en el diseño del sistema [18]. De este modo los sistemas difusos tienen un alto potencial para poder reproducir y/o evaluar el comportamiento de sistemas complejos; como pueden ser sistemas de ingeniería, biológicos, médicos, sociales, políticos, económicos, etc. [52].

Un modelo difuso también puede considerarse como una relación entre el modelo de un sistema y el modelo de incertidumbres. Esto se debe a que un modelo difuso está diseñado para comprender el comportamiento de un sistema para el que no existe modelo. Otra característica es que a la vez son robustos, en el sentido de que la estructura del sistema se forma a partir de las incertidumbres de las variables de entrada y de salida [52]. Por lo tanto estos modelos pueden ser ampliamente utilizados en el área de Ingeniería Eléctrica, ya que en los SEP existen muchas incertidumbres que pueden ser manejadas mediante lógica difusa [9]. De esta manera con mayor frecuencia se van empleando modelos difusos para la automatización de plantas de potencia, puesto que el manejo de las incertidumbres hace posible la reproducción del comportamiento de cualquier sistema [54].

Formalmente se dice que un sistema es difuso si su entrada  $u(t)$ , salida  $y(t)$ , estados  $x(t)$  o alguna combinación entre ellos puede ser representada mediante conjuntos difusos [53].

### **B.3 CONJUNTOS DIFUSOS Y FUNCIONES DE MEMBRESÍA**

La teoría clásica de conjuntos señala que la transición de un elemento entre pertenecer y no pertenecer a un conjunto específico es abrupta y bien definida [22, 52]. Esto es que un conjunto nítido tiene dos niveles de pertenencia para un elemento determinado, que puede ser 1 o 0. Sin embargo, en teoría de conjuntos difusos ésta transición es gradual; es decir, un *conjunto difuso* es aquel que permite que sus elementos tengan cierto grado de pertenencia a uno o varios conjuntos dentro del mismo universo a través de traslapes [18, 22, 58]. De esta manera los conjuntos difusos introducen ambigüedad para hacer sus límites flexibles y por tanto, pueden considerarse como una extensión y generalización de los conceptos de conjuntos clásicos [58, 59]. La función característica indica el grado de pertenencia de  $[0 \rightarrow 1]$  y generaliza los valores asignados al conjunto universal dentro de un rango específico; también se conoce como *función de membresía* (FM) [22].

Un conjunto difuso  $A$  en el universo del discurso  $U$  puede ser definido como un conjunto de pares ordenados [22, 58, 59]:

$$A = \{x, \mu_A(x) | x \in U\} \quad (B.1)$$

Donde:

$\mu_A(\cdot)$  Función de membresía de  $A$ .

$\mu_A(x)$  Grado de membresía o pertenencia de  $x$  en  $A$ .

### B.3.1 Propiedades de los Conjuntos Difusos

Las propiedades que presentan los conjuntos difusos son [22, 58, 59, 60]:

*Subconjuntos.* Implica que un conjunto difuso está contenido en otro conjunto difuso. En otras palabras, indica que  $A$  es un subconjunto de  $B$  sí y sólo sí  $\mu_A(x) \leq \mu_B(x)$  para toda  $x$ ; esto es:

$$A \subseteq B \Leftrightarrow \mu_A(x) \leq \mu_B(x) \quad (B.2)$$

*Soporte.* Si  $A$  es un conjunto difuso de  $\mathbf{X}$ ; el soporte de  $A$  denotado como  $supp(A)$  es el subconjunto nítido de  $\mathbf{X}$  cuyos elementos tienen grados de membresía diferentes de cero en  $A$ .

$$supp(A) = \{x \in \mathbf{X} | \mu_A(x) > 0\} \quad (B.3)$$

*Altura.* La altura de un subconjunto difuso  $A$  es el grado mayor de membresía de cualquier elemento de  $A$  y se denota por  $hgt(A)$ .

$$hgt(A) = \max_x \mu_A(x) = \underbrace{supp \mu_A(x)}_x \quad (B.4)$$

*Conjunto normal.* Un conjunto  $A$  de  $x$  es llamado normal si existe al menos un elemento  $x \in \mathbf{X}$  tal que  $\mu_x = 1$ ; de lo contrario se denomina *conjunto subnormal*.

*Corte  $\alpha$ .* El corte  $\alpha$  de un subconjunto difuso  $A$  es un conjunto nítido  $A(\alpha)$  que contiene todos los elementos del conjunto universal  $\mathbf{X}$ , que tienen grado de membresía en  $A$  mayor o igual que un valor específico de  $\alpha$ .

$$A_\alpha = \{x \in \mathbf{X} | \mu_A(x) \geq \alpha\} \quad (B.5)$$

*Cardinalidad escalar.* En un conjunto difuso  $A$ , la cardinalidad escalar es la suma de todos los grados de membresía de los elementos de  $A$ .

$$|A| = \sum_{x \in \mathbf{X}} \mu_A(x) \quad (B.6)$$

### B.3.2 Operaciones entre Conjuntos Difusos

Las operaciones entre conjuntos difusos son homólogas a las operaciones con conjuntos clásico. Sin embargo, en conjuntos difusos existe una mayor gama de operaciones llamadas normas T y normas S o conormas T que se definen de la intersección y de la unión respectivamente [61]. Las operaciones estándar entre conjuntos difusos son la unión (disyunción), la intersección (conjunción) y el complemento (negación) [22, 52, 59].

*Unión.* Sean dos conjuntos difusos  $A$  y  $B$  como los que se muestran en la Figura B.1, la unión resulta en un conjunto difuso  $C$ . Se denota por  $C = A \cup B$  o  $C = A \text{ OR } B$  cuya función de membresía es:

$$\mu_C(x) = \text{máx}(\mu_A(x), \mu_B(x)) = \mu_A(x) \vee \mu_B(x) \quad (B.7)$$

Por lo tanto:

$$A \subseteq A \cup B \quad \& \quad B \subseteq A \cup B \quad (B.8)$$

La Figura B.2 muestra la unión de dos conjuntos difusos  $A$  y  $B$ .

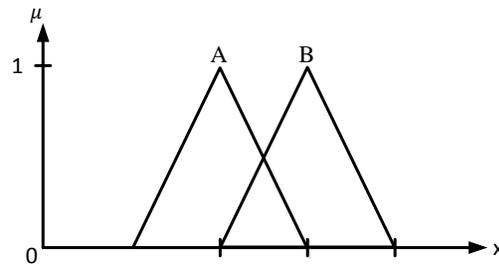


Figura B.1 Dos conjuntos difusos: A y B.

*Intersección.* La intersección de dos conjuntos difusos  $A$  y  $B$ , es un conjunto difuso  $C$ . Este conjunto se puede escribir como  $C = A \cap B$  o  $C = A \text{ AND } B$  cuya función de membresía es:

$$\mu_C(x) = \text{mín}(\mu_A(x), \mu_B(x)) = \mu_A(x) \wedge \mu_B(x) \quad (B.9)$$

Por lo tanto:

$$A \cap B \subseteq A \quad \& \quad A \cap B \subseteq B \quad (B.10)$$

En la Figura B.3 se muestra la intersección de los conjuntos difusos  $A$  y  $B$ .

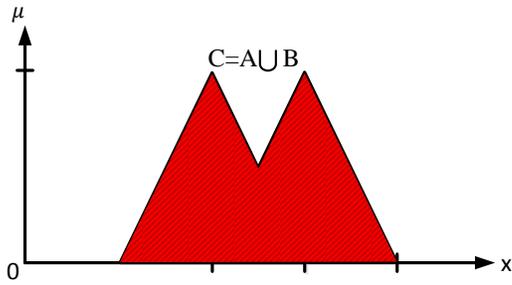


Figura B.2 Unión de conjuntos difusos A y B.

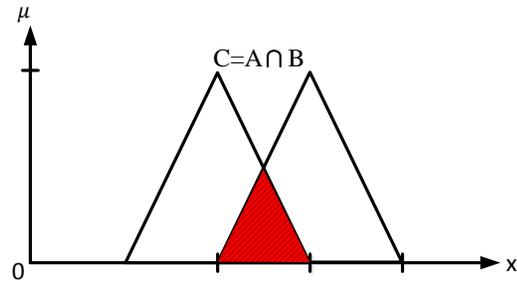


Figura B.3 Intersección de conjuntos difusos A y B.

*Complemento.* El complemento de un conjunto difuso  $A$  se denota por  $\bar{A}$ ,  $\neg A$  o  $NOT A$  y está definido por:

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (B.11)$$

El complemento de  $A$  se puede apreciar en la Figura B.4.

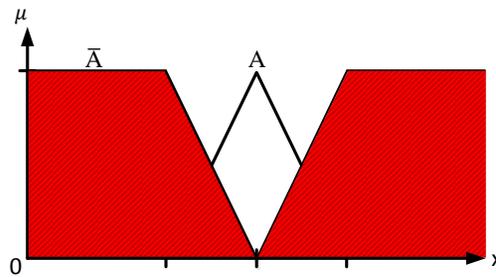


Figura B.4 Complemento del conjunto difuso A.

### B.3.3 Tipos de Funciones de Membresía de Una Dimensión

Debido a que las funciones de membresía muestran el grado de pertenencia de los elementos de los conjuntos difusos. Es conveniente poder definir las a través de una expresión matemática. Las funciones de membresía de una dimensión más conocidas son [59, 60]:

*Triangular.* Esta función de membresía consta de tres parámetros  $(a, b, c)$  que determinan los vértices del triángulo.

$$FM_{triangular}(x; a, b, c) = \begin{cases} 0 & \text{si } x < a \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{si } a \leq x < b \\ \frac{c-x}{c-b} & \text{si } b \leq x \leq c \\ 0 & \text{si } x > c \end{cases} \quad (B.12)$$

La ecuación (B.12) también se puede expresar mediante máximos y mínimos de acuerdo con:

$$FM_{triangular}(x; a, b, c) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b}\right), 0\right) \quad (B.13)$$

En la Figura B.5 se muestra una función de membresía triangular.

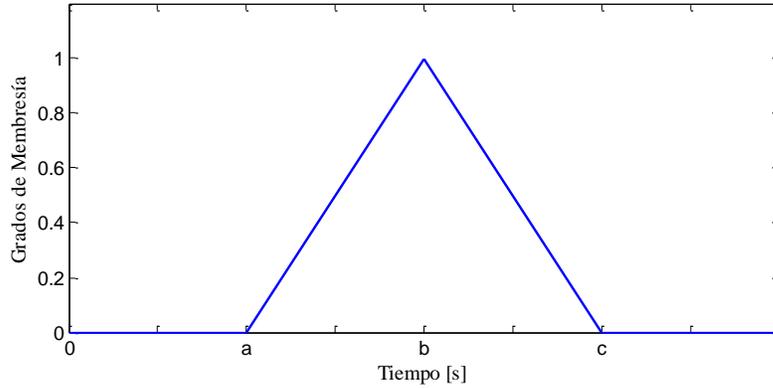


Figura B.5 FM triangular.

*Trapezoidal.* La función de membresía trapezoidal y la función de membresía triangular son las funciones más comúnmente utilizadas para representar conjuntos difusos y los grados de pertenencia de sus elementos. Una función de membresía trapezoidal está definida a través de cuatro parámetros ( $a, b, c, d$ ) como se muestra a continuación:

$$FM_{trapezoidal}(x; a, b, c, d) = \begin{cases} 0 & \text{si } x < a \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{si } a \leq x < b \\ 1 & \text{si } b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c} & \text{si } c < x \leq d \\ 0 & \text{si } x > d \end{cases} \quad (B.14)$$

Esta función de membresía también se puede expresar con máximos y mínimos; lo que hace que (B.14) se convierta en:

$$FM_{trapezoidal}(x; a, b, c, d) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{d-x}{d-c}\right), 0\right) \quad (B.15)$$

En la Figura B.6 se muestran tres tipos de función de membresía trapezoidal.

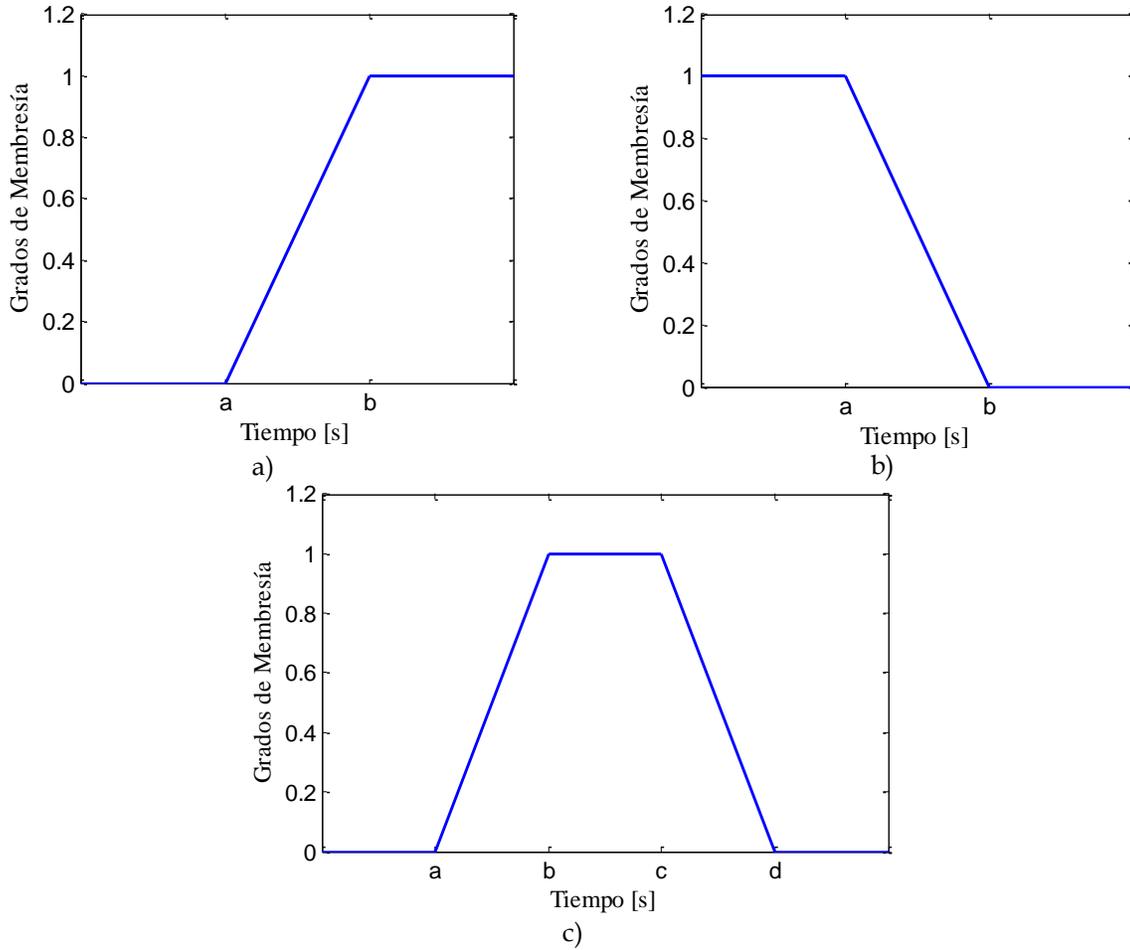


Figura B.6 FM: a) trapezoidal derecha, b) trapezoidal izquierda, c) trapezoidal completa.

La ecuación (B.14) corresponde a la función de membresía trapezoidal completa mostrada en la Figura B.6 c). Sin embargo, a menudo se utilizan funciones de membresía trapezoidales izquierda y/o derecha para representar conjuntos difusos con valores extremos de una variable. Para la construcción de este tipo de funciones de membresía únicamente se consideran dos parámetros ( $a, b$ ); por lo tanto, la ecuación que modela a la función de membresía trapezoidal derecha representada por la Figura B.6 a) es (B. 16):

$$FM_{trapezoidal\ derecha}(x; a, b) = \begin{cases} 0 & \text{si } x < a \\ \frac{x - a}{b - a} & \text{si } a \leq x < b \\ 1 & \text{si } x \geq b \end{cases} \quad (B.16)$$

Por otra parte, la ecuación (B.17) se utiliza para construir funciones de membresía tipo trapezoidal izquierda como la que se aprecia en la Figura B.6 b).

$$FM_{\text{trapezoidal izquierda}}(x; a, b) = \begin{cases} 1 & \text{si } x \leq a \\ \frac{b-x}{b-a} & \text{si } a < x \leq b \\ 0 & \text{si } x > b \end{cases} \quad (B.17)$$

*Gaussiana*. Está determinada por dos parámetros ( $c, \sigma$ ). La ecuación que modela a esta función de membresía es:

$$FM_{\text{gaussiana}}(x; c, \sigma) = e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-c}{\sigma}\right)^2} \quad (B.18)$$

Donde:

- $c$  Centro de la función de membresía.
- $\sigma$  Ancho de la función de membresía.

En la Figura B.7 se aprecia la función de membresía Gaussiana.

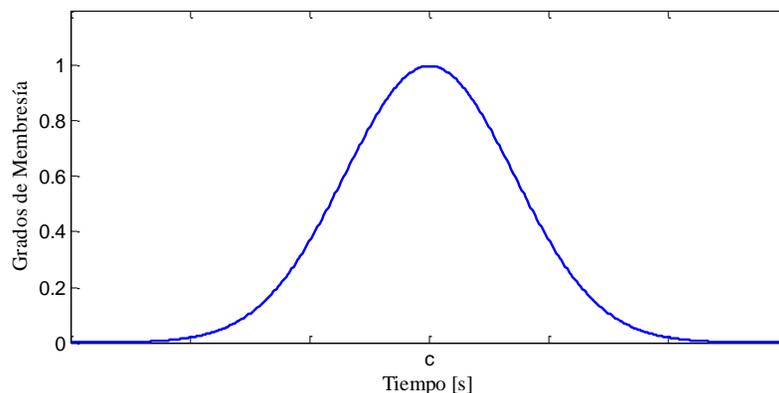


Figura B.7 FM Gaussiana.

*Campana generalizada*. Es una función de membresía que se compone de tres parámetros ( $a, b, c$ ) y se rige mediante la siguiente expresión matemática:

$$FM_{\text{campana}}(x; a, b, c) = \frac{1}{1 + \left|\frac{x-c}{a}\right|^{2b}} \quad (B.19)$$

Generalmente  $b$  es de valor positivo; en caso contrario la función de membresía es gráficamente una campana invertida. En la Figura B.8 se observa una función de membresía tipo campana generalizada.

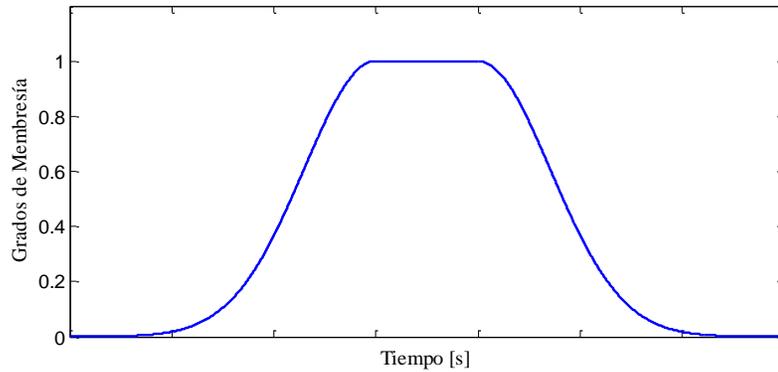


Figura B.8 FM campana generalizada.

*Sigmoidal.* Al igual que la función de membresía Gaussiana, la función de membresía sigmoidal se define con dos parámetros  $(a, c)$ , siendo su modelo matemático el siguiente:

$$FM_{sigmoidal}(x; a, c) = \frac{1}{1 + e^{-a(x-c)}} \quad (B.20)$$

En (B.20)  $a$  controla la pendiente en el punto  $x = c$  y dependiendo del signo de  $a$ , puede que la función de membresía esté abierta hacia la derecha o hacia la izquierda. Este tipo de funciones normalmente son utilizadas como funciones de activación en redes neuronales [60].

La Figura B.9 muestra una función de membresía sigmoidal.

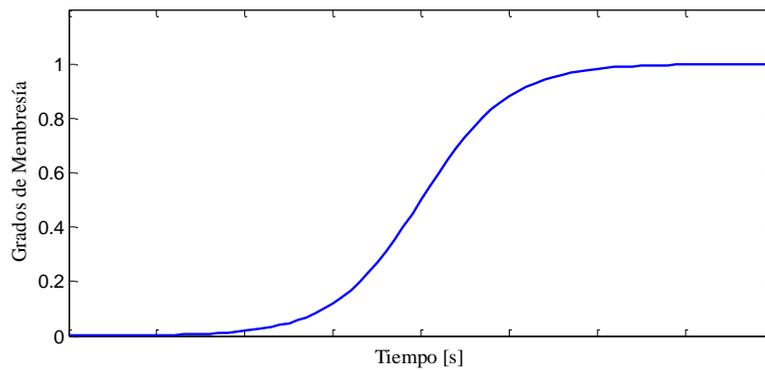


Figura B.9 FM sigmoidal.

## B.4 LÓGICA DIFUSA

Para hablar de lógica difusa hay que definir en primera instancia a la lógica. La lógica es una rama de la ciencia que estudia los métodos y principios del

razonamiento humano. La lógica clásica o lógica Aristotélica trabaja con proposiciones que únicamente pueden tener un valor de verdad; es decir, verdadero o falso. Ninguna proposición puede tener un valor de verdad intermedio; las proposiciones son representadas mediante variables que pueden utilizarse para analizar diversas situaciones [62].

Una *proposición* es un polinomio en variables  $p, q, \dots$  y se denota por  $P(p, q, \dots), Q(p, q, \dots)$  o simplemente  $P, Q$ . Cuando la última columna de la tabla de verdad de una proposición lógica es en su totalidad verdadera, se dice que se tiene una *tautología*; por otro lado, si la última columna de la tabla de verdad resulta ser falsa se trata de una *contradicción*.

La lógica clásica trabaja con reglas hechas a base de proposiciones, mismas que permiten la creación de nuevas variables lógicas que sirven como funciones de verdad. Sin embargo, con el paso de los años el análisis de eventos mediante esta técnica ha permitido a la humanidad darse cuenta que la lógica clásica ofrece ciertas desventajas y limitaciones, puesto que no permite que sus variables tomen valores de verdad intermedios. Es decir, que tengan cierto valor de pertenencia en el conjunto verdadero y cierto valor de pertenencia en el conjunto falso al mismo tiempo. Esta situación provoca que no se puedan modelar y por tanto reproducir la mayoría de fenómenos naturales, ni la toma de decisiones basada en la forma del razonamiento humano [22].

A partir de esta limitante, en 1930 fue creada la lógica de tres valores o lógica de Lukasiewicz; posteriormente surgió la lógica de  $n$  – valores o lógica difusa. Esta lógica es una técnica de inteligencia artificial que está basada en la teoría de conjuntos difusos, en la lógica clásica y en la lógica de tres valores. La diferencia es que las variables que representan a las proposiciones ya pueden adquirir ciertos valores de pertenencia entre verdadero y falso [62]. En otras palabras, las variables de un sistema pueden tener varios valores diferentes entre 0 y 1. Esto hace que el razonamiento basado en proposiciones imprecisas se aproxime de mejor manera al razonamiento humano.

#### **B.4.1 Relaciones Difusas**

Una relación indica la pertenencia o ausencia de asociación o interacción entre los elementos de dos o más conjuntos [61]. Por lo tanto las relaciones se pueden utilizar para modelar correlaciones o dependencias entre variables, cantidades y atributos [63]. Este concepto puede generalizarse para varios grados de asociación entre elementos, los cuales son representados por grados de membresía a través de relaciones difusas.

Las relaciones difusas mapean elementos de un universo  $X$  y un universo  $Y$  a través de su producto cartesiano  $X \times Y$  que resulta en un subconjunto  $R$ . La relación entre los pares ordenados de los dos universos se mide con una función de membresía que indica los grados de pertenencia al intervalo  $[0,1]$ . Es decir, los pares  $(x, y) \in X \times Y$  pertenecen al subconjunto  $R$ . Otra forma de expresarlo es [52, 63]:

$$(x, y) \in R = xRy \quad (B.21)$$

Donde la función de membresía es  $\mu_R(x, y)$ . A estas relaciones difusas se les conoce como binarias y tienen funciones de membresía de dos dimensiones. Una de las áreas de aplicación es el control y la toma de decisiones [60]. Una relación difusa binaria se define formalmente de la siguiente manera:

Sean  $X$  y  $Y$  dos universos del discurso, entonces:

$$R = \{((x, y), \mu_R(x, y)) \mid (x, y) \in X \times Y\} \quad (B.22)$$

(B.22) es una relación difusa binaria en  $X \times Y$ .

#### B.4.1.1 Propiedades y Operaciones entre Relaciones Difusas

Las relaciones difusas tienen las siguientes propiedades [52]:

- Conmutativa
- Asociativa
- Distributiva
- Involutiva
- Idempotencia
- Principios De Morgan

Sean  $R$  y  $S$  dos relaciones difusas en el espacio cartesiano  $X \times Y$ , es posible realizar las siguientes operaciones entre ellas:

$$\text{Unión} \rightarrow \mu_{R \cup S}(x, y) = \max(\mu_R(x, y), \mu_S(x, y)) \quad (B.23)$$

$$\text{Intersección} \rightarrow \mu_{R \cap S}(x, y) = \min(\mu_R(x, y), \mu_S(x, y)) \quad (B.24)$$

$$\text{Complemento} \rightarrow \mu_{\bar{R}}(x, y) = 1 - \mu_R(x, y) \quad (B.25)$$

$$\text{Contención} \rightarrow R \subset S \Rightarrow \mu_R(x, y) \leq \mu_S(x, y) \quad (B.26)$$

### B.4.1.2 Composición de Relaciones Difusas

La composición de relaciones difusas es análoga a la composición de relaciones nítidas; es decir, la composición de dos relaciones difusas da como resultado otra relación difusa. Existen diferentes operaciones de composición entre las relaciones difusas; la más conocida es la composición *máx – mín* propuesta por Zadeh [60].

*Composición máx – mín (producto máx – mín).* Sean  $R_1$  y  $R_2$  dos relaciones difusas definidas en los espacios cartesianos  $X \times Y$  y  $Y \times Z$  respectivamente, la composición *máx – mín* de dichas relaciones difusas es [60, 63]:

$$R_1 \circ R_2 = \left\{ \left[ (x, z), \underbrace{\text{máx}}_y \left( \text{mín} \left( \mu_{R_1}(x, y), \mu_{R_2}(y, z) \right) \right) \right] \mid x \in X, y \in Y, z \in Z \right\} \quad (B.27)$$

Otra forma es:

$$\mu_{R_1 \circ R_2}(x, z) = \underbrace{\text{máx}}_y \left( \text{mín} \left( \mu_{R_1}(x, y), \mu_{R_2}(y, z) \right) \right) = \bigvee_y \left( \mu_{R_1}(x, y) \wedge \mu_{R_2}(y, z) \right) \quad (B.28)$$

Sean  $R, S, T$  relaciones difusas binarias definidas en  $X \times Y$ ,  $Y \times Z$  y  $Z \times W$  respectivamente, algunas propiedades de ésta composición son las siguientes:

$$\text{Asociativa} \rightarrow R \circ (S \circ T) = (R \circ S) \circ T \quad (B.29)$$

$$\text{Distributiva sobre la unión} \rightarrow R \circ (S \cup T) = (R \circ S) \cup (R \circ T) \quad (B.30)$$

$$\text{Distributivamente débil sobre la intersección} \rightarrow R \circ (S \cap T) \subseteq (R \circ S) \cap (R \circ T) \quad (B.31)$$

$$\text{Monotonidad} \rightarrow S \subseteq T \Rightarrow R \circ S \subseteq R \circ T \quad (B.32)$$

Partiendo de la ecuación (B.27) el producto *máx – mín* se define como [52]:

$$\mu_{R_1 \circ R_2}(x, z) = \underbrace{\text{máx}}_y \left( \mu_{R_1}(x, y) \cdot \mu_{R_2}(y, z) \right) \quad (B.33)$$

### B.4.2 Variables Lingüísticas

El término variable lingüística fue propuesto por Zadeh como una manera alternativa de modelar el pensamiento humano. Las variables lingüísticas tienen la función de expresar información por medio de conjuntos difusos en lugar de hacerlo a través de números nítidos [58, 60]. Una proposición lógica difusa es una declaración que involucra algunos conceptos sin claridad y sin definir límites específicos. En otras

palabras son declaraciones lingüísticas que expresan ideas subjetivas y que pueden interpretarse de diferente manera [52].

Los números difusos ocupan un lugar importante dentro de las variables lingüísticas, ya que el estado de estas variables son números difusos, por ejemplo (frío, tibio, caliente, etc.) [61, 63]. En otras palabras, se puede decir que los números difusos son el medio a través del cual las variables lingüísticas pueden catalogar la información.

*Número difuso.* Se dice que un número es difuso cuando se tiene un conjunto  $F$  que es normal y convexo a la vez en un universo continuo  $U$  [64]. Es decir:

$$normal \rightarrow \underbrace{\max}_{u \in U} \mu_F(u) = 1 \quad (B.34)$$

$$convexo \rightarrow \mu_F(\lambda u_1 + (1 - \lambda)u_2) \geq \min(\mu_F(u_1), \mu_F(u_2)) \quad (B.35)$$

Donde  $u_1, u_2 \in U$  y  $\lambda \in [0,1]$ .

*Variable lingüística.* Una variable lingüística se compone de cinco términos  $(X, \mathcal{L}X, \mathbf{X}, G, M_X)$ , donde  $X$  representa el nombre de la variable,  $\mathcal{L}X$  el conjunto de términos de  $x$ ,  $\mathbf{X}$  es el universo del discurso,  $G$  es la regla sintáctica que genera los términos en  $\mathcal{L}X$  y  $M_X$  es una regla semántica que asocia cada valor lingüístico con su significado [60, 61, 64]. En la Figura B.10 se muestra un ejemplo de los números difusos de una variable lingüística.

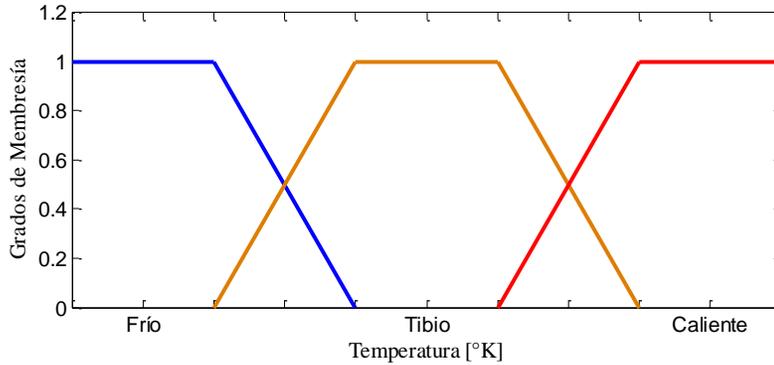


Figura B.10 Números difusos de un conjunto  $\mathcal{L}(temperatura)$ .

### B.4.3 Razonamiento Difuso

Uno de los objetivos principales de la lógica difusa es imitar el razonamiento humano partiendo de proposiciones imprecisas; a esta manera de razonar se le ha denominado razonamiento difuso o aproximado [52]. El razonamiento difuso es el

proceso mediante el cual las reglas de inferencia determinan la deducción de una proposición  $q$  de un conjunto de premisas  $\{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ . Dichas premisas están formadas por proposiciones difusas [65]. Toda la información se vuelve difusa gracias a las variables lingüísticas y finalmente la conclusión que se obtiene no es una consecuencia o conclusión exacta sino una aproximación [58].

#### B.4.3.1 Reglas de Inferencia Si-Entonces

Las reglas de inferencia tipo *Si-Entonces* son condicionales difusos; se expresan mediante un antecedente (premisa) y una consecuencia (conclusión). Simbólicamente se representan de la siguiente manera [59, 65]:

$$\text{Si } \langle x \rangle \text{ es } \langle A \rangle \text{ entonces } \langle y \rangle \text{ es } \langle B \rangle \quad (B.36)$$

Donde  $A$  y  $B$  son valores lingüísticos definidos por los conjuntos difusos en el discurso del universo  $X$  y  $Y$  respectivamente. La parte de la regla  $\langle x \rangle \text{ es } \langle A \rangle$  se conoce como premisa y la parte  $\langle y \rangle \text{ es } \langle B \rangle$  como conclusión.

#### B.4.3.2 Regla Composicional de Inferencia

La regla composicional de inferencia fue propuesta por Zadeh en 1973, se basa en una relación difusa para representar explícitamente la conexión entre dos proposiciones difusas. Zadeh introdujo la idea de que la segunda premisa debe ser una relación difusa  $R$ . De esta forma la regla composicional de inferencia se define como:

“Si  $R$  es una relación difusa de  $U$  a  $V$ , y  $A$  es un subconjunto difuso de  $U$ . Entonces el subconjunto difuso  $B$  de  $V$  que es inducido por  $A$  está dado por la composición de  $R$  y  $A$  [65].”

$$B = A \circ R \quad (B.37)$$

Simbólicamente se puede expresar como:

$$\begin{aligned} S_1 \text{ es } Q_1 \\ S_1 R S_2 \\ \therefore S_2 \text{ es } Q_2 \end{aligned}$$

Un ejemplo es:

*Diego es un niño pequeño*  
*Diego es un poco mayor que Pedro*  
 $\therefore$  *Pedro es un también un niño pequeño*

### B.4.3.3 Regla de Inferencia Modus Ponendo Ponens

La deducción *Modus Ponendo Ponens* utiliza las reglas condicionales *si-entonces* como una relación difusa implícita para concluir que dadas dos proposiciones, una  $p$  y otra que implica  $q$ , ambas verdaderas; la verdad de la proposición simple  $q$  se infiere automáticamente [22, 65].

*Premisa 1:  $p \rightarrow q$*   
*Premisa 2:  $p$*   
*Conclusión:  $q$*

Es decir, se demuestra  $q$  a partir de  $p$  y de  $p \rightarrow q$ . Un ejemplo de esta regla de inferencia es:

*Premisa 1: Si Luis está en el gimnasio, entonces Luis está entrenando*  
*Premisa 2: Luis está en el gimnasio*  
*Conclusión: Luis está entrenando*

El Modus Ponendo Ponens se utiliza para unir sistemas expertos basados en reglas progresivas [22]. La expresión (B. 38) muestra la forma de conjuntos de esta forma de inferencia.

$$(p \wedge (p \rightarrow q)) \rightarrow q \quad (B. 38)$$

La tabla B.1 demuestra que (B. 38) es una tautología.

**Tabla B.1** Tabla de verdad de la regla de inferencia Modus Ponendo Ponens.

$p$	$q$	$(p \rightarrow q)$	$(p \wedge (p \rightarrow q))$	$(p \wedge (p \rightarrow q)) \rightarrow q$
V	V	V	V	V
V	F	F	F	V
F	V	V	F	V
F	F	V	F	V

### B.4.3.4 Regla de Inferencia Modus Tollendo Tollens

La deducción *Modus Tollendo Tollens* concluye que la implicación entre dos proposiciones se combina con una segunda proposición y ambas se utilizan para implicar una tercera proposición [22]. Es decir:

*Premisa 1:*  $p \rightarrow q$

*Premisa 2:*  $\neg p$

*Conclusión:*  $\neg q$

Retomando el ejemplo anterior, se puede aplicar la regla de inferencia Modus Tollendo Tollens como se muestra a continuación:

*Premisa 1:* Si Luis está en el gimnasio, entonces Luis está entrenando

*Premisa 2:* Luis no está en el gimnasio

*Conclusión:* Luis no está entrenando

Este modo de inferencia se puede expresar mediante la ecuación (B.39) y a diferencia del Modus Ponendo Ponens, éste se utiliza para unir sistemas expertos basados en reglas regresivas [22, 62].

$$(\neg q \wedge (p \rightarrow q)) \rightarrow \neg p \quad (B.39)$$

La tabla de verdad de la regla Modus Tollendo Tollens se muestra en la tabla B.2, misma que demuestra que esta regla es una tautología.

**Tabla B.2** Tabla de verdad de la regla de inferencia Modus Tollendo Tollens.

$p$	$q$	$\neg p$	$\neg q$	$(p \rightarrow q)$	$\neg q \wedge (p \rightarrow q)$	$(\neg q \wedge (p \rightarrow q)) \rightarrow \neg p$
V	V	F	F	V	F	V
V	F	F	V	F	F	V
F	V	V	F	V	F	V
F	F	V	V	V	V	V

### B.4.3.5 Regla de Inferencia del Silogismo

Esta regla de inferencia es un principio fundamental del razonamiento lógico que dice:

"Si  $\ll p \gg$  implica  $\ll q \gg$  y  $\ll q \gg$  implica  $\ll r \gg$ , entonces  $\ll p \gg$  implica  $\ll r \gg$  "

Expresado formalmente es:

$$(p \rightarrow q) \wedge (q \rightarrow r) \rightarrow (p \rightarrow r) \quad (B.40)$$

En la tabla B.3 se demuestra que (B.40) es una tautología.

**Tabla B.3** Tabla de verdad de la regla de inferencia del silogismo.

$p$	$q$	$r$	$p \rightarrow q$	$q \rightarrow r$	$p \rightarrow r$	$(p \rightarrow q) \wedge (q \rightarrow r)$	$(p \rightarrow q) \wedge (q \rightarrow r) \rightarrow (p \rightarrow r)$
V	V	V	V	V	V	V	V
V	V	F	V	F	F	F	V
V	F	V	F	V	V	F	V
V	F	F	F	V	F	F	V
F	V	V	V	V	V	V	V
F	V	F	V	F	V	F	V
F	F	V	V	V	V	V	V
F	F	F	V	V	V	V	V

#### B.4.3.6 Regla de Inferencia de Contraposición

La regla de inferencia de contraposición establece que:

$$(a \rightarrow b) \rightarrow (\bar{b} \rightarrow \bar{a}) \quad (B.41)$$

Al igual que las reglas de inferencia anteriores, esta forma de inferencia también es una tautología como se puede corroborar mediante la tabla B.4.

**Tabla B.4** Tabla de verdad de la regla de inferencia de contraposición.

$a$	$b$	$\bar{a}$	$\bar{b}$	$(a \rightarrow b)$	$(\bar{b} \rightarrow \bar{a})$	$(a \rightarrow b) \rightarrow (\bar{b} \rightarrow \bar{a})$
V	V	F	F	V	V	V
V	F	F	V	F	F	V
F	V	V	F	V	V	V
F	F	V	V	V	V	V

### B.5 SISTEMA ADITIVO DIFUSO

Un sistema aditivo difuso es una técnica de inteligencia artificial que utiliza lógica difusa para aproximar una función a través de reglas de inferencia tipo si-entonces como la que se aprecia en la expresión (B.36). Sin embargo, el valor agregado de esta técnica inteligente respecto de la lógica difusa es que introduce un sistema experto o base de reglas difusas para inferir resultados muy aproximados. La arquitectura de estos sistemas es similar a la de una red neuronal multicapa de alimentación hacia adelante como se puede observar en la Figura B.11 [20, 21].

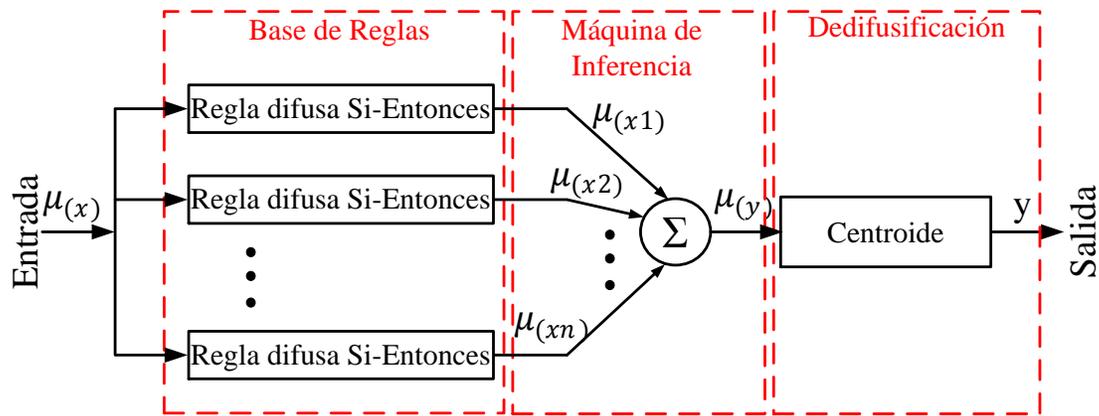


Figura B.11 Arquitectura de un sistema aditivo difuso [Adaptado de 21].

Las entradas al sistema aditivo difuso de la Figura B.11 son valores difusos, mismos que disparan cada una de las reglas difusas con diferentes grados de membresía. El grado de activación se obtiene utilizando la composición *mín* cuando las reglas difusas tienen más de una premisa; puede haber reglas que tengan una activación igual a cero debido a que sus premisas no tienen correlación con el valor de entrada. El conjunto de reglas difusas se conoce como sistema experto ya que modela el conocimiento humano [20, 60].

El grado de activación de cada regla se suma para inferir un resultado difuso, este proceso se conoce como máquina de inferencia; ya que a través de la suma de las activaciones de cada regla se infiere un resultado difuso. La salida del sistema queda representada en membresías tipo singletón, mismas que son dedifusificadas a través del método del centro de áreas/gravedad, también conocido como método del centroide. La dedifusificación permite transformar el resultado difuso en valores nítidos precisos.

## B.6 SISTEMA DE INFERENCIA DIFUSO

Cuando un sistema físico es demasiado difícil de modelar debido a su complejidad o a su ambigüedad, no es posible obtener fórmulas o ecuaciones que puedan reproducir su comportamiento. En tal caso es conveniente hacerlo a través de los sistemas de inferencia difusos. Estos sistemas utilizan la lógica difusa y un sistema experto; por lo tanto son herramientas muy útiles, además de que su aplicación no se limita necesariamente a los controles [62, 63]. Los sistemas de inferencia difusos se han aplicado en una amplia variedad de campos como el control automático, clasificación de datos, sistemas expertos, predicción de series de tiempo, reconocimiento de patrones, etc. debido a su naturaleza adaptable [60].

Un sistema de inferencia difuso está integrado por tres etapas principales; éstas son la difusificación, base de reglas-mecanismo de inferencia y la dedifusificación [22, 60]. Este tipo de sistemas también son denominados modelos difusos y pueden tener entradas nítidas o difusas [60, 65]; en la Figura B.12 se muestra la estructura de un sistema de inferencia difuso.

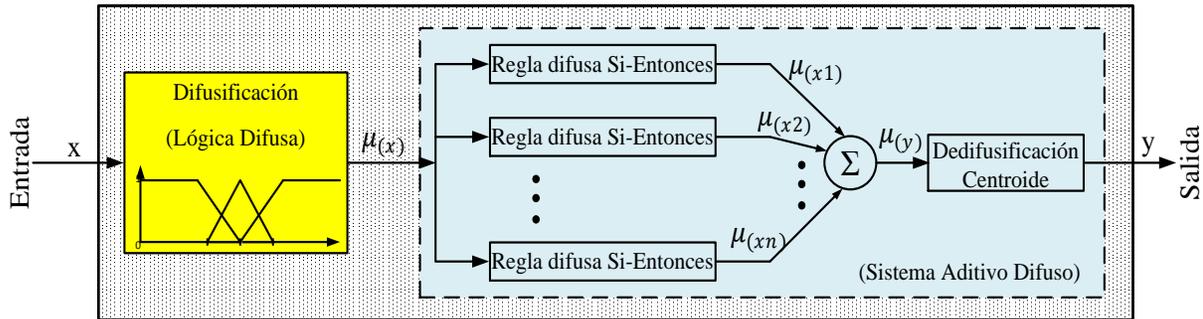


Figura B.12 Estructura de un sistema de inferencia difuso.

La idea principal de un sistema de inferencia difuso es incorporar la experiencia humana denominada *experto* en un sistema que sea capaz de tomar decisiones para controlar un proceso determinado [58]. Para ello, se emplea la implicación de Mamdani que está basada en la intersección de los conjuntos difusos; es decir [22]:

$$p \rightarrow q \equiv p \wedge q \quad (B.42)$$

Esto es:

$$R_C = C_e(A) \cap C_e(B) \quad (B.43)$$

Lo que implica que:

$$\mu_{R_C}(x, y) = \text{mín}(\mu_A(x), \mu_B(y)) \quad (B.44)$$

En un sistema de inferencia difuso la difusificación se encarga de convertir los valores nítidos de entrada en valores difusos; la base de reglas que es un conjunto de reglas difusas tipo si-entonces, es evaluada por el mecanismo de razonamiento que lleva a cabo el proceso de inferencia para así obtener una conclusión; y la dedifusificación transforma la conclusión del mecanismo de inferencia en un valor numérico preciso [60]. El sistema de inferencia difuso es muy utilizado en procesamiento de señales y brinda la ventaja de observar la estabilidad del sistema a través del plano de fase [22]. A continuación se detalla cada etapa del proceso.

### B.6.1 Difusificación

La difusificación es la etapa inicial del modelo difuso, se encarga de recibir y convertir las variables nítidas de entrada en valores difusos. Para ello mide los valores de las variables de estado y los mapea para normalizarlos en el correspondiente universo del discurso. Cuando se trabaja en un universo no normalizado, no es necesario llevar a cabo una normalización [64, 65].

El proceso de difusificación es una valoración subjetiva de una entrada observada que es convertida punto a punto en conjuntos difusos. Esta transformación se realiza mediante funciones de membresía definidas por las variables lingüísticas previamente establecidas. Usualmente los datos de entrada son nítidos; sin embargo, existen casos complejos donde los datos de entrada son aleatorios [58]. Existen dos métodos de difusificación, el primero se emplea en casos donde la inferencia está basada en la composición y el segundo cuando la inferencia se da mediante reglas difusas individuales. La estrategia de difusificación más utilizada es la segunda mencionada [65].

### B.6.2 Base de Reglas

En el campo de la inteligencia artificial existen diversas maneras de representar el conocimiento. La más común es la base de reglas [52, 66], que está definida por un conjunto de reglas de inferencia difusa tipo si-entonces. Estas declaraciones difusas involucran a las variables lingüísticas del sistema a través de una relación de entrada-salida. La forma general de este tipo de reglas está regida por la expresión (B.36). Cuando la conclusión de una regla difusa si-entonces es inferida por dos o más entradas, se trata de una regla difusa tipo MISO (*"Multi-Input-Single-Output"* en inglés). Por lo tanto, la estructura de (B.36) cambia a:

$$\text{Si } \langle x \rangle \text{ es } \langle A \rangle \text{ \& } \langle y \rangle \text{ es } \langle B \rangle \text{ entonces } \langle z \rangle \text{ es } \langle C \rangle \quad (B.45)$$

Donde  $\langle x \rangle$ ,  $\langle y \rangle$  y  $\langle z \rangle$  son las variables lingüísticas que representan a las variables de estado del proceso. Mientras que  $\langle A \rangle$ ,  $\langle B \rangle$  y  $\langle C \rangle$  son los valores lingüísticos de las variables lingüísticas en su universo del discurso [58]. En las reglas difusas MISO se pueden aplicar los principios básicos y operaciones de conjuntos difusos; ya que se representan mediante modelos del lenguaje natural que se basa en conjuntos difusos y lógica difusa. El grado de entendimiento y de descripción de un sistema se expresa con un conjunto de restricciones difusas; mismas que se relacionan a través de conexiones lingüísticas como *AND* y *OR* [52].

Cuando se tiene una regla difusa MISO con varias premisas que se relacionan con conexiones *AND*, la regla se expresa como:

Si  $\langle x_1 \rangle$  es  $\langle A^1 \rangle$  AND  $\langle A^2 \rangle$  AND  $\dots$  AND  $\langle A^n \rangle$  entonces  $\langle y \rangle$  es  $\langle B \rangle$  (B. 46)

En forma de conjuntos (B. 46) queda de la siguiente manera:

$$A^{Total} = \langle A^1 \rangle \cap \langle A^2 \rangle \cap \dots \cap \langle A^n \rangle \quad (B. 47)$$

Donde su función de membresía es:

$$\mu_{A^{Total}}(x) = \min[\mu_{A^1}(x), \mu_{A^2}(x), \dots, \mu_{A^n}(x)] \quad (B. 48)$$

Para el caso en que las premisas estén relacionadas por conexiones OR, la regla difusa se expresa como:

Si  $\langle x_1 \rangle$  es  $\langle A^1 \rangle$  OR  $\langle A^2 \rangle$  OR  $\dots$  OR  $\langle A^n \rangle$  entonces  $\langle y \rangle$  es  $\langle B \rangle$  (B. 49)

En forma de conjuntos queda:

$$A^{Total} = \langle A^1 \rangle \cup \langle A^2 \rangle \cup \dots \cup \langle A^n \rangle \quad (B. 50)$$

Y su función de membresía es:

$$\mu_{A^{Total}}(x) = \max[\mu_{A^1}(x), \mu_{A^2}(x), \dots, \mu_{A^n}(x)] \quad (B. 51)$$

Sin embargo, es de gran importancia destacar que el operador OR no se utiliza solo en una regla difusa. Es decir, éste operador no aparece como en (B. 49); sino como una combinación de AND y OR [62].

Si  $\langle x_1 \rangle$  es  $\langle A^1 \rangle$  AND  $\langle x_1 \rangle$  es  $\langle A^2 \rangle$

OR (B. 52)

Si  $\langle x_3 \rangle$  es  $\langle A^3 \rangle$  AND  $\langle x_4 \rangle$  es  $\langle A^4 \rangle$

### B.6.2.1 Construcción de la Base de Reglas

Para diseñar una base de reglas hay que tener en cuenta lo siguiente [22, 65, 66]:

- Seleccionar las variables de estado y de salida de control del proceso.
- Determinar el contenido de premisas y conclusiones de las reglas si-entonces.
- Definir las funciones de membresía de las variables de estado y de salida de control del proceso.

Las variables de estado del proceso representan el contenido del antecedente de las reglas difusas [22, 65]. Estas variables pueden ser:

- Error, denotado por  $e$ .
- Cambio del error, denotado por  $\Delta e$  o  $\dot{e}$ .
- Suma de errores, denotada por  $\delta e$ .

Por otra parte, el contenido de la consecuencia de la regla puede representarse por las siguientes variables:

- $e(k) = y_{ref} - y(k)$
- $\Delta e(k) = e(k) - e(k - 1)$
- $\Delta u(k) = u(k) - u(k - 1)$

Donde:

- $y_{ref}$  Salida de referencia.
- $k$  Tiempo de muestreo.

En la Figura B.13 se muestra un ejemplo de una base de reglas.

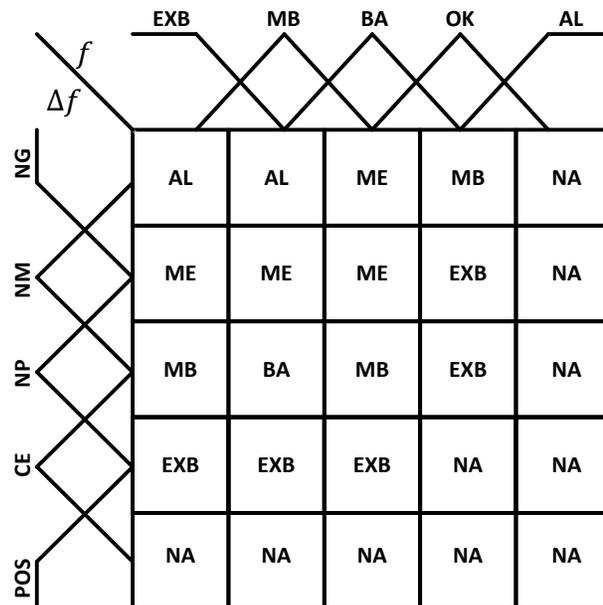


Figura B.13 Ejemplo de base de reglas (variables de estado: frecuencia, cambio de frecuencia y tiro de carga).

Donde:

<i>EXB</i>	Extremadamente Baja	} Premisas ( <i>f</i> )	<i>NA</i>	Nada	} Conclusiones ( <i>LS</i> )
<i>MB</i>	Muy Baja		<i>EXB</i>	Extremadamente Bajo	
<i>BA</i>	Baja		<i>MB</i>	Muy Bajo	
<i>OK</i>	Aceptable		<i>BA</i>	Baja	
<i>AL</i>	Alta		<i>ME</i>	Mediano	
<i>NG</i>	Negativa Grande	} Premisas ( $\Delta f$ )	<i>AL</i>	Alto	
<i>NM</i>	Negativa Mediana				
<i>NP</i>	Negativa Pequeña				
<i>CE</i>	Cero				
<i>POS</i>	Positiva				

### B.6.3 Máquina de Inferencia

Existen dos métodos para realizar la inferencia en un modelo difuso, puede ser inferencia basada en la composición o inferencia basada en la reglas difusas individuales [65]. La máquina de inferencia lleva a cabo la toma de decisiones en forma lógica al evaluar la base de reglas. Está diseñada a base de la experiencia humana y de acuerdo a los grados de membresía que tengan las premisas en las reglas de inferencia, opera con el modo generalizado Modus Ponendo Ponens para inferir un resultado [58, 64, 66].

Para el ejemplo mostrado en la Figura B.13, la interpretación de la base de reglas es la siguiente.

*Si*  $\langle f \rangle$  *es*  $\langle EXB \rangle$  &  $\langle \Delta f \rangle$  *es*  $\langle NG \rangle$  *entonces*  $\langle LS \rangle$  *es*  $\langle AL \rangle$   
*Si*  $\langle f \rangle$  *es*  $\langle EXB \rangle$  &  $\langle \Delta f \rangle$  *es*  $\langle NM \rangle$  *entonces*  $\langle LS \rangle$  *es*  $\langle ME \rangle$   
*Si*  $\langle f \rangle$  *es*  $\langle EXB \rangle$  &  $\langle \Delta f \rangle$  *es*  $\langle NP \rangle$  *entonces*  $\langle LS \rangle$  *es*  $\langle MB \rangle$   
*Si*  $\langle f \rangle$  *es*  $\langle EXB \rangle$  &  $\langle \Delta f \rangle$  *es*  $\langle CE \rangle$  *entonces*  $\langle LS \rangle$  *es*  $\langle EXB \rangle$   
*Si*  $\langle f \rangle$  *es*  $\langle EXB \rangle$  &  $\langle \Delta f \rangle$  *es*  $\langle POS \rangle$  *entonces*  $\langle LS \rangle$  *es*  $\langle NA \rangle$

*Si*  $\langle f \rangle$  *es*  $\langle MB \rangle$  &  $\langle \Delta f \rangle$  *es*  $\langle NG \rangle$  *entonces*  $\langle LS \rangle$  *es*  $\langle AL \rangle$   
*Si*  $\langle f \rangle$  *es*  $\langle MB \rangle$  &  $\langle \Delta f \rangle$  *es*  $\langle NM \rangle$  *entonces*  $\langle LS \rangle$  *es*  $\langle ME \rangle$   
*Si*  $\langle f \rangle$  *es*  $\langle MB \rangle$  &  $\langle \Delta f \rangle$  *es*  $\langle NP \rangle$  *entonces*  $\langle LS \rangle$  *es*  $\langle BA \rangle$   
*Si*  $\langle f \rangle$  *es*  $\langle MB \rangle$  &  $\langle \Delta f \rangle$  *es*  $\langle CE \rangle$  *entonces*  $\langle LS \rangle$  *es*  $\langle EXB \rangle$   
*Si*  $\langle f \rangle$  *es*  $\langle MB \rangle$  &  $\langle \Delta f \rangle$  *es*  $\langle POS \rangle$  *entonces*  $\langle LS \rangle$  *es*  $\langle NA \rangle$

*Si*  $\langle f \rangle$  *es*  $\langle BA \rangle$  &  $\langle \Delta f \rangle$  *es*  $\langle NG \rangle$  *entonces*  $\langle LS \rangle$  *es*  $\langle ME \rangle$   
*Si*  $\langle f \rangle$  *es*  $\langle BA \rangle$  &  $\langle \Delta f \rangle$  *es*  $\langle NM \rangle$  *entonces*  $\langle LS \rangle$  *es*  $\langle ME \rangle$   
*Si*  $\langle f \rangle$  *es*  $\langle BA \rangle$  &  $\langle \Delta f \rangle$  *es*  $\langle NP \rangle$  *entonces*  $\langle LS \rangle$  *es*  $\langle MB \rangle$   
*Si*  $\langle f \rangle$  *es*  $\langle BA \rangle$  &  $\langle \Delta f \rangle$  *es*  $\langle CE \rangle$  *entonces*  $\langle LS \rangle$  *es*  $\langle EXB \rangle$   
*Si*  $\langle f \rangle$  *es*  $\langle BA \rangle$  &  $\langle \Delta f \rangle$  *es*  $\langle POS \rangle$  *entonces*  $\langle LS \rangle$  *es*  $\langle NA \rangle$

Si «  $f$  » es «  $OK$  » & «  $\Delta f$  » es «  $NG$  » entonces «  $LS$  » es «  $MB$  »  
 Si «  $f$  » es «  $OK$  » & «  $\Delta f$  » es «  $NM$  » entonces «  $LS$  » es «  $EXB$  »  
 Si «  $f$  » es «  $OK$  » & «  $\Delta f$  » es «  $NP$  » entonces «  $LS$  » es «  $EXB$  »  
 Si «  $f$  » es «  $OK$  » & «  $\Delta f$  » es «  $CE$  » entonces «  $LS$  » es «  $NA$  »  
 Si «  $f$  » es «  $OK$  » & «  $\Delta f$  » es «  $POS$  » entonces «  $LS$  » es «  $NA$  »

Si «  $f$  » es «  $AL$  » & «  $\Delta f$  » es «  $NG$  » entonces «  $LS$  » es «  $NA$  »  
 Si «  $f$  » es «  $AL$  » & «  $\Delta f$  » es «  $NM$  » entonces «  $LS$  » es «  $NA$  »  
 Si «  $f$  » es «  $AL$  » & «  $\Delta f$  » es «  $NP$  » entonces «  $LS$  » es «  $NA$  »  
 Si «  $f$  » es «  $AL$  » & «  $\Delta f$  » es «  $CE$  » entonces «  $LS$  » es «  $NA$  »  
 Si «  $f$  » es «  $AL$  » & «  $\Delta f$  » es «  $POS$  » entonces «  $LS$  » es «  $NA$  »

El efecto total o consecuencia total de una base de reglas se obtiene a partir de las consecuencias individuales de cada regla. En el caso que se tengan reglas difusas con operadores *AND* la respuesta total será:

$$y = y^1 \text{ AND } y^2 \text{ AND } \dots \text{ AND } y^n \quad (B.53)$$

En forma de conjuntos (B.53) queda:

$$y = y^1 \cap y^2 \cap \dots \cap y^n \quad (B.54)$$

Cuya función de membresía es:

$$\mu_y(y) = \text{mín}[\mu_{y^1}(y), \mu_{y^2}(y), \dots, \mu_{y^n}(y)] \quad (B.55)$$

En el caso donde se tienen sistemas de reglas difusas con operadores *OR*, la respuesta de la base de reglas será:

$$y = y^1 \text{ OR } y^2 \text{ OR } \dots \text{ OR } y^n \quad (B.56)$$

En forma de conjuntos (B.56) queda:

$$y = y^1 \cup y^2 \cup \dots \cup y^n \quad (B.57)$$

Cuya función de membresía es:

$$\mu_y(y) = \text{máx}[\mu_{y^1}(y), \mu_{y^2}(y), \dots, \mu_{y^n}(y)] \quad (B.58)$$

La inferencia basada en la composición muestra la contribución de cada regla mediante relaciones difusas. Se tiene una relación difusa compuesta de todas las anteriores para obtener el resultado total de las contribuciones. Finalmente la inferencia se da con la composición entre la entrada difusificada y la relación difusa total de las contribuciones, que da como resultado un conjunto difuso con el efecto total de la base de reglas. Por otra parte, en la inferencia basada en reglas individuales primero se evalúa cada regla en forma individual. El grado de pertenencia con el que se dispara la regla es medido por el grado de relación entre la entrada nítida y los conjuntos difusos que describen el significado de la premisa de la regla. O bien, puede ser medido cortando el conjunto difuso que describe la consecuencia de la regla para el grado de relación entre la entrada nítida y la premisa [65].

Los parámetros que se deben considerar para el diseño de una máquina de inferencia son:

- Determinar la conclusión de las reglas en forma individual.
- Determinar el significado representativo del conjunto de reglas.
- Seleccionar el tipo de inferencia (método).
- Probar el resultado del conjunto de reglas para comprobar la consistencia de la inferencia respecto a los grados de membresía de los valores lingüísticos.

La máquina de inferencia para el sistema de inferencia difuso trabaja con la composición *máx – mín* para obtener el valor total de las variables de salida [22]. Es decir, el grado de activación de cada regla disparada será el valor mínimo de sus premisas. En caso de que se dispare la misma conclusión mediante diferentes reglas difusas, el grado de activación será el valor máximo entre ellas.

Para el ejemplo de la Figura B.13, el efecto total de la base de reglas que obtiene el mecanismo de inferencia es:

$$\forall u: \mu_U(u) = \max_{f, \Delta f} \min \left( \mu_{prem}(f, \Delta f), \mu_R(f, \Delta f, u) \right) \quad (B.59)$$

Donde:

- $\mu_{prem}$  Función de membresía de la premisa de la regla.
- $\mu_R$  Función de membresía de la relación difusa  $R^{(k)}$  definida en  $f \times \Delta f \times u$ .

La ecuación (B.59) es una inferencia basada en la composición que es equivalente a una inferencia basada en reglas individuales.

### B.6.4 Dedifusificación

En el sistema de inferencia difuso, el mecanismo de inferencia obtiene como conclusión variables difusas. Para obtener el resultado en forma nítida es necesario utilizar un método de dedifusificación; en caso de haber normalizado en la etapa de difusificación se debe denormalizar primero. Los métodos de dedifusificación más comunes son:

- Centro de áreas / gravedad (centroide).
- Centro de sumas.
- Altura.
- Centro de área máxima.
- Primera de la máxima.
- Media de la máxima.

Sea una variable lingüística definida por [65]:

$$\langle X, \mathcal{L}X, \mathbf{X}, M_X \rangle \quad (B.60)$$

Donde:

- $X$  Variable lingüística.
- $\mathcal{L}X$  Conjunto de valores lingüísticos que toma  $X$ .
- $\mathbf{X}$  Universo del discurso.
- $M_X$  Función semántica que da la interpretación de un valor lingüístico en términos de los elementos cuantitativos de  $\mathbf{X}$ .

$$M_X: \mathcal{L}X \rightarrow \widetilde{\mathcal{L}X} \quad (B.61)$$

$\widetilde{\mathcal{L}X}$  denota un conjunto difuso o una función de membresía definida sobre  $\mathbf{X}$ .

Para el caso discreto  $\mathbf{X}$ :

$$\widetilde{\mathcal{L}X} = \sum_x \mu_{\mathcal{L}X}(x)/x \quad (B.62)$$

Para el caso continuo  $\mathbf{X}$ :

$$\widetilde{\mathcal{L}X} = \int_x \mu_{\mathcal{L}X}(x)/x \quad (B.63)$$

Si se define un conjunto de  $m$  reglas como la que se muestra en (B.46) se tiene:

Si  $x_1 LX_1^{(k)}$  AND ... AND  $x_n$  es  $LX_n^{(k)}$  entonces  $u$  está en  $LU^{(k)}$ ,  $k = 1, \dots, m$ . Si se disparan estas reglas con entradas nítidas  $x_1^*, \dots, x_n^*$  se obtienen  $m$  conjuntos difusos recortados denotados por:

$$\overline{CLU}^{(1)}, \dots, \overline{CLU}^{(m)} \quad (B.64)$$

O en  $m$  conjuntos difusos escalados:

$$\widetilde{LU}^{(1)}, \dots, \widetilde{LU}^{(m)} \quad (B.65)$$

La salida de control general  $\tilde{U}$  o  $\mu_U$  se obtiene de la unión de las salidas de control recortadas o escaladas.

$$\tilde{U} = \bigcup_{k=1}^m \overline{CLU}^{(k)} \quad (B.66)$$

Por lo tanto, ahora resulta más fácil definir los métodos de dedifusificación.

*Centro de áreas / gravedad (centroide).* Es el método de dedifusificación más utilizado; así mismo es el método empleado por el sistema aditivo difuso [65].

En el caso discreto ( $U = \{u_1, \dots, u_l\}$ ):

$$u^* = \frac{\sum_{i=1}^l u_i \cdot \mu_U(u_i)}{\sum_{i=1}^l \mu_U(u_i)} = \frac{\sum_{i=1}^l u_i \cdot \max_k \mu_{CLU^{(k)}}(u_i)}{\sum_{i=1}^l \max_k \mu_{CLU^{(k)}}(u_i)} \quad (B.67)$$

Para el caso continuo se obtiene

$$u^* = \frac{\int_U u \cdot \mu_U(u) du}{\int_U \mu_U(u) du} = \frac{\int_U u \cdot \max_k \mu_{CLU^{(k)}}(u) du}{\int_U \max_k \mu_{CLU^{(k)}}(u) du} \quad (B.68)$$

*Centro de sumas.* Se trata de un método similar al anterior, es muy rápido y generalmente se utiliza para evitar calcular  $\tilde{U}$ . Toma la suma de los  $\overline{CLU}^{(k)}$ ; de esta manera las áreas traslapadas si llegaran a existir se toman más de una vez [65].

Para el caso discreto se tiene:

$$u^* = \frac{\sum_{i=1}^l u_i \cdot \sum_{k=1}^n \mu_{CLU^{(k)}}(u_i)}{\sum_{i=1}^l \sum_{k=1}^n \mu_{CLU^{(k)}}(u_i)} \quad (B.69)$$

Para el caso continuo es:

$$u^* = \frac{\int_U u \cdot \sum_{k=1}^n \mu_{CLU^{(k)}}(u) du}{\int_U \sum_{k=1}^n \mu_{CLU^{(k)}}(u) du} \quad (B.70)$$

*Altura.* Este método utiliza el valor pico de cada  $\widetilde{CLU}^{(k)}$  para realizar la suma ponderada, por lo tanto ni el apoyo ni la forma de cada  $\widetilde{CLU}^{(k)}$  influyen en el cálculo de  $u^*$ . Este método utiliza las salidas de control individuales ya sean recortadas o escaladas. Para un sistema de  $m$  reglas, la dedifusificación es [65]:

$$u^* = \frac{\sum_{k=1}^m c^{(k)} \cdot f_k}{\sum_{k=1}^m f_k} \quad (B.71)$$

*Centro de área máxima.* Se utiliza cuando  $\widetilde{U}$  es no convexo. Se deben tener por lo menos dos conjuntos difusos convexos; el objetivo de este método de dedifusificación es determinar el subconjunto convexo de mayor área y definir el valor de salida nítido para el centro de área de dicho subconjunto difuso [65].

*Primera de la máxima.* Este método utiliza  $\widetilde{U}$  y toma el valor más pequeño del dominio  $U$  con el máximo grado de membresía en  $\widetilde{U}$ . La dedifusificación se realiza en tres pasos:

1. Hacer:

$$hgt(U) = \sup_{u \in U} \mu_U(u) \quad (B.72)$$

2. Grado más alto de membresía de  $\widetilde{U}$  y hacer:

$$\{u \in U | \mu_U(u) = hgt(U)\} \quad (B.73)$$

3. Sea el conjunto de elementos del dominio con grado de membresía igual a  $hgt(U)$ . Entonces  $u^*$  esta dada por:

$$u^* = \inf_{u \in \mathcal{U}} \{u \in \mathcal{U} | \mu U(u) = hgt(U)\} \quad (B.74)$$

La última de la máxima es una forma alternativa de este método y está dada por:

$$u^* = \sup_{u \in \mathcal{U}} \{u \in \mathcal{U} | \mu U(u) = hgt(U)\} \quad (B.75)$$

*Media de la máxima.* A diferencia del método anterior, se determina  $u^*$  para el primero o el último de todos los valores donde  $\mathcal{U}$  tiene el máximo grado de membresía y se toma el promedio de estos dos valores. La expresión (B.76) es utilizada para obtener la dedifusificación por éste método.

$$u^* = \frac{\inf_{u \in \mathcal{U}} \{u \in \mathcal{U} | \mu U(u) = hgt(U)\} + \sup_{u \in \mathcal{U}} \{u \in \mathcal{U} | \mu U(u) = hgt(U)\}}{2} \quad (B.76)$$



## APÉNDICE C:

# SINTONIZACIÓN DE LAS FUNCIONES DE MEMBRESÍA DE LOS ESQUEMAS DIFUSOS

### C.1 INTRODUCCIÓN

En éste apéndice se especifica el diseño y desarrollo de los esquemas inteligentes de tiro de carga por baja frecuencia mostrados en el capítulo 4. Básicamente se realizaron dos tipos de esquemas, el primero consta de tres funciones de membresía para cada entrada y cuatro funciones de membresía de salida; el segundo se compone de cinco funciones de membresía en sus entradas y seis funciones de membresía a la salida. Cada esquema mostrado tiene una relación directa con el esquema anterior; esto se debe a que a través del análisis de un primer esquema se obtienen bases que ayudan en la sintonización de las membresías y/o base de reglas del siguiente esquema. Los esquemas difusos que fueron presentados como los mejores en el capítulo 4 son la mejor sintonización de cada esquema que aquí se presenta. Los parámetros de simulación son los mismos que se utilizan en el capítulo 4.

### C.2 ESQUEMAS DIFUSOS DE TRES MEMBRESÍAS EN LAS ENTRADAS Y CUATRO MEMBRESÍAS EN LA SALIDA

De acuerdo con lo descrito en el capítulo 3 apartado 3.4.1.1 y 3.4.1.2, el desarrollo de esquemas dinámicos de tiro de carga se inició el con tres funciones de membresía para cada entrada y cuatro funciones de membresía de salida. Esto tiene por objeto determinar la cantidad mínima de funciones de membresía a utilizar; en caso de ser requerido el número de membresías se puede aumentar para tener mayor manejo de las incertidumbres. El sistema de inferencia difuso que conforma a estos esquemas tiene las siguientes características:

- 3 funciones de membresía (2 trapezoidales y 1 triangular) para  $f$ .
- 3 funciones de membresía (2 trapezoidales y 1 triangular) para  $\Delta f$ .
- 4 funciones de membresía Singletón para  $LS$ .
- Método de dedifusificación: centroide.

### Esquema D3A:

*Difusificación:* Las variables lingüísticas para los conjuntos difusos de entrada se seleccionaron de acuerdo a una clasificación de los posibles valores que puede tomar la frecuencia y su variación. Por ello, se decidió asignar dos funciones de membresía para bajas frecuencias y una función de membresía para los valores de frecuencia iguales o mayores a los valores aceptables. Por otra parte, las funciones de membresía para la variación de frecuencia se clasificaron en negativo, cero y positivo. Con base en la tabla 3.7 se sintonizaron las funciones de membresía de las entradas como se muestra en la Figura C.1.

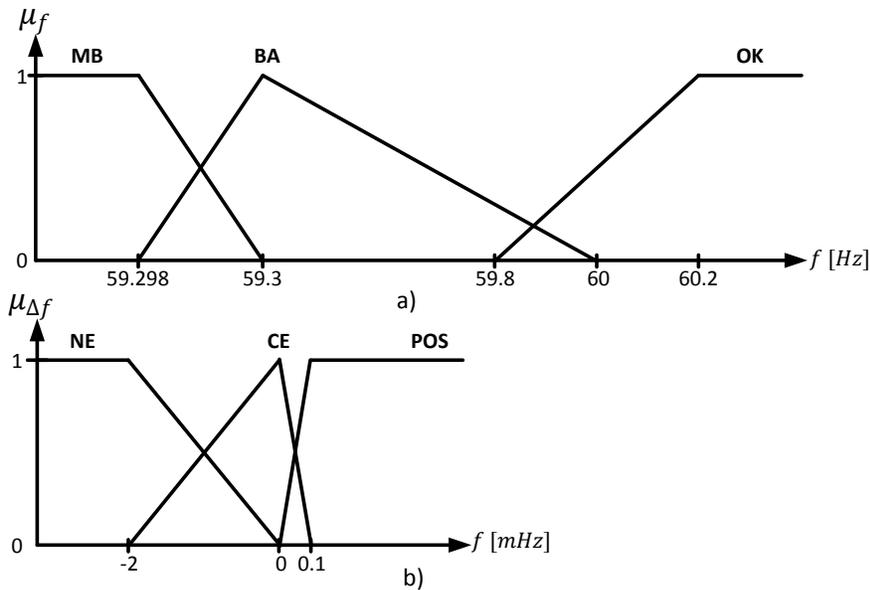


Figura C.1 Funciones de membresía para difusificar las entradas del esquema D3A: a) Frecuencia y b) Variación de frecuencia.

En la Figura C.1 a) se observa que la variable lingüística OK se utiliza para todo valor de frecuencia en que el esquema no debe desconectar carga ya que son valores de frecuencia aceptables o altos. Las variables lingüísticas BA y MB corresponden a frecuencias bajas y muy bajas respectivamente. Las frecuencias de disturbios de bajo y mediano impacto están ligadas a la función de membresía BA y los disturbios de mediano y alto impacto corresponden a la función de membresía MB.

Para el caso de la difusificación de la segunda entrada mostrada en la Figura C.1 b), las variaciones de frecuencia positivas indican recuperación de la frecuencia, las variaciones casi nulas o nulas implican que la frecuencia quedó fija en un valor; es decir, no se recuperó pero tampoco continuó disminuyendo. Finalmente todas las variaciones negativas corresponden a un decaimiento de la frecuencia. En la tabla C.1 se muestran las variables lingüísticas de las funciones de membresía de entrada.

**Tabla C.1 Variables lingüísticas de entrada del esquema D3A.**

Frecuencia		Variación de la frecuencia	
MB	Muy Baja	NE	Negativa
BA	Baja	CE	Cero
OK	Aceptable	POS	Positiva

*Base de reglas:* Debido a que se cuentan con tres funciones de membresía para difusificar cada entrada, la base de reglas debe contener nueve reglas difusas tipo sintonces, misma que se muestra en la Figura C.2. Las acciones de tiro de carga se muestran en la tabla C.2, donde los porcentajes de desconexión fueron elegidos arbitrariamente y con base en los resultados de la operación éstos pueden variar.

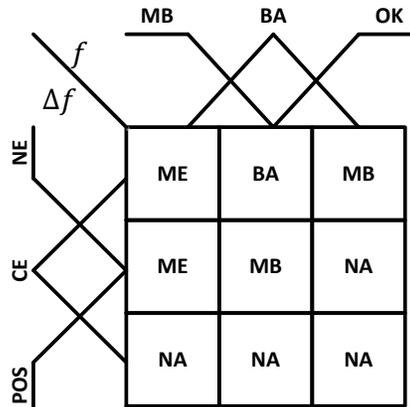


Figura C.2 Base de reglas para el esquema D3A.

**Tabla C.2 Acciones de tiro de carga para el esquema D3A.**

Variable lingüística	Carga a desconectar [%]	
NA	Nada	0
MB	Muy Bajo	5
BA	Bajo	15
ME	Mediano	40

En la Figura C.3 se aprecian las funciones de membresía de salida expresadas mediante funciones tipo Singletón.

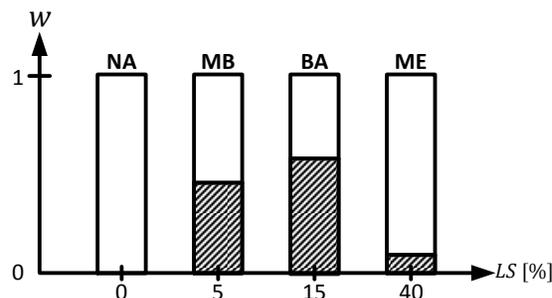


Figura C.3 Funciones de membresía para el tiro de carga en el esquema D3A.

En la Figura C.4 se puede observar la operación del esquema D3A.

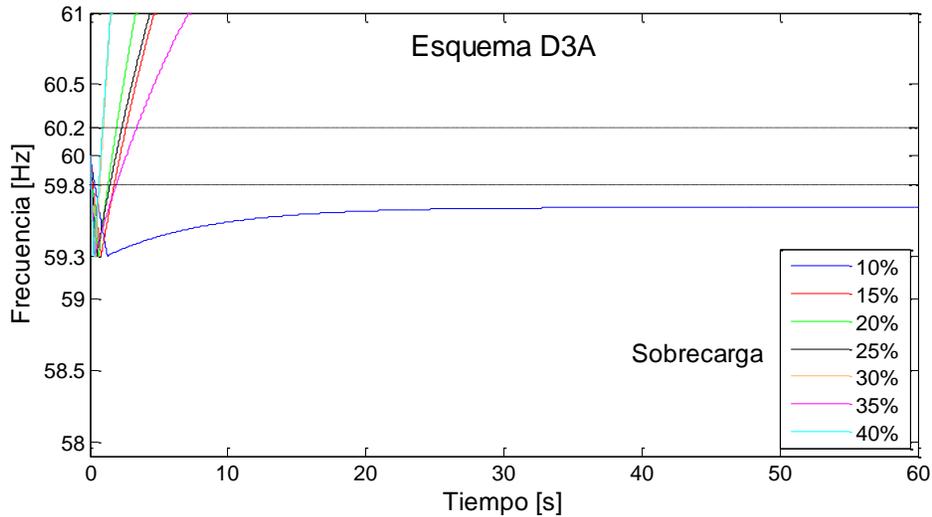


Figura C.4 Operación del esquema difuso D3A ante diferentes pérdidas de generación.

La Figura C.4 indica que las funciones de membresía del esquema D3A no están bien sintonizadas o que alguna regla de inferencia difusa está mal debido a que de las siete contingencias simuladas, ninguna pudo ser recuperada a un valor de frecuencia aceptable. Solamente para la sobrecarga de 10% se obtiene una frecuencia que se puede recuperar mediante el gobernador de velocidad. Las contingencias restantes terminan en un exceso de desconexión de carga muy elevado, razón por la que todas las frecuencias terminan en valores inaceptables. No es conveniente utilizar este esquema ya que su operación provocaría problemas de sobrefrecuencia. En la tabla C.3 se muestra el resumen numérico de la operación del esquema.

**Tabla C.3 Resumen de la operación del esquema D3A.**

Esquema	Sobrecarga [%]	Disparos realizados	LS [%]	LS total [%]	T <sub>G</sub> final [pu]	T <sub>L</sub> final [pu]	Frecuencia final [Hz]
D3A	10	1	9.19	9.19	0.911	0.903	59.64019
	15	2	12.21 10.53	22.74	0.860	0.767	63.75940
	20	2	15.48 15.26	30.74	0.809	0.688	65.62451
	25	2	15.04 17.54	32.58	0.759	0.669	64.19980
	30	2	27.74 28.03	55.77	0.708	0.438	76.70521
	35	2	17.77 21.65	39.42	0.658	0.601	62.83292
	40	2	31.03 32.7	63.73	0.607	0.359	78.07096

Se puede notar que el problema no se debe a la sintonización de las funciones de membresía, ya que al analizar las bajas frecuencias que se pueden alcanzar de acuerdo con la tabla 3.7, la mayoría de ellas queda dentro de la zona de traslape de los conjuntos difusos BA y MB. Lo anterior implica que se está desconectando demasiada carga en la base de reglas, principalmente en el segundo disparo como se aprecia en la tabla C.3. Por tal motivo, se considera conveniente cambiar la acción de tiro de carga para frecuencias MB y variación de frecuencia CE ya que las características de la frecuencia para el segundo disparo típicamente se encuentran en estos conjuntos difusos. La nueva tabla de reglas se muestra en la Figura C.5 con la cual se obtiene un nuevo esquema.

### Esquema D3B:

*Difusificación:* Las funciones de membresía para la difusificación de las variables de entrada permanecen sintonizadas de la misma manera que en el esquema D3A.

*Base de reglas:* En la Figura C.5 se aprecia un cambio en la base de reglas respecto a la mostrada en el esquema D3A. La nueva regla de inferencia difusa es:

*Si  $\langle\langle f \rangle\rangle$  es  $\langle\langle MB \rangle\rangle$  &  $\langle\langle \Delta f \rangle\rangle$  es  $\langle\langle CE \rangle\rangle$  entonces  $\langle\langle LS \rangle\rangle$  es  $\langle\langle BA \rangle\rangle$*

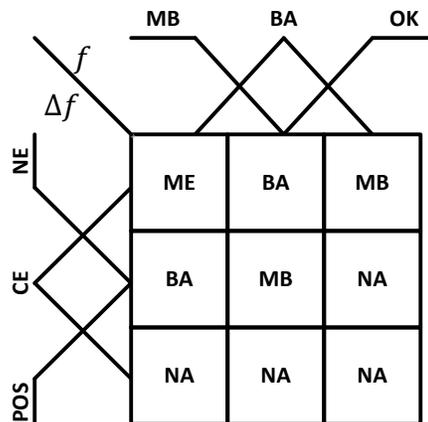


Figura C.5 Base de reglas para el esquema D3B.

Los porcentajes de desconexión de carga de cada conjunto difuso de salida se mantienen en el mismo valor que en el esquema D3A. La operación del esquema D3B se muestra en la Figura C.6.

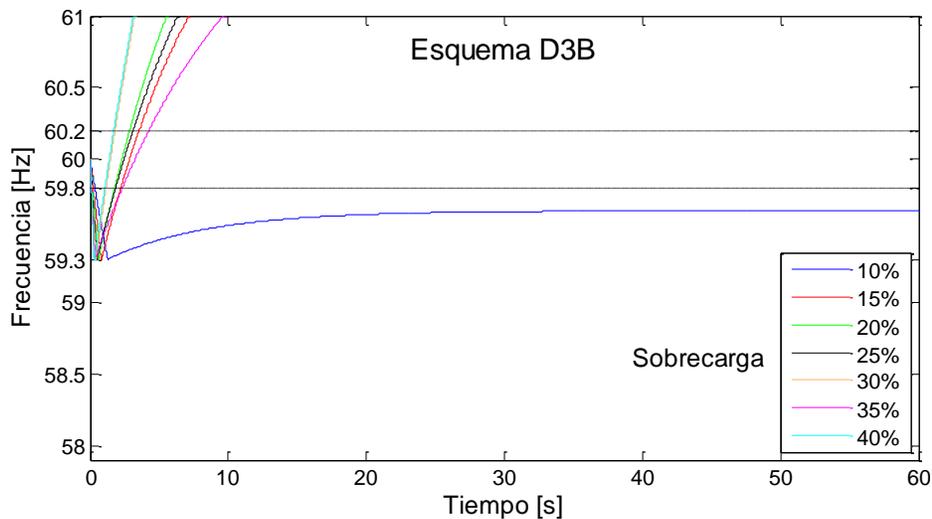


Figura C.6 Operación del esquema difuso D3B ante diferentes pérdidas de generación.

De acuerdo con la Figura C.6 se puede observar que el cambio de acción de tiro de carga casi no tuvo efecto en la operación del esquema, es posible apreciar que las contingencias comienzan a tener una inclinación hacia la derecha un poco más pronunciada respecto a las del esquema D3A. Sin embargo, en términos prácticos este esquema presenta las mismas deficiencias que el esquema D3A. En la tabla C.4 se presentan los resultados de la operación del esquema D3B.

**Tabla C.4 Resumen de la operación del esquema D3B.**

Esquema	Sobrecarga [%]	Disparos realizados	LS [%]	LS total [%]	T <sub>G</sub> final [pu]	T <sub>L</sub> final [pu]	Frecuencia final [Hz]
D3B	10	1	9.19	9.19	0.911	0.903	59.64019
	15	2	12.21 7.77	19.98	0.860	0.795	62.39412
	20	2	15.48 10.66	26.14	0.809	0.734	63.15690
	25	2	15.04 15.17	30.21	0.759	0.693	62.86476
	30	2	27.74 12.53	40.27	0.708	0.593	66.15737
	35	2	17.77 20.60	38.37	0.658	0.611	62.16259
	40	2	31.03 19.16	50.19	0.607	0.494	67.18370

La modificación que se hizo en la base de reglas permitió que el esquema D3B desconectara menores cantidades de carga como se aprecia en la tabla C.4; sin embargo, es claro que aún se tiene un exceso de desconexión de carga demasiado grande. Por lo tanto, se propone cambiar el porcentaje de tiro de carga para las acciones de tiro de carga.

**Esquema D3C:**

*Difusificación:* Las funciones de membresía para la difusificación de las variables de entrada permanecen sintonizadas de la misma manera que en el esquema anterior.

*Base de reglas:* La distribución de las reglas difusas dentro de la base de reglas para este esquema es la misma que se muestra en el esquema D3B. No obstante, se presenta una diferencia en los porcentajes de desconexión de carga de cada función de membresía de salida, la cual se puede apreciar en la Figura C.7 y en la tabla C.5.

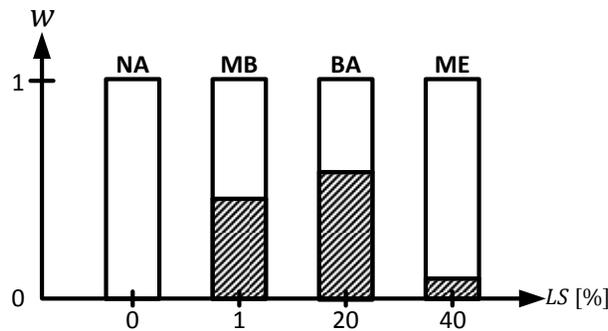


Figura C.7 Funciones de membresía para el tiro de carga en el esquema D3C.

**Tabla C.5 Acciones de tiro de carga para el esquema D3C.**

Variable lingüística	Carga a desconectar [%]	
NA	Nada	0
MB	Muy Bajo	1
BA	Bajo	20
ME	Mediano	40

Como se puede observar en la tabla C.5, la acción de tiro de carga bajo la variable lingüística BA incrementó la cantidad de carga a desconectar de 15% a 20% con el fin de que se obtenga el porcentaje de carga necesario a desconectar con un disparo en la mayoría de los casos. Por otro lado, la acción de tiro de carga con la variable lingüística MB se redujo de 5% a 1% para desconectar menos carga de la que se ha desconectado en los esquemas anteriores en caso de ser requerido el segundo disparo. La operación de este nuevo esquema se observa gráficamente en la Figura C.8 y numéricamente en la tabla C.6.

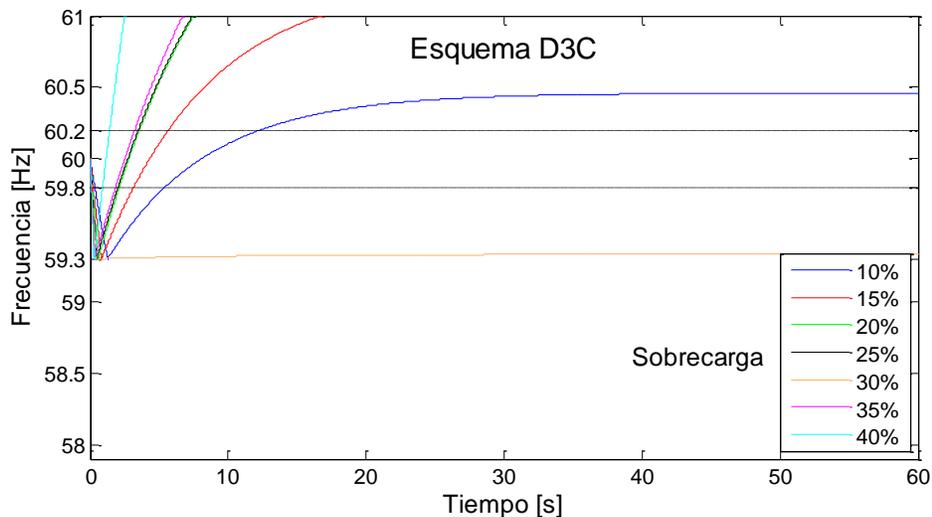


Figura C.8 Operación del esquema difuso D3C ante diferentes pérdidas de generación.

Analizando la Figura C.8 se puede notar que el esquema D3C tampoco opera satisfactoriamente ya que ninguna frecuencia logró recuperarse a su valor nominal. Sin embargo, es importante resaltar que tres de las siete contingencias pueden recuperarse mediante la acción del gobernador de velocidad de los generadores. Estas contingencias corresponden a 10%, 15% y 30% de sobrecarga ya que la acción de este control se refleja después de los 10 segundos de ocurrido el disturbio. En la siguiente tabla se aprecia el resumen de la operación del esquema D3C.

Tabla C.6 Resumen de la operación del esquema D3C.

Esquema	Sobrecarga [%]	Disparos realizados	LS [%]	LS total [%]	T <sub>G</sub> final [pu]	T <sub>L</sub> final [pu]	Frecuencia final [Hz]
D3C	10	2	7.54 3.48	11.02	0.911	0.884	60.45965
	15	2	11.88 5.76	17.64	0.860	0.818	61.25776
	20	2	16.30 8.28	24.58	0.809	0.749	62.34148
	25	2	17.14 12.36	29.5	0.759	0.700	62.46483
	30	1	28.82	28.82	0.708	0.708	59.33090
	35	2	22.21 17.51	39.72	0.658	0.598	63.00992
	40	2	32.82 20.25	53.07	0.607	0.465	69.35667

De acuerdo con la tabla C.6 se demuestra que el diseño del esquema ha mejorado con cada cambio; además se hace hincapié en que fue acertado cambiar los porcentajes de tiro de carga en las salidas. Con base en este resultado se propone realizar nuevamente cambios en los porcentajes de tiro de carga con el objeto de mejorar la operación del esquema difuso de tres membresías.

**Esquema D3D:**

*Difusificación:* La difusificación en este esquema se lleva a cabo con la misma sintonización de membresías que en los esquemas pasados.

*Base de reglas:* La estructura de la base de reglas para el esquema D3D es igual a la del esquema D3C; sin embargo, se realiza un cambio en los porcentajes de desconexión de carga de las funciones de membresía de salida. Lo anterior se puede observar en la Figura C.9 y en la tabla C.7.

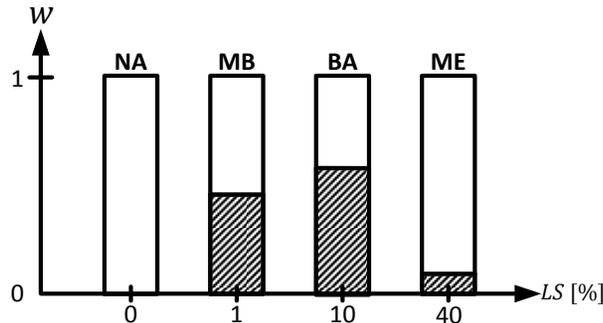


Figura C.9 Funciones de membresía para el tiro de carga en el esquema D3D.

**Tabla C.7 Acciones de tiro de carga para el esquema D3D.**

Variable lingüística	Carga a desconectar [%]	
NA	Nada	0
MB	Muy Bajo	1
BA	Bajo	10
ME	Mediano	40

La operación del esquema D3D se aprecia en la Figura C.10.

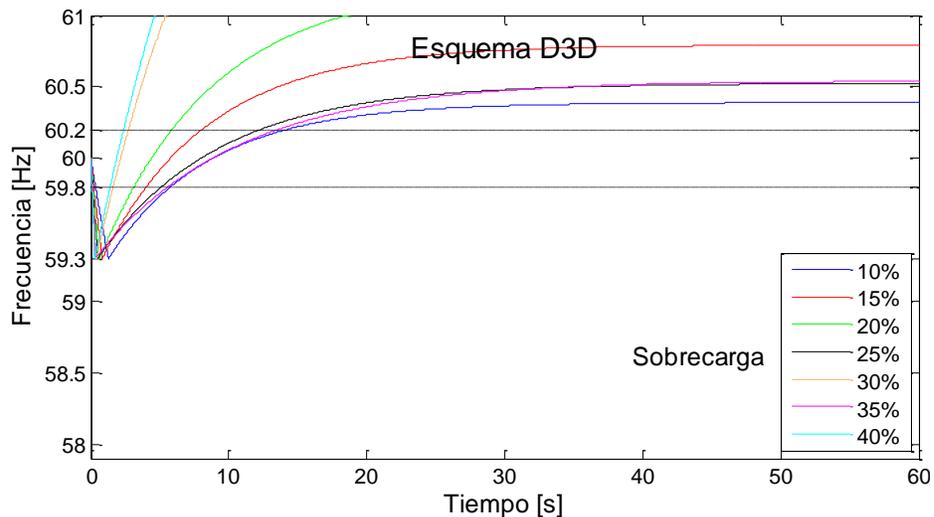


Figura C.10 Operación del esquema difuso D3D ante diferentes pérdidas de generación.

La Figura C.10 muestra que aun cuando ninguna contingencia se puede recuperar únicamente mediante disparos, las sobrecargas de 10%, 15%, 20%, 25% y 35% se pueden recuperar mediante la acción del gobernador de velocidad. Esto implica que se tiene una mejor respuesta por parte del sistema de inferencia difuso al permitir que los controles del generador puedan recuperar la frecuencia en cinco casos de los siete analizados cuando el esquema sea implementado. Sin embargo, el esquema fallaría si se presentan las sobrecargas de 30% y 40%; por ello no se puede decir que éste sea un esquema adecuado ya que debe tener la capacidad de rescatar estos niveles de sobrecarga en casos de emergencia. En la tabla C.8 se presenta la información de la operación del esquema D3D.

**Tabla C.8 Resumen de la operación del esquema D3D.**

Esquema	Sobrecarga [%]	Disparos realizados	LS [%]	LS total [%]	T <sub>G</sub> final [pu]	T <sub>L</sub> final [pu]	Frecuencia final [Hz]
D3D	10	2	5.16 5.69	10.85	0.911	0.886	60.38962
	15	2	8.26 8.38	16.64	0.860	0.828	60.79207
	20	2	11.68 10.7	22.38	0.809	0.771	61.22269
	25	2	10.83 15.07	25.9	0.759	0.736	60.52233
	30	2	25.66 10.33	35.99	0.708	0.636	63.52459
	35	2	13.32 22.44	35.76	0.658	0.637	60.53892
	40	2	29.23 17.54	46.77	0.607	0.528	64.70149

Como se puede apreciar en la tabla C.8, cada vez son más las contingencias que terminan en frecuencias que pueden reducirse a valores aceptables mediante la acción del gobernador de velocidad. Por otra parte, es claro que cada esquema ha mejorado el balance entre el par de carga y el par de generación, pero aún no se ha logrado obtener una operación con las cargas más apropiadas a desconectar.

En el intento de alcanzar una mejor operación por parte del sistema de inferencia difuso, es posible cambiar la regla de inferencia tipo si-entonces que se modificó en el esquema D3B y que se ha utilizado hasta este esquema por una acción de tiro de carga menor. Esto puede permitir que se dispare menos carga en el segundo disparo como fue analizado para el esquema D3B.

**Esquema D3E:**

*Difusificación:* Esta etapa del esquema inteligente permanece bajo la misma sintonización que en los esquemas anteriores.

*Base de reglas:* La base de reglas tiene un cambio en la regla de inferencia que comprende la frecuencia MB y la variación de frecuencia CE; dando como resultado la siguiente regla difusa:

*Si  $\ll f \gg$  es  $\ll MB \gg$  &  $\ll \Delta f \gg$  es  $\ll CE \gg$  entonces  $\ll LS \gg$  es  $\ll MB \gg$*

La base de reglas se detalla en la Figura C.11 y los porcentajes de desconexión de carga se mantienen como en el esquema D3D.

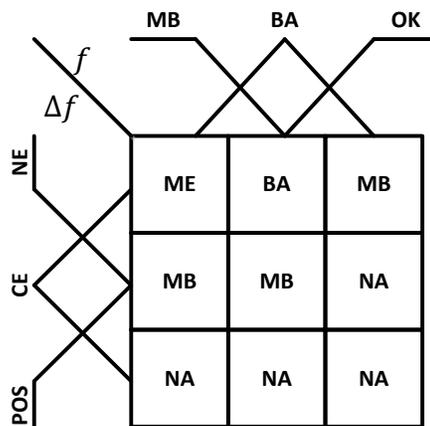


Figura C.11 Base de reglas para el esquema D3E.

La Figura C.12 muestra la operación del esquema D3E.

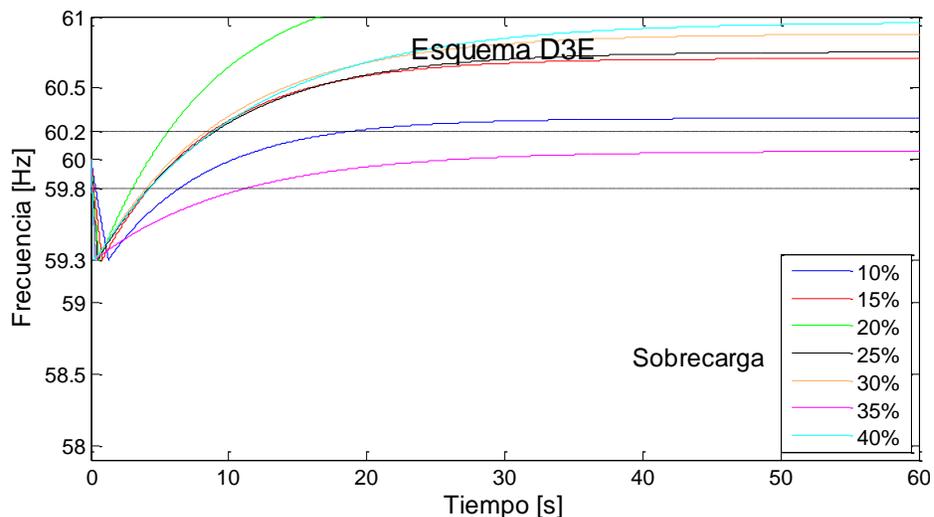


Figura C.12 Operación del esquema difuso D3E ante diferentes pérdidas de generación.

Gráficamente se puede observar que el esquema D3E de la Figura C.12 presenta una operación mejor respecto a todos los esquemas mostrados en ésta sección. Así mismo se aprecia que si a este esquema se le adiciona la acción del gobernador de velocidad, todas las contingencias podrían recuperarse a frecuencias aceptables de operación. En la tabla C.9 se presenta el resumen de la operación de éste esquema.

**Tabla C.9 Resumen de la operación del esquema D3E.**

Esquema	Sobrecarga [%]	Disparos realizados	LS [%]	LS total [%]	T <sub>G</sub> final [pu]	T <sub>L</sub> final [pu]	Frecuencia final [Hz]
D3E	10	2	5.16 5.47	10.63	0.911	0.888	60.28881
	15	2	8.26 8.2	16.46	0.860	0.830	60.70708
	20	2	11.68 10.84	22.52	0.809	0.770	61.29398
	25	2	10.83 15.5	26.33	0.759	0.732	60.75134
	30	2	25.66 5.85	31.51	0.708	0.681	60.87678
	35	2	13.32 21.66	34.98	0.658	0.645	60.05769
	40	2	29.23 12.14	41.37	0.607	0.582	60.95560

A diferencia de los cuatro esquemas presentados anteriormente; la operación del esquema D3E permite que las frecuencias terminen en niveles que pueden ser recuperados fácilmente por el gobernador de velocidad. En la tabla C.9 se aprecia que el caso de 20% de sobrecarga tiene una frecuencia de 61.29 Hz al final de los 60 segundos; este valor se encuentra en un problema de sobrefrecuencia; sin embargo, es importante mencionar que el esquema de tiro de carga no opera solo. Es decir, su acción se debe complementar con la acción de los lazos de control primario y secundario; por tanto, la frecuencia en esta contingencia debe comenzar a reducirse a un valor aceptable después de los 10 o 12 segundos de ocurrido el disturbio. En la Figura C.12 se puede observar que para dicho tiempo el nivel de frecuencia es menor a 61 Hz lo que implica que esta contingencia se puede recuperar con la acción de los controles del generador una vez que el esquema remedial operó.

El esquema D3E muestra una operación que puede considerarse dentro del diseño de un esquema remedial real ya que coadyuva en la recuperación de la frecuencia para todas las contingencias. Sin embargo, se puede decir que dicho esquema está limitado en la interpretación de incertidumbres ya que la utilización de lógica difusa debe permitir un manejo mayor de ellas, con lo cual la frecuencia en cada contingencia se pueda llevar dentro la banda operativa únicamente a través de los disparos.

Lo anterior sugiere que se incremente el número de funciones de membresía tanto en las entradas como en la salida con el fin de obtener una mejor operación del esquema remedial; por lo tanto, se considera conveniente realizar esquemas de cinco funciones de membresía en las entradas y 6 acciones de tiro de carga como salida del sistema difuso.

### C.3 ESQUEMAS DIFUSOS DE CINCO MEMBRESÍAS EN LAS ENTRADAS Y SEIS MEMBRESÍAS EN LA SALIDA

El sistema de inferencia difuso que conforma a estos esquemas tiene las siguientes características:

- 5 funciones de membresía (2 trapezoidales y 3 triangulares) para  $f$ .
- 5 funciones de membresía (2 trapezoidales y 3 triangulares) para  $\Delta f$ .
- 6 funciones de membresía Singletón para  $LS$ .
- Método de dedifusificación: centroide.

#### Esquema D5A:

*Difusificación:* Con base en las variables lingüísticas de los esquemas difusos anteriores, se decidió agregar dos funciones de membresía a las entradas; las cuales son:

Funciones de membresía para la frecuencia:

- Extremadamente Baja: Frecuencias correspondientes a contingencias severas.
- Muy Baja: Frecuencias asociadas a contingencias moderadas.
- Baja: Frecuencias debidas a contingencias de bajo impacto.
- Aceptable: Frecuencias dentro de la banda operativa.
- Alta: Frecuencias mayores a 60 Hz.

Funciones de membresía para la variación frecuencia:

- Negativa Grande: Variaciones asociadas a contingencias fuertes.
- Negativa Mediana: Variaciones asociadas a contingencias moderadas.
- Negativa Pequeña: Variaciones asociadas a sobrecargas de bajo impacto.
- Cero: Indica que la frecuencia se mantiene prácticamente fija.
- Positiva: Indica que la frecuencia se está recuperando.

Estas funciones de membresía presentan un traslape como se aprecia en la Figura C.13. Se puede notar que existe una relación entre las funciones de membresía para frecuencias menores a las aceptables y las funciones de membresía para variaciones negativas de frecuencia. Esto tiene como finalidad tener un mejor manejo de las incertidumbres, de tal forma que se pueda determinar adecuadamente la cantidad de carga a desconectar ante cualquier característica de la frecuencia. Es decir, el primer indicador de carga a desconectar es el nivel de frecuencia; sin embargo, la variación permite identificar la magnitud del disturbio en cuestión. De esta manera, si se tiene una frecuencia baja no necesariamente corresponde a una sobrecarga de bajo impacto, situación que se identifica a través de la variación de la frecuencia.

La sintonización de las funciones de membresía de la Figura C.13 se realizó de acuerdo con la tabla 3.7.

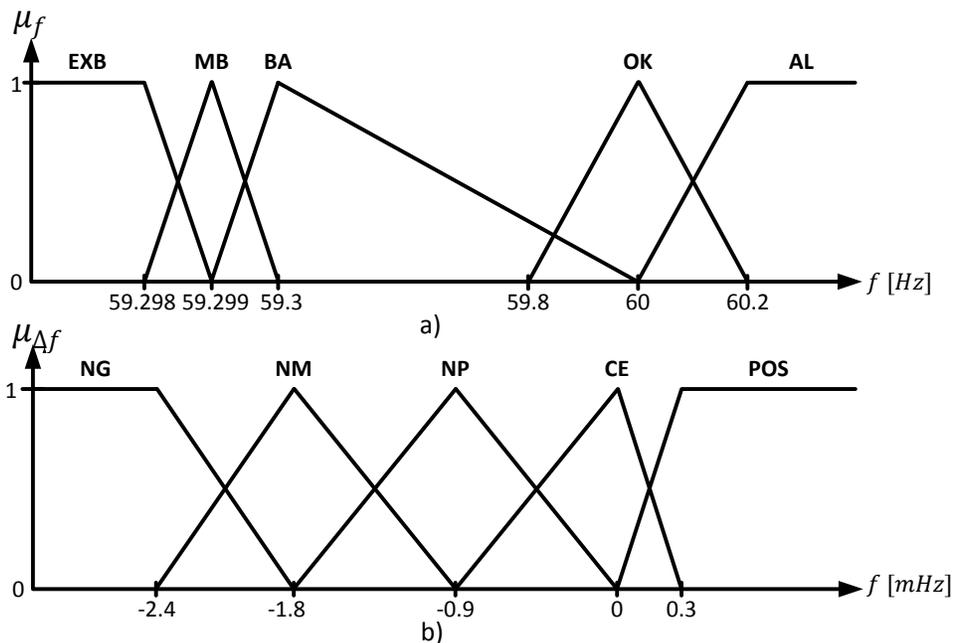


Figura C.13 Funciones de membresía para difusificar las entradas del esquema D5A: a) Frecuencia y b) Variación de frecuencia.

*Base de reglas:* La base de reglas para el esquema D5A consta de 25 reglas de inferencia difusa tipo si-entonces; la distribución de las reglas se aprecia en la Figura C.14, donde las acciones de tiro de carga son las funciones de membresía de salida. En la tabla C.10 se muestran las variables lingüísticas de las funciones de salida para el tiro de carga.

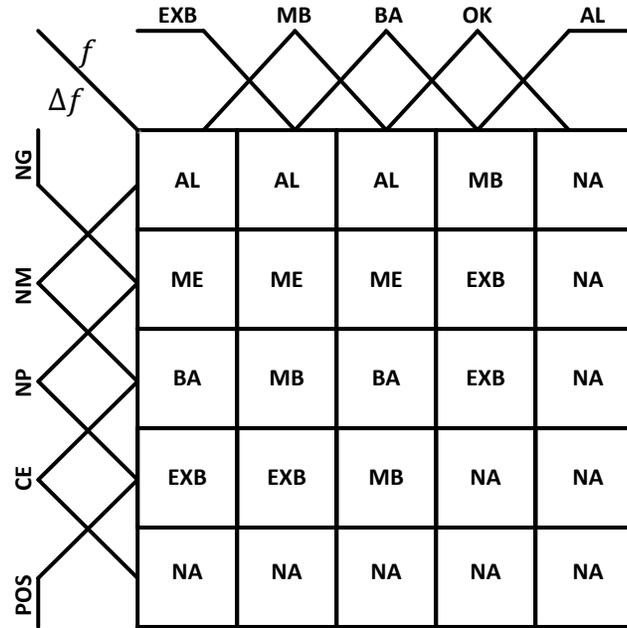


Figura C.14 Base de reglas para el esquema D5A.

Tabla C.10 Acciones de tiro de carga para el esquema D5A.

Variable lingüística		Carga a desconectar [%]
NA	Nada	0
EXB	Extremadamente Bajo	1
MB	Muy Bajo	2
BA	Bajo	17
ME	Mediano	34
AL	Alto	46

Los porcentajes de tiro de carga de la tabla C.10 se eligieron de manera arbitraria para tener un primer comportamiento del esquema; y en caso de ser necesario dichos valores se pueden modificar. Las funciones de membresía de salida se muestran en la Figura C.15 con su respectivo porcentaje de desconexión de carga.

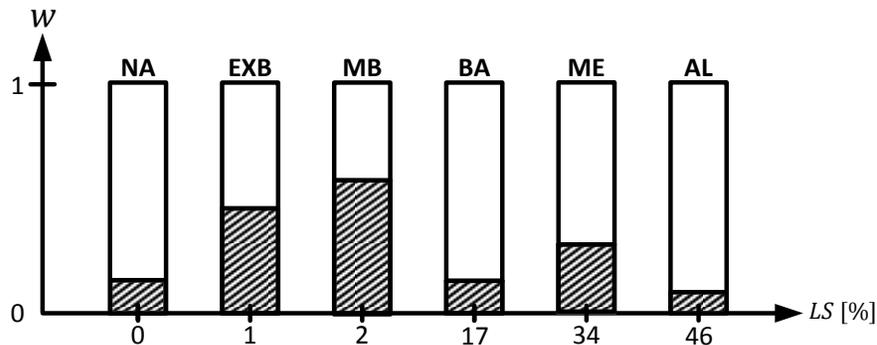


Figura C.15 Funciones de membresía para el tiro de carga en el esquema D5A.

La operación del esquema D5A se observa en la Figura C.16.

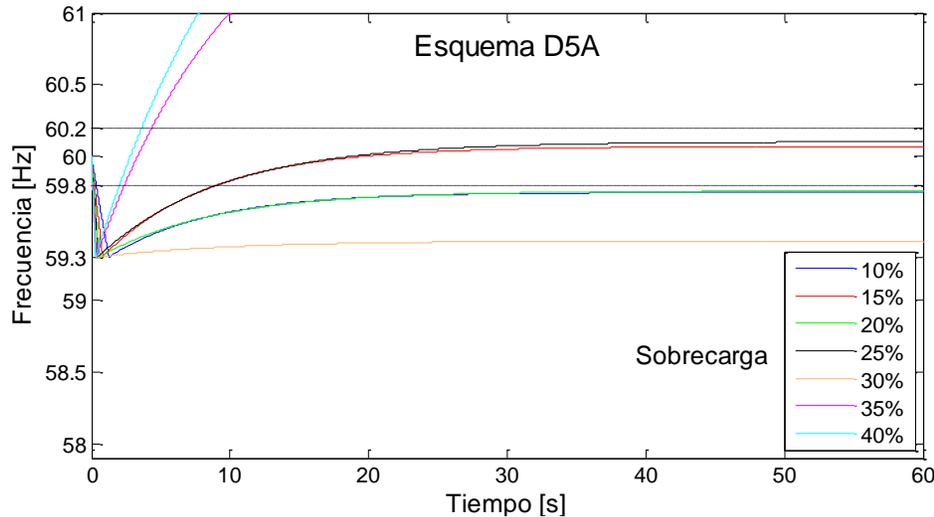


Figura C.16 Operación del esquema difuso D5A ante diferentes pérdidas de generación

En la Figura C.16 se aprecia que el primer esquema difuso de cinco membresías en las entradas ofrece una mejor operación que la mayoría de los esquemas difusos de tres membresías en sus entradas. El esquema D5A recupera la sobrecarga de 15% y 25% a valores de frecuencia dentro de la banda operativa; así mismo las sobrecargas de 10%, 20%, 30% y 35% se pueden recuperar con la acción del gobernador de velocidad. Este esquema presenta un problema de sobrecarga ante una contingencia de 40% de sobrecarga. En la tabla C.11 se presenta el resultado de la respuesta del esquema bajo estudio.

**Tabla C.11 Resumen de la operación del esquema D5A.**

Esquema	Sobrecarga [%]	Disparos realizados	LS [%]	LS total [%]	T <sub>G</sub> final [pu]	T <sub>L</sub> final [pu]	Frecuencia final [Hz]
D5A	10	1	9.44	9.44	0.911	0.9	59.75087
	15	2	12.37 2.77	15.14	0.860	0.843	60.06921
	20	2	15.31 4.19	19.5	0.809	0.8	59.75833
	25	2	21.93 3.25	25.18	0.759	0.744	60.10192
	30	1	28.97	28.97	0.708	0.706	59.41210
	35	1	38.39	38.39	0.658	0.612	62.09832
	40	1	44.18	44.18	0.607	0.555	62.81313

Los resultados de la tabla C.11 muestran que los esquemas de cinco funciones de membresía en las entradas funcionan mejor que los esquemas de tres funciones de

membresía en las entradas, ya que el esquema D5A recupera la frecuencia en dos sobrecargas a un valor de frecuencia adecuado. Además permite que la frecuencia pueda regresar a su valor nominal mediante el control de los generadores en cuatro contingencias más; de las cuales se tiene un excedo de desconexión de carga en la sobrecarga de 35%; no obstante, en el momento que se comienza a observar un cambio en la frecuencia debido a la acción del gobernador de velocidad, ésta se encuentra a 61 Hz exactamente.

Como se puede apreciar en la Figura C.16 y en la tabla C.11, el esquema realiza dos disparos para las sobrecargas de 15%, 20% y 25%; mientras que realiza un disparo para las sobrecargas de 10%, 30%, 35% y 40%. Por otra parte, ante contingencias severas como las sobrecargas de 35% y 40% el esquema desconecta demasiada carga. Para aminorar la cantidad de carga desconectada en las contingencias severas se propone cambiar algunas reglas difusas dentro de la base de reglas, cambiando la acción de tiro de carga por acciones de menor porcentaje de desconexión. Al mismo tiempo se busca que se recupera la frecuencia a través de un disparo de carga; por lo tanto, se considera conveniente cambiar los porcentajes de desconexión de carga definidos para cada conjunto difuso de salida.

### **Esquema D5B:**

*Difusificación:* Las funciones de membresía para difusificar los valores de entrada en el esquema D5B tienen la misma sintonización mostrada en la Figura C.13.

*Base de reglas:* La base de reglas para este esquema presenta cinco modificaciones respecto de la base de reglas del esquema anterior. Estas modificaciones se hicieron con base en la activación de las membresías de frecuencia y de variación de frecuencia que proporciona el programa computacional; el cual se aprecia en el apéndice D. Así entonces, la base de reglas se muestra en la Figura C.17 cuyas nuevas reglas difusas son:

*Si*  $\langle f \rangle$  *es*  $\langle BA \rangle$  &  $\langle \Delta f \rangle$  *es*  $\langle NG \rangle$  *entonces*  $\langle LS \rangle$  *es*  $\langle ME \rangle$

*Si*  $\langle f \rangle$  *es*  $\langle BA \rangle$  &  $\langle \Delta f \rangle$  *es*  $\langle NP \rangle$  *entonces*  $\langle LS \rangle$  *es*  $\langle MB \rangle$

*Si*  $\langle f \rangle$  *es*  $\langle MB \rangle$  &  $\langle \Delta f \rangle$  *es*  $\langle NP \rangle$  *entonces*  $\langle LS \rangle$  *es*  $\langle BA \rangle$

*Si*  $\langle f \rangle$  *es*  $\langle EXB \rangle$  &  $\langle \Delta f \rangle$  *es*  $\langle NP \rangle$  *entonces*  $\langle LS \rangle$  *es*  $\langle MB \rangle$

*Si*  $\langle f \rangle$  *es*  $\langle BA \rangle$  &  $\langle \Delta f \rangle$  *es*  $\langle CE \rangle$  *entonces*  $\langle LS \rangle$  *es*  $\langle EXB \rangle$

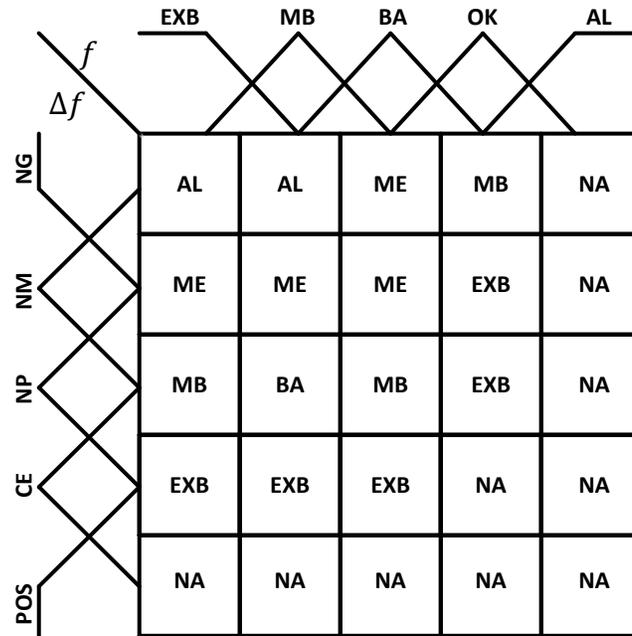


Figura C.17 Base de reglas para el esquema D5B.

Los cambios en los porcentajes de tiro de carga de las funciones de salida se aprecian en la Figura C.18 y en la tabla C.12.

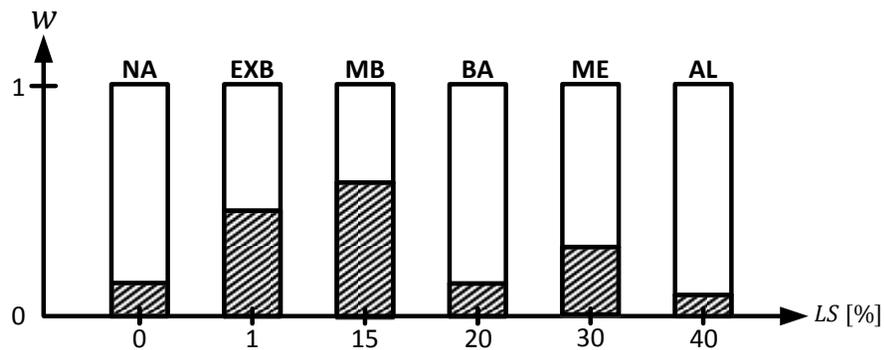


Figura C.18 Funciones de membresía para el tiro de carga en el esquema D5B.

**Tabla C.12 Acciones de tiro de carga para el esquema D5B.**

Variable lingüística	Carga a desconectar [%]	
NA	Nada	0
EXB	Extremadamente Bajo	1
MB	Muy Bajo	15
BA	Bajo	20
ME	Mediano	30
AL	Alto	40

La operación del esquema D5B se muestra en la Figura C.19.

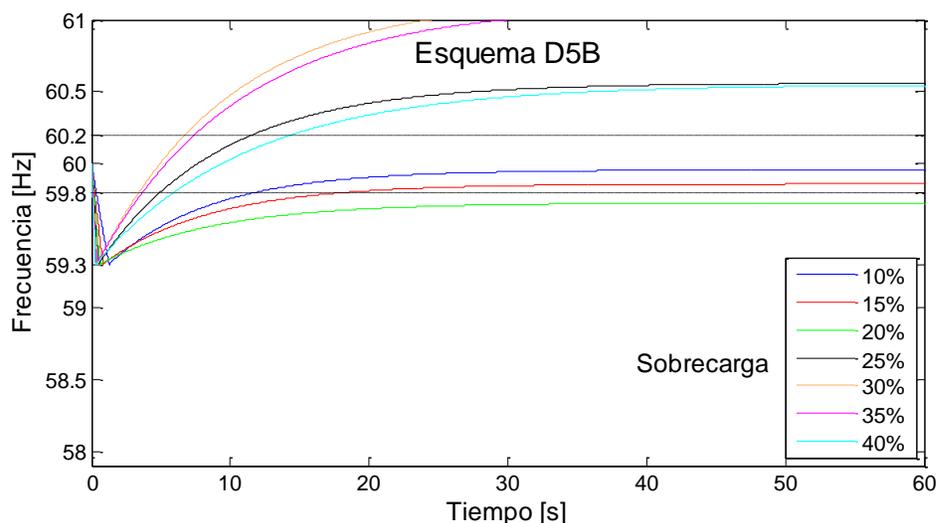


Figura C.19 Operación del esquema difuso D5B ante diferentes pérdidas de generación.

En la Figura C.19 se nota que las modificaciones que dieron lugar al esquema D5B permiten obtener una mejor operación en este nuevo esquema. Se pueden ver dos frecuencias dentro de la banda operativa y cinco frecuencias que se pueden regular fácilmente a 60 Hz. En la tabla C.13 se detalla la operación del esquema D5B.

**Tabla C.13 Resumen de la operación del esquema D5B.**

Esquema	Sobrecarga [%]	Disparos realizados	LS [%]	LS total [%]	T <sub>G</sub> final [pu]	T <sub>L</sub> final [pu]	Frecuencia final [Hz]
D5B	10	1	9.91	9.91	0.911	0.896	59.95651
	15	1	14.71	14.71	0.860	0.848	59.85911
	20	1	19.46	19.46	0.809	0.801	59.72739
	25	2	22.86 3.18	26.04	0.759	0.735	60.55794
	30	2	27.43 4.56	31.99	0.708	0.676	61.14843
	35	2	32.59 4.18	36.77	0.658	0.628	61.09829
	40	2	38.48 2.34	40.82	0.607	0.588	60.54438

En la tabla C.13 se puede observar que el esquema D5B interpreta mejor las incertidumbres en el proceso de tiro de carga ya que para la mayoría de las contingencias el esquema desconecta porcentajes de carga muy aproximados al nivel de sobrecarga. Sin embargo, se continúa presentando la operación mediante dos disparos de carga en cuatro contingencias; situación que dificulta la recuperación de la frecuencia a un valor de operación aceptable. Esto se debe a que los pares de

generación y carga varían respecto a la frecuencia con cada disparo que realiza el esquema; por lo tanto, se introduce una pequeña incertidumbre debido a esta variación para el cálculo del segundo disparo.

En la tabla C.13 se aprecia que el desbalance entre pares de generación y carga es mínimo para las sobrecargas de 10%, 15% y 20% lo que resulta en frecuencias dentro de la banda operativa, o muy cercanas a ésta. Por otra parte, es claro que las frecuencias en el resto de las contingencias terminan en valores superiores a los 60.2 Hz debido a que el desbalance entre los pares de generación y carga es mayor. Estas frecuencias se pueden reducir a 60 Hz mediante el gobernador de velocidad, lo que implica que es conveniente tener una operación con un disparo de carga en lugar de una operación con dos disparos de carga.

Los casos en que se tiene un mayor desbalance de pares del sistema corresponden a las sobrecargas de 30% y 35%, donde el esquema desconectó alrededor de 2% más de carga respecto de la necesaria. Las frecuencias finales de estas contingencias son de 61.15 Hz y 61.1 Hz respectivamente; no obstante, a los 10 segundos de que ocurrió el disturbio, dichas frecuencias se encuentran en 60.47 Hz y en 60.4 Hz respectivamente; lo que implica que el gobernador de velocidad puede regresar estas frecuencias a su valor nominal.

La operación de este esquema inteligente en combinación con la acción de los controles del generador tiene la capacidad de brindar una operación satisfactoria para las contingencias analizadas. Sin embargo, se busca la operación del esquema a través de un disparo para recuperar la frecuencia a su valor nominal en lo mayor posible; de esta manera el esquema inteligente podrá determinar la cantidad mínima necesaria para salvaguardar la operación del sistema y así lograr que la intervención del control de carga-frecuencia del generador sea únicamente para eliminar las pequeñas desviaciones de frecuencia dentro de la banda operativa para restaurarla a su valor nominal.

De acuerdo a la operación del esquema D5B, se puede decir que las reglas difusas dentro de la base de reglas se encuentran distribuidas de manera adecuada; ya que para cada contingencia se desconectaron cantidades de carga muy cercanas a las necesarias a través del primer disparo; y por lo tanto el desbalance entre carga y generación fue mínimo. A pesar de ello, cuando el esquema realiza el segundo disparo, la carga que falta por desconectar es poca, por lo tanto se propone modificar los porcentajes de desconexión de carga de las funciones de salida para lograr que se desconecte la carga mínima necesaria en cada caso y así evitar el segundo disparo de carga.

### Esquema D5C:

*Difusificación:* La sintonización de las funciones de membresía de las entradas permanece en los mismos valores que se presentan en el esquema D5B.

*Base de reglas:* La base de reglas del esquema anterior es la misma que se utiliza en el esquema D5C. Los porcentajes de tiro de carga de las funciones de membresía de salida se presentan en la Figura C.20 y en la tabla C.14.

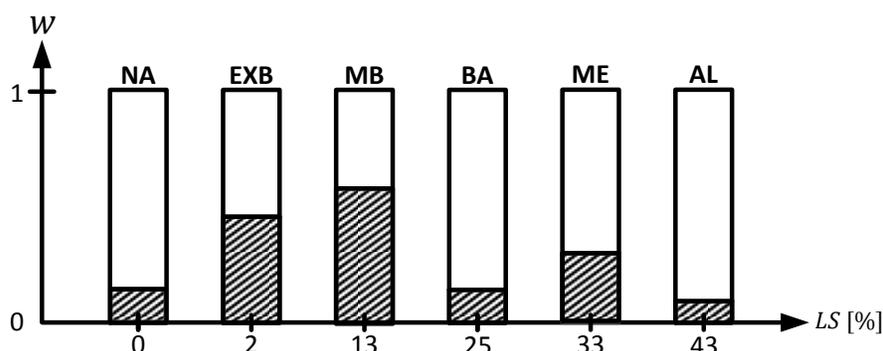


Figura C.20 Funciones de membresía para el tiro de carga en el esquema D5C.

**Tabla C.14 Acciones de tiro de carga para el esquema D5C.**

Variable lingüística		Carga a desconectar [%]
NA	Nada	0
EXB	Extremadamente Bajo	2
MB	Muy Bajo	13
BA	Bajo	25
ME	Mediano	33
AL	Alto	43

La operación del esquema D5C se muestra en la Figura C.21; en ella se aprecia un mejor desempeño respecto del esquema D5B debido a que las frecuencias finales en las sobrecargas de 10% y 20% quedan dentro de la banda operativa; así mismo, las frecuencias debidas a las sobrecargas de 15% y 25% terminan en valores muy cercanos a la banda operativa por debajo de los 59.8 Hz; las frecuencias de las sobrecargas de 20% y 35% alcanzan un valor poco mayor a los 60.2 Hz. Finalmente la contingencia más severa que corresponde a 40% de sobrecarga queda en 61 Hz. Esto implica que el esquema ha interpretado aún mejor las incertidumbres ya que la mayoría de las frecuencias alcanzan valores muy cercanos a los niveles aceptables de operación.

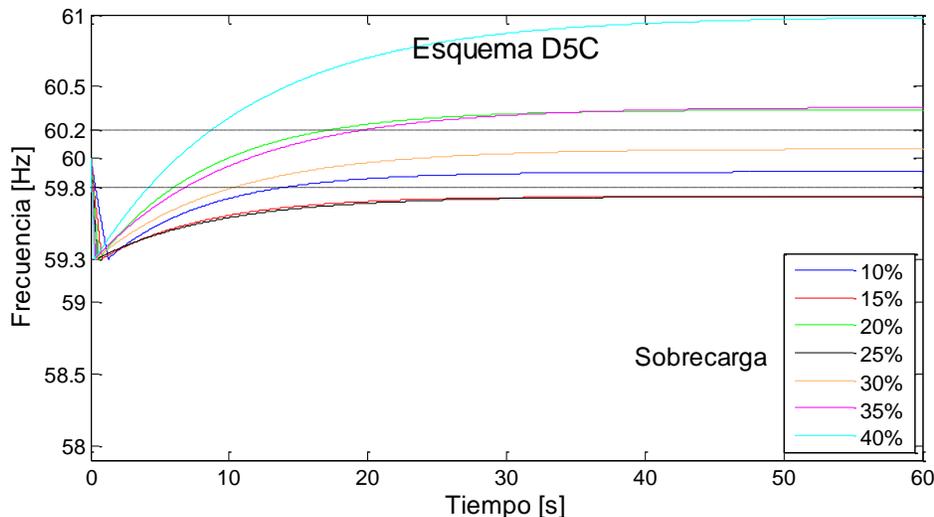


Figura C.21 Operación del esquema difuso D5C ante diferentes pérdidas de generación.

En la tabla C.15 se puntualiza la operación del esquema D5C.

**Tabla C.15 Resumen de la operación del esquema D5C.**

Esquema	Sobrecarga [%]	Disparos realizados	LS total [%]	T <sub>G</sub> final [pu]	T <sub>L</sub> final [pu]	Frecuencia final [Hz]
D5C	10	1	9.8	0.911	0.897	59.90591
	15	1	14.45	0.860	0.851	59.73697
	20	1	20.69	0.809	0.789	60.33732
	25	1	24.51	0.759	0.751	59.73486
	30	1	30.12	0.708	0.695	60.06519
	35	1	35.59	0.658	0.640	60.35411
	40	1	41.48	0.607	0.582	60.97899

Los resultados de la operación del esquema D5C muestran que se ha logrado el tiro de carga mediante un solo disparo; lo cual implica que todas las frecuencias finales son cercanas a 60 Hz excepto la que corresponde a la sobrecarga de 40%; sin embargo, esta frecuencia se puede recuperar a 60 Hz a través de la acción de los lazos de control primario y secundario del generador, al igual que las frecuencias debidas a las sobrecargas de 15%, 20%, 25% y 35% ya que se encuentran en valores muy cercanos a la banda de frecuencias aceptables. Lo anterior demuestra que es conveniente que el esquema desconecte la carga necesaria mediante un disparo; puesto que la frecuencia terminará en niveles muy cercanos a 60 Hz y por tanto se tendrá un balance entre la generación disponible y las cargas conectadas al sistema.

En la tabla C.15 se observa que las cantidades de carga desconectadas por el esquema son muy cercanas a los niveles de sobrecarga. Por tal motivo se considera adecuado modificar los porcentajes de desconexión de carga en las salidas del sistema de

inferencia difuso, pues la base de reglas ha mostrado un buen comportamiento del esquema y las modificaciones de los porcentajes de tiro de carga han rendido buenos resultados.

### Esquema D5D:

*Difusificación:* El proceso de difusificación en el esquema D5D se mantiene con la misma sintonización de las membresías de entrada mostradas para los esquemas anteriores.

*Base de reglas:* La base de reglas para el esquema D5D es la misma que se muestra en el esquema D5B y D5C debido a la adecuada inferencia que ésta brinda. Por otro lado, con base en la operación del esquema anterior, los porcentajes de tiro de carga a la salida fueron modificados como se marca en la Figura C.22 y en la tabla C.16.

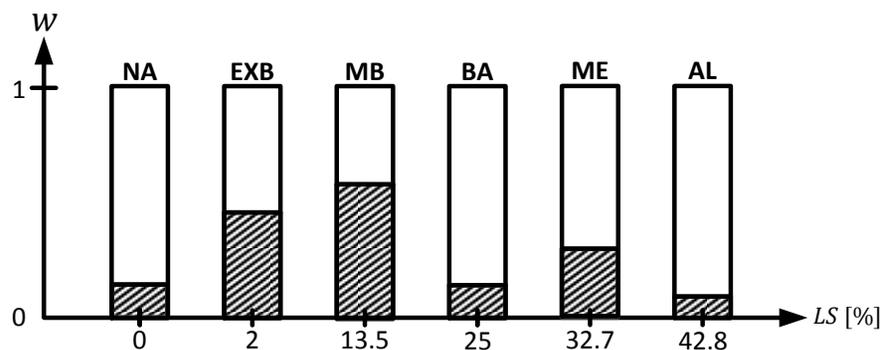


Figura C.22 Funciones de membresía para el tiro de carga en el esquema D5D.

**Tabla C.16 Acciones de tiro de carga para el esquema D5D.**

Variable lingüística	Carga a desconectar [%]	
NA	Nada	0
EXB	Extremadamente Bajo	2
MB	Muy Bajo	13.5
BA	Bajo	25
ME	Mediano	32.7
AL	Alto	42.8

En la Figura C.23 se muestra el comportamiento de la frecuencia con la operación del esquema D5D ante diferentes contingencias.

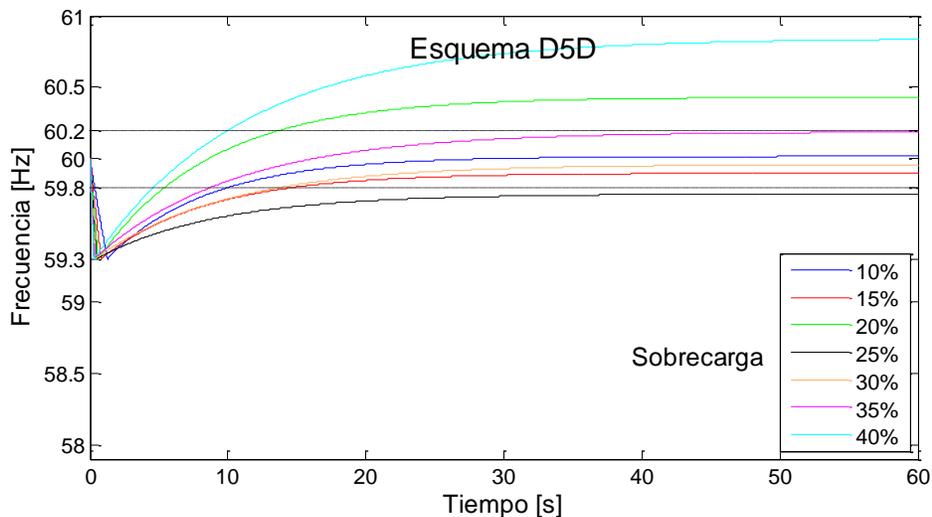


Figura C.23 Operación del esquema difuso D5D ante diferentes pérdidas de generación.

La operación del esquema D5D permite observar que la frecuencia es recuperada a un valor dentro del ancho de banda aceptable en las contingencias de 10%, 15%, 30% y 35% de sobrecarga; mientras que el resto de contingencias alcanza un valor de frecuencia que se puede recuperar con los controles del generador. En la tabla C.17 se aprecia el comportamiento de la frecuencia y de los pares de carga y generación como consecuencia de las decisiones tomadas por el sistema de inferencia difuso.

**Tabla C.17 Resumen de la operación del esquema D5D.**

Esquema	Sobrecarga [%]	Disparos realizados	LS total [%]	T <sub>G</sub> final [pu]	T <sub>L</sub> final [pu]	Frecuencia final [Hz]
D5D	10	1	9.8	0.911	0.897	59.90591
	15	1	14.45	0.860	0.851	59.73697
	20	1	20.69	0.809	0.789	60.33732
	25	1	24.51	0.759	0.751	59.73486
	30	1	30.12	0.708	0.695	60.06519
	35	1	35.59	0.658	0.640	60.35411
	40	1	41.48	0.607	0.582	60.97899

En la tabla C.17 se observa que la frecuencia más alejada de su valor nominal pertenece a la sobrecarga de 40%; esta situación no es alarmante porque además de ser un nivel de frecuencia al alcance del gobernador de velocidad, es una contingencia que tiene menor probabilidad de aparecer ya que no es común que salga de operación gran parte del porcentaje de generación en un mismo instante. Por otro lado se puede notar que el esquema inteligente desconectó en un solo paso porcentajes de carga muy cercanos a los niveles de sobrecarga vista por el sistema debido a pérdida de generación. Esto resulta en un mayor balance entre los pares de

generación y carga en todos los casos y por ende en frecuencias muy cercanas a las aceptables.

Este esquema presenta una operación que se puede mejorar; para ello se considera conveniente modificar un poco las funciones de membresía de la variación de frecuencia; pues de acuerdo con los resultados obtenidos por el programa computacional del FIS, se tiene que la desconexión de carga se puede corregir aún más mediante los grados de activación de la variación de la frecuencia. De esta manera se pretende obtener mayor desconexión de carga en los casos que se tienen frecuencias por debajo de 59.8 Hz y una desconexión de carga menor para los casos en que las frecuencias se encuentran por encima de 60.2 Hz.

### Esquema D5E:

*Difusificación:* Con base en la difusificación de la variación de frecuencia del esquema D5D, se modificaron las membresías para difusificar dicha variable. En la Figura C.24 se muestran las funciones de membresía para el nuevo esquema difuso.

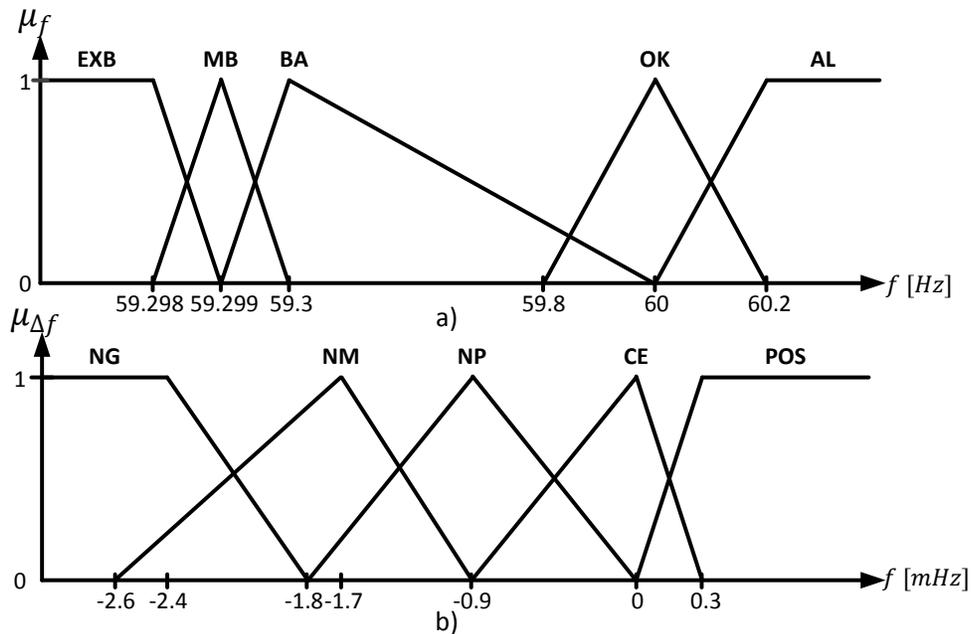


Figura C.24 Funciones de membresía para difusificar las entradas del esquema D5E: a) Frecuencia y b) Variación de frecuencia.

*Base de reglas:* La base de reglas y los porcentajes de tiro de carga para la salida del esquema D5E son los mismos que se muestran en el esquema D5D.

La operación del esquema D5E se puede observar en la Figura C.25.

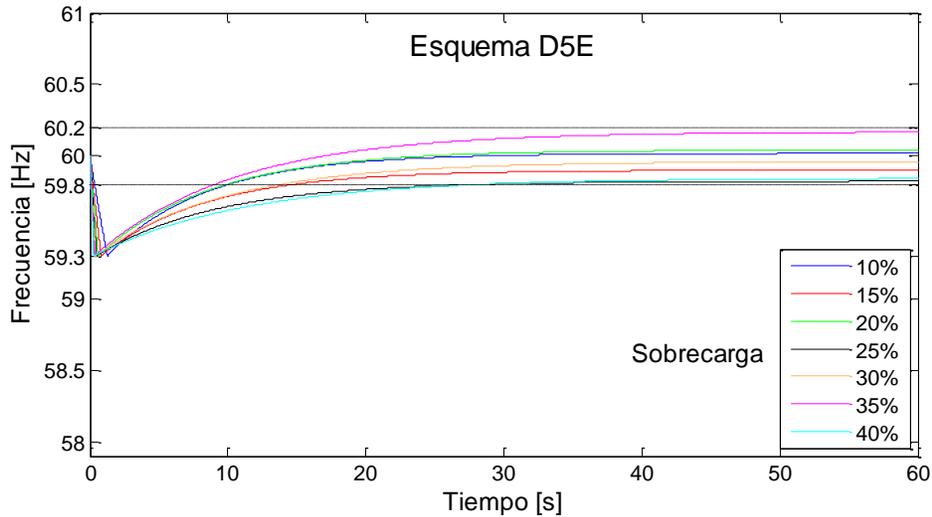


Figura C.25 Operación del esquema difuso D5E ante diferentes pérdidas de generación.

Como se puede apreciar en la Figura C.25, el esquema D5E opera satisfactoriamente ya que para todas las contingencias bajo estudio, la desconexión de carga es la mínima necesaria lo cual permite la pronta recuperación de la frecuencia a un valor aceptable de operación entre 59.8 y 60.2 Hz. En la tabla C.18 se presentan los resultados de la operación de este esquema.

**Tabla C.18 Resumen de la operación del esquema D5E.**

Esquema	Sobrecarga [%]	Disparos realizados	LS total [%]	T <sub>G</sub> final [pu]	T <sub>L</sub> final [pu]	Frecuencia final [Hz]
D5E	10	1	10.05	0.911	0.894	60.01690
	15	1	14.79	0.860	0.847	59.89955
	20	1	20.09	0.809	0.794	60.03992
	25	1	24.67	0.759	0.749	59.82172
	30	1	29.94	0.708	0.697	59.95912
	35	1	35.28	0.658	0.643	60.16607
	40	1	39.77	0.607	0.599	59.84054

La tabla C.18 muestra que la operación del esquema D5E fue exitosa debido a que logró recuperar todas las contingencias mediante un solo disparo de carga. Lo anterior implica que cinco funciones de membresía son suficiente base inteligente para poder interpretar las incertidumbres presentes en el proceso de tiro de carga. Por lo tanto, el esquema evalúa las incertidumbres de manera adecuada y toma la mejor decisión acerca de la cantidad de carga necesaria a desconectar como se observa en la cuarta columna de la misma tabla; situación que se refleja como una recuperación inmediata de la frecuencia dentro de la banda operativa con un mínimo desbalance entre generación y carga.

### C.4 PROPUESTA DE UNA METODOLOGÍA PARA REALIZAR LA SINTONIZACIÓN DE LAS MEMBRESÍAS DE UN ESQUEMA DIFUSO DE TIRO DE CARGA POR BAJA FRECUENCIA

De acuerdo con el proceso realizado para la sintonización de las funciones de membresía de los esquemas difusos presentados en la sección C.2 y C.3, en la Figura C.26 se propone una metodología para llevar a cabo la sintonización de las membresías de entrada de un esquema difuso de tiro de carga por baja frecuencia.

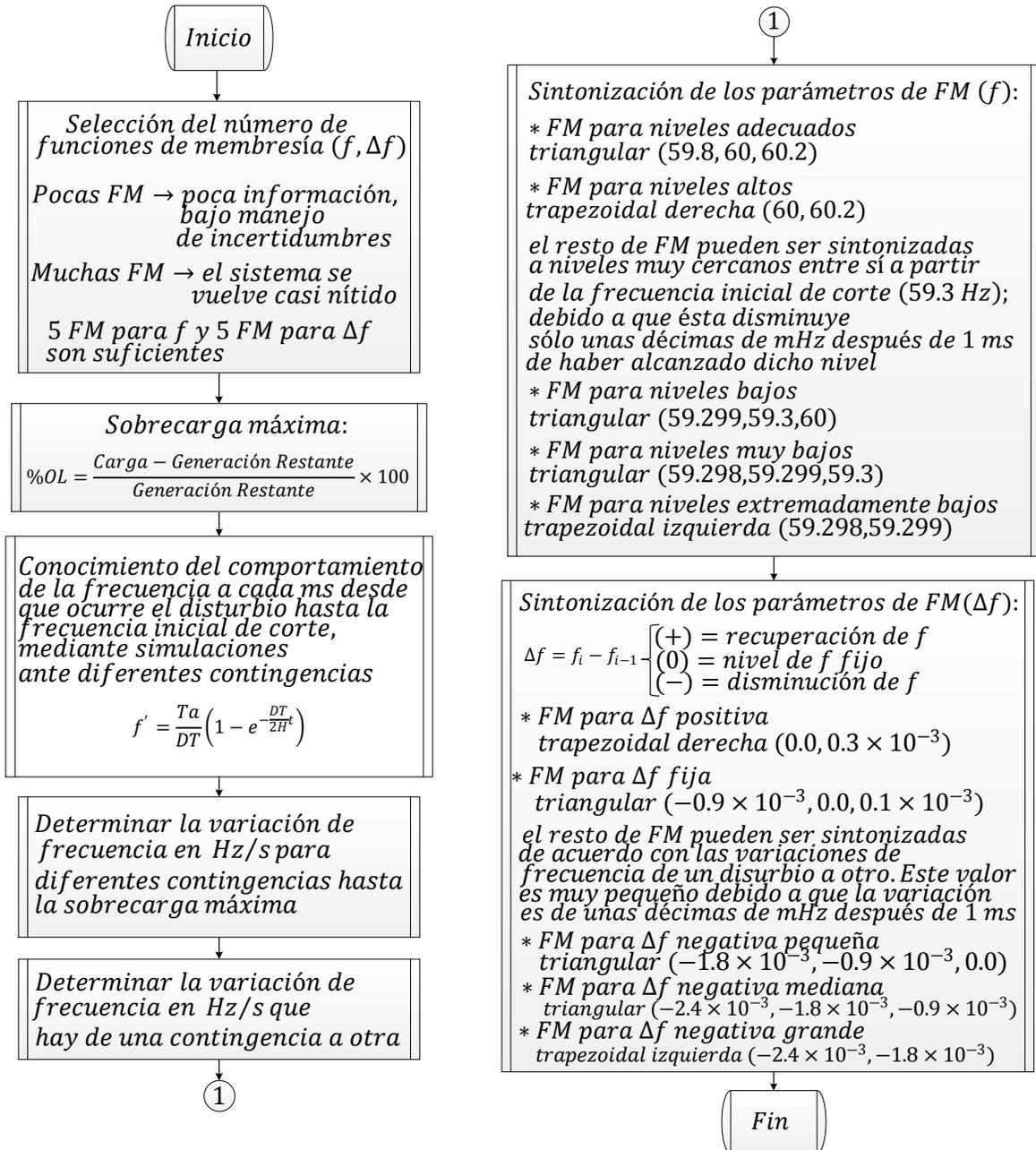


Figura C.26 Metodología para la sintonización de las funciones de membresía de entrada de un esquema difuso de tiro de carga por baja frecuencia.



## **APÉNDICE D:**

### **CÓDIGO FUENTE DE LOS PROGRAMAS DESARROLLADOS EN FORTRAN 90**

#### **D.1 INTRODUCCIÓN**

En éste apéndice se muestra el código de los programas desarrollados en FORTRAN 90 para realizar el tiro de carga. El primer programa sirve para analizar el comportamiento de la frecuencia en el SEP ante pérdidas de generación; este programa permite el uso de esquemas estáticos de tiro de carga. El segundo programa comprende el desarrollo del sistema de inferencia difuso para tiro de carga por baja frecuencia. Finalmente el tercer programa analiza el comportamiento de la frecuencia ante pérdidas de generación y permite el uso de esquemas difusos de tiro de carga. Así mismo, se presenta un ejemplo de la ejecución de cada programa.

**D.2 PROGRAMA DEL COMPORTAMIENTO DE LA FRECUENCIA UTILIZANDO ESQUEMAS ESTÁTICOS DE TIRO DE CARGA**

**a) Nomenclatura Utilizada**

```
!H= Inercial del sistema.
!DL= Factor de amortiguamiento de carga.
!OL= Nivel de sobrecarga visto por el sistema debido a
      pérdida de generación.
!TG= Par de generación.
!TL= Par de carga.
!TA= Par de aceleración del sistema.
!DT= Factor de amortiguamiento total.
!F1= Frecuencia nominal (60 Hz).
!F= Vector de frecuencias del sistema.
!DF= Variación de frecuencia en Hz.
!FP= Variación de frecuencia en pu.
!NSTP= Número de pasos del esquema.
!TMAX= Tiempo máximo de simulación.
!INC= Incremento de tiempo.
!AUXTIME= Variable para medir al tiempo total simulado.
!T= Variable para medir el tiempo hasta un corte de carga.
!TLBLS= Par de carga antes del tiro de carga.
!LSEQ= Carga tirada equivalente.
!FSTP= Frecuencia de paso.
!LS= Vector para almacenar los porcentajes de tiro de carga
      por paso.
!DATASYSTEM= Módulo para la declaración de variables del
      sistema.
!DATAScheme= Módulo para la declaración de variables del
      esquema estático de tiro de carga.
!DATARead= Subrutina para la lectura de datos del sistema y
      del esquema estático de tiro de carga.
!DFREQ= Subrutina para el cálculo de variación de frecuencia
      y operación del esquema de tiro de carga.
```

**b) Programa Principal**

```
PROGRAM LOADSHEDDING
IMPLICIT NONE
CALL LETRERO
CALL DATARead
CALL DFREQ
END PROGRAM LOADSHEDDING
```

**c) Subrutina: Letrero**

```
SUBROUTINE LETRERO
OPEN(UNIT=35, FILE='RESULTADO.TXT', STATUS='NEW')
20 FORMAT('*****',/, &
&'***',/, &
&'***          INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL',/, &
&'***',/, &
&'* ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA',/, &
&'*** SECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACION***',/, &
&'***',/, &
&'*** MAESTRIA EN CIENCIAS EN INGENIERIA ELECTRICA',/, &
&'***',/, &
&'***',/, &
&'***          TIRO DE CARGA POR BAJA FRECUENCIA',/, &
&'***',/, &
&'***** ELABORO: ING. JESUS SANCHEZ CORTES',/, &
&'
WRITE(35,20)
END SUBROUTINE LETRERO
```

**d) Módulo: Variables del Sistema (DataSystem)**

```
MODULE DATASYSTEM
IMPLICIT NONE
REAL (KIND=8) :: H,DL,OL,TG,TL,TA,DT
REAL (KIND=8), DIMENSION(:), ALLOCATABLE :: F
END MODULE DATASYSTEM
```

**e) Módulo: Datos del Esquema (DataScheme)**

```
MODULE DATAScheme
IMPLICIT NONE
INTEGER :: NSTP
REAL (KIND=8) :: TMAX,INC,AUXTIME,TLBLS,LSEQ
REAL (KIND=8), DIMENSION (:), ALLOCATABLE :: FSTP,LS
END MODULE DATAScheme
```

**f) Subrutina: Lectura de Datos (DataRead)**

```
SUBROUTINE DATARead
USE DATASYSTEM
USE DATAScheme
IMPLICIT NONE
INTEGER :: I
REAL (KIND=8) :: F1
!*****
! INICIALIZACIÓN DE VARIABLES
!*****
H=0.0
DL=0.0
F1=0.0
OL=0.0
TMAX=0.0
INC=0.0
!*****
! LECTURA DE DATOS DEL SISTEMA
!*****
OPEN(UNIT=10, FILE='DATOS.TXT', STATUS='OLD')
READ(10,*) H
READ(10,*) DL
READ(10,*) F1
READ(10,*) OL
READ(10,*) TMAX
READ(10,*) INC
CLOSE(10)
TG=1.0-(OL/100.0)
TL=1.0
DT=TG+(DL-1.0)*TL
TA=TG-TL
!*****
! LECTURA DE DATOS DEL ESQUEMA
!*****
OPEN(UNIT=20, FILE='DATOS_ESQUEMA.TXT', STATUS='OLD')
READ(20,*) NSTP
ALLOCATE (F(NSTP+2), FSTP(NSTP+1), LS(NSTP))
F=0.0
F(1)=F1
FSTP=0.0
LS=0.0
DO I=1,NSTP
      READ(20,*) FSTP(I)
END DO
DO I=1,NSTP
      READ(20,*) LS(I)
END DO
CLOSE(20)
END SUBROUTINE DATARead
```

**g) Subrutina: Variación Frecuencia (DFreq)**

```
SUBROUTINE DFREQ
USE DATASYSTEM
USE DATAScheme
IMPLICIT NONE
INTEGER :: I
REAL (KIND=8) :: T,DF
REAL (KIND=8), DIMENSION (:), ALLOCATABLE :: FP
!*****
! INICIALIZACIÓN DE VARIABLES
!*****
ALLOCATE (FP(NSTP+1))
FP=0.0
21FORMAT(5X, 'FRECUENCIA', 2X, 'TIEMPO', 5X, 'TG', 7X, 'TL', 7X, 'TA',
6X, 'TLBLS', 5X, 'LSEQ'//)
22FORMAT(5X, F8.5, 4X, F6.3, 2X, F6.3, 3X, F6.3, 3X, F6.3, 3X, F6.3, 3X, F6.3, 3X, F6.3)
WRITE(35,21)
WRITE(35,22) F(1), AUXTIME,TG,TL,TA,TLBLS,LSEQ
DO I=1,NSTP+1
      T=T+INC
      AUXTIME=AUXTIME+INC
      FP(I) = (TA/DT) * (1.0-EXP((-DT) * (T) / (2.0*H)))
      DF=FP(I) * F(1)
      F(I+1)=F(I)+DF
      IF (F(I+1)<=FSTP(I)) THEN
            T=0.0
```

```

        TLBLS=TL*(1.0+(DL-1.0)*FP(I))
        LSEQ=(LS(I)/100.0)*(1.0+(DL-1.0)*FP(I))
        TL=TLBLS-LSEQ
        TG=TG*(1.0-FP(I))
        TA=TG-TL
        DT=TG+(DL-1.0)*TL
        WRITE(35,22) F(I+1),AUXTIME,TG,TL,TA,TLBLS,LSEQ
    ELSE
        DO WHILE (F(I+1)>FSTP(I))
            IF (AUXTIME<TMAX) THEN
                WRITE(35,22) F(I+1),AUXTIME,TG,TL
                    ,TA,TLBLS,LSEQ
                T=T+INC
                AUXTIME=AUXTIME+INC
                FP(I)=(TA/DT)*(1.0-EXP(-
                    DT*T/(2.0*H)))
                DF=FP(I)*F(1)
                F(I+1)=F(I)+DF
            ELSE
                PRINT *, 'EL TIEMPO DE
                    SIMULACION TERMINO'
            END IF
        END DO
        CLOSE (35)
        END SUBROUTINE DFREQ
    END PROGRAM

```

### D.3 EJEMPLO DE LA EJECUCIÓN DEL PROGRAMA QUE OPERA CON ESQUEMAS ESTÁTICOS DE TIRO DE CARGA

Para ejecutar el programa que utiliza esquemas estáticos de tiro de carga por baja frecuencia, es necesario crear dos archivos de texto con la información de entrada. El primer archivo debe tener el nombre: DATOS.TXT, el cual contendrá los datos del sistema, tales como inercia, amortiguamiento de carga y frecuencia nominal en Hertz; así mismo el porcentaje de sobrecarga visto por el sistema debido a una pérdida de generación y el tiempo máximo de simulación en segundos. El incremento de tiempo en el que será registrada la frecuencia también se indicará en segundos. Éstos datos se introducen en el orden que se aprecia en la Figura D.1.

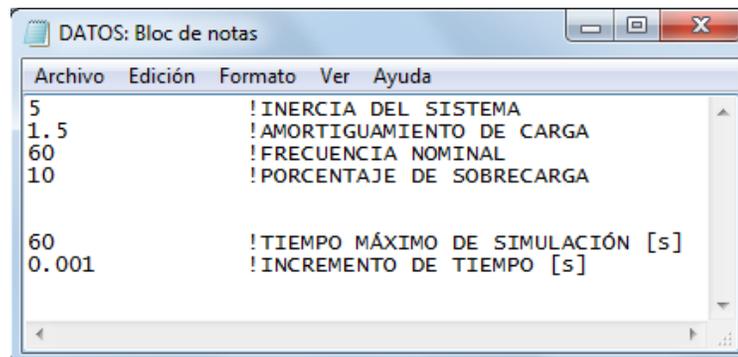


Figura D.1 Ejemplo del archivo DATOS.TXT para el programa de esquemas estáticos.

De acuerdo con la Figura D.1 se presenta una contingencia de 9.1% de pérdida de generación, la cual es vista por el sistema como una sobrecarga de 10%. El tiempo máximo de simulación es de 60 segundos y la frecuencia será registrada cada milisegundo.

El segundo archivo de entrada debe tener el nombre: DATOS\_ESQUEMA.TXT, mismo que necesita la información para la construcción del esquema estático de tiro de carga; es decir, número de pasos del esquema, frecuencias de disparo y porcentajes de desconexión de carga por paso como se observa en la Figura D.2.

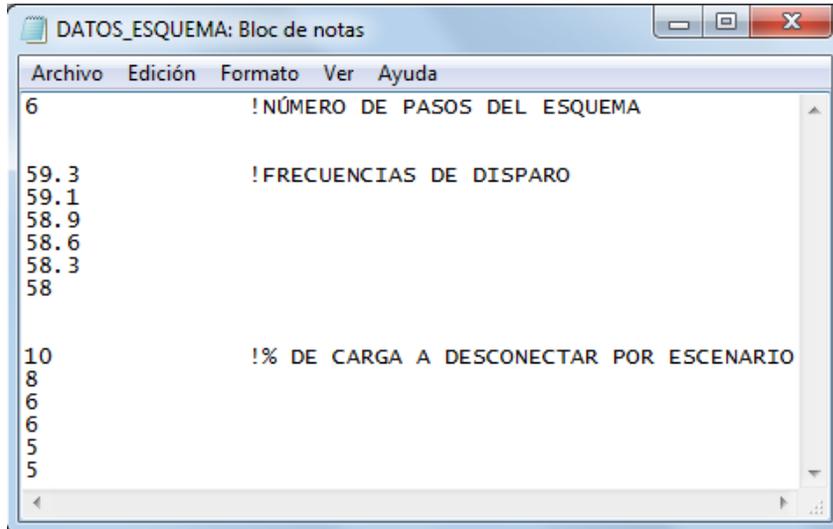


Figura D.2 Ejemplo del archivo DATOS\_ESQUEMA.TXT de un esquema estático de tiro de carga.

El esquema que se muestra en la Figura D.2 se compone de 6 pasos; en él se puede observar que la frecuencia inicial de disparo es de 59.3 Hz y que la carga a desconectar en el primer escenario es de 10%. Por lo tanto para la contingencia mostrada en el Figura D.1, la frecuencia debe recuperarse con un disparo del esquema.

Al ejecutar el programa con éstos dos archivos de entrada, se obtendrá un archivo de salida con el nombre RESULTADO.TXT como el que se muestra en la Figura D.3. En el archivo de salida se detalla el comportamiento de la frecuencia del sistema desde el momento en que ocurre el disturbio hasta que termina el tiempo de simulación. A través del tiempo se puede ver cómo varía la frecuencia, el par de generación, el par de carga, el par de aceleración, el par de carga justo antes de realizar el tiro de carga y la cantidad de carga tirada equivalente.

En el archivo de salida, la operación del esquema de tiro de carga se aprecia con los cambios de los pares del sistema, cuando la frecuencia alcanza el valor de la primera frecuencia de corte. En este archivo la frecuencia se expresa en Hertz, el tiempo en segundos y todos los pares del sistema y la carga tirada equivalente en pu. Si el esquema realiza varios disparos, éstos se aprecian con cada variación de los pares del sistema.

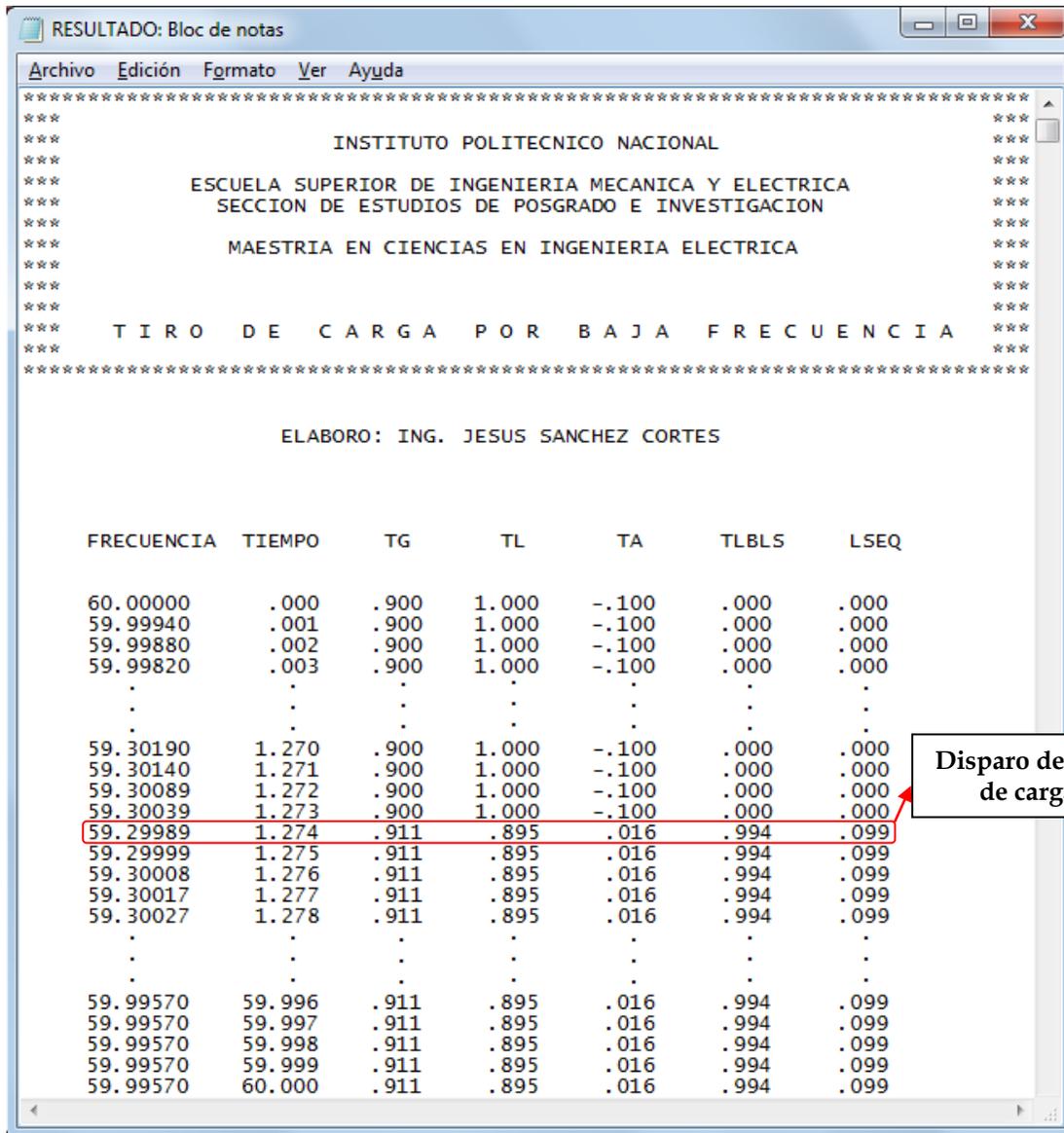


Figura D.3 Ejemplo del archivo de salida RESULTADO.TXT para una contingencia de 10% de sobrecarga.

#### D.4 PROGRAMA DEL DISEÑO DEL SISTEMA DE INFERENCIA DIFUSO

##### a) Nomenclatura Utilizada

!FREQ= Frecuencia de entrada al FIS  
 !DFREQ= Variación de frecuencia de entrada al FIS  
 !NMFF= Número de funciones de membresía de frecuencia.  
 !NMFDF= Número de funciones de membresía de variación de frecuencia.  
 !NMFLS= Número de funciones de membresía de tiro de carga.  
 !MFNAMEF= Nombre de las funciones de membresía de frecuencia.  
 !MFNAMEDF= Nombre de las funciones de membresía de cambio de frecuencia.

!MFNAMELS= Nombre de las funciones de membresía de tiro de carga.  
 !PNLTTF= Puntos de la función de membresía trapezoidal izquierda para difusificar frecuencia.  
 !PNTRTF= Puntos de la función de membresía trapezoidal derecha para difusificar frecuencia.  
 !PNLTDF= Puntos de la función de membresía trapezoidal izquierda para difusificar variación de frecuencia.  
 !PNTRDF= Puntos de la función de membresía trapezoidal derecha para difusificar variación de frecuencia.  
 !PNTTRF= Puntos de las funciones de membresía triangulares para difusificar frecuencia.  
 !PNTTRDF= Puntos de las funciones de membresía triangulares para difusificar variación de frecuencia.  
 !MF\_LEFT\_TRAP= Función de membresía trapezoidal izquierda.  
 !MF\_RIGHT\_TRAP= Función de membresía trapezoidal derecha.  
 !MF\_TRIANGLE= Función de membresía triangular.  
 !TRIANGF= Variable para determinar el número de funciones de membresía triangular para la frecuencia.

## Diseño de Esquemas de Tiro de Carga por Baja Frecuencia Utilizando Técnicas Inteligentes

```

!TRIANDF= Variable para determinar el número de funciones de
membresía triangular para variación de frecuencia.
!FUZZYF= Valores difusos de frecuencia.
!FUZZYDF= Valores difusos de variación de frecuencia.
!FUZZYLS= Valores difusos de tiro de carga.
!CRISPLS= Porcentaje nítido de tiro de carga.
!FREQUENCY= Posición de las funciones de membresía de
frecuencia disparadas en la difusificación.
!DFREQUENCY= Posición de las funciones de membresía de
variación de frecuencia disparadas en la
difusificación.
!LOADSHEDDING= Posición de las funciones de membresía de tiro
de carga (acciones de tiro de carga)disparadas
durante la evaluación de la base de reglas.
!COUNTER= Contador para realizar la inferencia.
!TRIPF= Grado de activación de las funciones de membresía de
frecuencia disparadas en la difusificación.
!TRIPDF= Grado de activación de las funciones de membresía de
variación de frecuencia disparadas en la
difusificación.
!TRIPLS= Grado de activación de las funciones de membresía de
tiro de carga disparadas en la evaluación de la base
reglas.
!STAGE= Porcentajes de tiro de carga para cada función de
membresía de salida.
!LS= Inferencia de tiro de carga mediante composición min.
!RB= Base de reglas.
!mDATA01= Módulo para la declaración de variables de entrada
al FIS.
!mDATA02= Módulo para la declaración de variables de salida
del FIS.
!FUZZYDATAREAD= Subrutina para leer los datos que requiere el
FIS.
!FUZZIFIER= Subrutina para la difusificación.
!RULE_BASE= Subrutina para la evaluación de la base de reglas
(mecanismo de inferencia).
;DEFUZZIFIER= Subrutina para la dedifusificación mediante el
método del centroide.
!RESULT= Subrutina para generar el archivo de salida con los
resultados del FIS.

```

### b) Programa Principal

```

PROGRAM FIS
IMPLICIT NONE
CALL FUZZYDATAREAD
CALL FUZZIFIER
CALL RULE_BASE
CALL DEFUZZIFIER
CALL RESULT
END PROGRAM FIS

```

### c) Módulo: Variables de Funciones de Membresía de Entrada (mData01)

```

MODULE mData01
IMPLICIT NONE
INTEGER :: NMFF,NMDF
REAL (KIND=8), DIMENSION (2) :: PNTLTF,PNTRTF,PNTLTF,PNTRTF
REAL (KIND=8), DIMENSION (:,:), ALLOCATABLE :: PNTTRF,PNTRDF
REAL (KIND=8), DIMENSION (:), ALLOCATABLE :: FUZZYF,FUZZYDF
REAL (KIND=8) :: DFREQ
END MODULE mData01

```

### d) Módulo: Variables de Funciones de Membresía de Salida (mData02)

```

MODULE mData02
IMPLICIT NONE
INTEGER :: A,B,C,NMFLS
REAL (KIND=8) :: CRISPLS
INTEGER, DIMENSION (:), ALLOCATABLE :: FREQUENCY,DFREQUENCY,
LOADSHEDDING,COUNTER
REAL (KIND=8), DIMENSION (:), ALLOCATABLE :: TRIPF,TRIPDF,
TRIPLS,FUZZYLS,STAGE
REAL (KIND=8), DIMENSION (:,:), ALLOCATABLE :: LS,RB
CHARACTER (LEN=30), DIMENSION (:), ALLOCATABLE :: MFNAMEF,
MFNAMEF,MFNAMELS
END MODULE mData02

```

### e) Función de Membresía Trapezoidal Izquierda

```

FUNCTION MF_LEFT_TRAP(X,Y)
IMPLICIT NONE
REAL (KIND=8) :: MF_LEFT_TRAP,X,A,B
REAL (KIND=8), DIMENSION(2) :: Y
A=Y(1)

```

```

B=Y(2)
IF(X<=A) THEN
MF_LEFT_TRAP=1.0
ELSE IF(X>A .AND. X<=B) THEN
MF_LEFT_TRAP=(B-X)/(B-A)
ELSE
MF_LEFT_TRAP=0.0
END IF
RETURN
END FUNCTION MF_LEFT_TRAP

```

### f) Función de Membresía Trapezoidal Derecha

```

FUNCTION MF_RIGHT_TRAP(X,Y)
IMPLICIT NONE
REAL (KIND=8) :: MF_RIGHT_TRAP,X,A,B
REAL (KIND=8), DIMENSION(2) :: Y
A=Y(1)
B=Y(2)
IF(X<A) THEN
MF_RIGHT_TRAP=0.0
ELSE IF(X>=A .AND. X<B) THEN
MF_RIGHT_TRAP=(X-A)/(B-A)
ELSE
MF_RIGHT_TRAP=1.0
END IF
RETURN
END FUNCTION MF_RIGHT_TRAP

```

### g) Función de Membresía Triangular

```

FUNCTION MF_TRIANGLE(X,Y)
IMPLICIT NONE
REAL (KIND=8) :: MF_TRIANGLE,X,A,B,C
REAL (KIND=8), DIMENSION(3) :: Y
A=Y(1)
B=Y(2)
C=Y(3)
IF(X>=A .AND. X<B) THEN
MF_TRIANGLE=(X-A)/(B-A)
ELSE IF(X>=B .AND. X<C) THEN
MF_TRIANGLE=(C-X)/(C-B)
ELSE
MF_TRIANGLE=0.0
END IF
RETURN
END FUNCTION MF_TRIANGLE

```

### h) Subrutina: Lectura de Datos (FuzzyDataRead)

```

SUBROUTINE FUZZYDATAREAD
USE DATASYSYSTEM
USE mData01
USE mData02
IMPLICIT NONE
INTEGER :: I,J,TRIANF,TRIANDF
! *****
! INICIALIZACION DE VARIABLES
! *****
NMFF=0
NMDF=0
TRIANF=0
TRIANDF=0
OPEN (UNIT=60, FILE='MF_POINTS.TXT', STATUS='OLD')
READ (60,*) NMFF
READ (60,*) NMDF
TRIANF=NMFF-2
TRIANDF=NMDF-2
ALLOCATE (PNTTRF (TRIANF, 3), PNTRDF (TRIANDF, 3), MFNAMEF (NMFF), MF
NAMEF (NMDF))
PNTLTF=0.0
PNTTRF=0.0
PNTRTF=0.0
PNTLTF=0.0
PNTRDF=0.0
PNTRTF=0.0
DO I=1,NMFF
READ (60,*) MFNAMEF (I)
END DO
DO I=1,NMDF
READ (60,*) MFNAMEF (I)
END DO
! *****
! CONSTRUCCIÓN DE LAS FUNCIONES DE MEMBRESÍA F
! *****
DO I=1,3
IF (I==1) THEN
DO J=1,2

```

```

                READ(60,*) PNTLTF(J)
            END DO
        ELSE IF(I==2) THEN
            DO J=1,TRIANF
                READ(60,*) PNTTRF(J,1:3)
            END DO
        ELSE
            DO J=1,2
                READ(60,*) PNTRTF(J)
            END DO
        END IF
    END DO
!*****
! CONSTRUCCIÓN DE LAS FUNCIONES DE MEMBRESÍA DF
!*****
DO I=1,3
    IF(I==1) THEN
        DO J=1,2
            READ(60,*) PNTLTF(J)
        END DO
    ELSE IF(I==2) THEN
        DO J=1,TRIANF
            READ(60,*) PNTTRDF(J,1:3)
        END DO
    ELSE
        DO J=1,2
            READ(60,*) PNTRTF(J)
        END DO
    END IF
END DO
CLOSE(60)
!*****
! LECTURA DE % DE TIRO POR VARIABLE LINGÜÍSTICA
!*****
NMFLS=0
OPEN(UNIT=50,FILE='LOAD_SHEDDING.TXT',STATUS='OLD')
READ(50,*) NMFLS
ALLOCATE(STAGE(NMFLS),FUZZYLS(NMFLS),LS(NMFLS,NMFLS),COUNTER(
NMFLS),MNAMELS(NMFLS))
DO I=1,NMFLS
    READ(50,*) MNAMELS(I)
END DO
STAGE=0.0
DO I=2,NMFLS
    READ(50,*) STAGE(I)
END DO
CLOSE(50)
OPEN(UNIT=500,FILE='RULE_BASE.TXT',STATUS='OLD')
ALLOCATE(RB(NMDF,NMFF))
DO I=1,NMDF
    READ(500,*) (RB(I,J),J=1,NMFF)
END DO
CLOSE(500)
END SUBROUTINE FUZZYDATAREAD

```

#### i) Subrutina: Difusificador (*Fuzzifier*)

```

SUBROUTINE FUZZIFIER
USE DATASYSTEM
USE mDATA01
USE mDATA02
IMPLICIT NONE
INTEGER :: I,J
REAL(KIND=8) :: MF_LEFT_TRAP,MF_TRIANGLE,MF_RIGHT_TRAP
REAL(KIND=8),DIMENSION(3) :: AUX
!*****
! INICIALIZACIÓN DE VARIABLES
!*****
A=0
B=0
AUX=0.0
ALLOCATE(FUZZYF(NMFF),FUZZYDF(NMDF))
FUZZYF=0.0
FUZZYDF=0.0
!*****
! DIFUSIFICACIÓN DE LA FRECUENCIA
!*****
DO I=1,NMFF
    IF(I==1) THEN
        FUZZYF(I)=MF_LEFT_TRAP(FREQ,PNTLTF)
    ELSE IF(I==NMFF) THEN
        FUZZYF(I)=MF_RIGHT_TRAP(FREQ,PNTRTF)
    ELSE
        DO J=1,3
            AUX(J)=PNTTRF(I-1,J)
        END DO
        FUZZYF(I)=MF_TRIANGLE(FREQ,AUX)
    END IF
END DO
!*****
! DIFUSIFICACIÓN DEL CAMBIO DE FRECUENCIA
!*****
DO I=1,NMDF

```

```

        IF(I==1) THEN
            FUZZYDF(I)=MF_LEFT_TRAP(DFREQ,PNTLTF)
        ELSE IF(I==NMDF) THEN
            FUZZYDF(I)=MF_RIGHT_TRAP(DFREQ,PNTRTF)
        ELSE
            DO J=1,3
                AUX(J)=PNTRDF(I-1,J)
            END DO
            FUZZYDF(I)=MF_TRIANGLE(DFREQ,AUX)
        END IF
    END DO
!*****
! FUNCIONES DE MEMBRESÍA DISPARADAS F Y DF
!*****
ALLOCATE(TRIPF(NMFF),FREQUENCY(NMFF),TRIPDF(NMDF),DFREQUENCY
(NMDF))
FREQUENCY=0
DFREQUENCY=0
TRIPF=0.0
TRIPDF=0.0
DO I=1,NMFF
    IF(FUZZYF(I).NE.0.0) THEN
        A=A+1
        TRIPF(A)=FUZZYF(I)
        FREQUENCY(A)=I
    END IF
END DO
DO I=1,NMDF
    IF(FUZZYDF(I).NE.0.0) THEN
        B=B+1
        TRIPDF(B)=FUZZYDF(I)
        DFREQUENCY(B)=I
    END IF
END DO
END SUBROUTINE FUZZIFIER

```

#### j) Subrutina: Base de Reglas (*Rule\_Base*)

```

SUBROUTINE RULE_BASE
USE DATASYSTEM
USE mDATA01
USE mDATA02
IMPLICIT NONE
INTEGER :: I,J
!*****
! INICIALIZACIÓN DE VARIABLES
!*****
C=0
COUNTER=0
FUZZYLS=0.0
LS=0.0
!*****
! MECANISMO DE INFERENCIA
! (EVALUACION DE BASE DE REGLAS)
!*****
DO I=1,A
    DO J=1,B
        COUNTER(RB(DFREQUENCY(J),FREQUENCY(I)))=COUNTER(RB(DF
REQUENCY(J),FREQUENCY(I)))+1
        LS(RB(DFREQUENCY(J),FREQUENCY(I)),COUNTER(RB(DFREQUEN
CY(J),FREQUENCY(I))))=MIN(TRIPF(I),TRIPDF(J))
    END DO
END DO
!*****
! FUNCIONES DE MEMBRESÍA DISPARADAS LS
!*****
DO I=1,NMFLS
    FUZZYLS(I)=MAXVAL(LS(I,1:NMFLS))
END DO
ALLOCATE(TRIPLS(NMFLS),LOADSHEDDING(NMFLS))
C=0
LOADSHEDDING=0.0
TRIPLS=0.0
DO I=1,NMFLS
    IF(FUZZYLS(I).NE.0.0) THEN
        C=C+1
        TRIPLS(C)=FUZZYLS(I)
        LOADSHEDDING(C)=I
    END IF
END DO
END SUBROUTINE RULE_BASE

```

#### k) Subrutina: Dedifusificador (*Defuzzifier*)

```

SUBROUTINE DEFUZZIFIER
USE DATASYSTEM
USE mDATA01
USE mDATA02
IMPLICIT NONE

```

## Diseño de Esquemas de Tiro de Carga por Baja Frecuencia Utilizando Técnicas Inteligentes

```

INTEGER :: I
REAL (KIND=8) :: SUM1,SUM2
!*****
! DEDIFUSIFICACIÓN (CENTROIDE)
!*****
SUM1=0.0
SUM2=0.0
CRISPLS=0.0
DO I=1,NMFLS
    SUM1=SUM1+(FUZZYLS(I)*STAGE(I))
    SUM2=SUM2+FUZZYLS(I)
END DO
CRISPLS=(SUM1/SUM2)
END SUBROUTINE DEFUZZIFIER
    
```

### 1) Subrutina: Resultado (Result)

```

SUBROUTINE RESULT
USE DATASYSTEM
USE mDATA01
USE mDATA02
IMPLICIT NONE
INTEGER :: I
OPEN(UNIT=75, FILE='RESULTADOFIS.TXT', STATUS='NEW')
80 FORMAT('*****',//,&
&'***          INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL          ***',//,&
&'***          ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA***',//,&
&'*** SECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACION***',//,&
&'*** MAESTRIA EN CIENCIAS EN INGENIERIA ELECTRICA ***',//,&
&'***          SISTEMA DE INFERENCIA DIFUSO          ***',//,&
&'***** ELABORO: ING. JESUS SANCHEZ CORTES',//)
WRITE(75,80)
90FORMAT(////,'*****',//,&
&'***          D A T O S          ***',//,&
&'*****',//)
91 FORMAT (5X,'FRECUENCIA NOMINAL:',2X,F5.2,/,5X,'FRECUENCIA
DE DISTURBIO:',2X,F5.2,/,5X,'VARIACION DE FRECUENCIA
:',2X,F7.3,////)
92 FORMAT(////,'*****',//,&
&'***          D I F U S I F I C A C I O N          ***',//,&
&'*****',//,&
&'***          FRECUENCIA DIFUSA:',//)
93 FORMAT(10X,F6.3,/)
94 FORMAT(/,5X,'VARIACION DE FRECUENCIA DIFUSA:',//)
WRITE(75,90)
WRITE(75,91) F1,FREQ,DFREQ
WRITE(75,92)
DO I=1,NMFF
    WRITE(75,93) FUZZYF(I)
END DO
WRITE(75,94)
DO I=1,NMDFD
    WRITE(75,93) FUZZYDF(I)
END DO
96 FORMAT(//,5X,'FUNCIONES ACTIVADAS EN FRECUENCIA
DIFUSA:',//)
97 FORMAT(5X,A30,2X,'CON',2X,F6.3,2X,'GRADOS DE MEMBRESIA',/)
98 FORMAT(//,5X,'FUNCIONES ACTIVADAS EN VARIACION DE
FRECUENCIA DIFUSA:',//)
WRITE(75,96)
DO I=1,A
    WRITE(75,97) MFNAMEF(FREQUENCY(I)),TRIPF(I)
END DO
WRITE(75,98)
DO I=1,B
    WRITE(75,97) MFNAMEDF(DFREQUENCY(I)),TRIPDF(I)
END DO
99 FORMAT(////,'*****',//,&
&'***          B A S E D E R E G L A S          ***',//,&
&'*****',//,&
&'***          ACCIONES DE TIRO DE CARGA:',//)
100 FORMAT(10X,F6.3)
WRITE(75,99)
DO I=1,NMFLS
    WRITE(75,100) FUZZYLS(I)
END DO
101 FORMAT(//,5X,'FUNCIONES ACTIVADAS PARA ACCION DE TIRO DE
CARGA:',//)
WRITE(75,101)
DO I=1,C
    WRITE(75,97) MFNAMELS(LOADSHEDDING(I)),TRIPLS(I)
END DO
102 FORMAT(////,'*****',//,&
&'***          D E D I F U S I F I C A C I O N          ***',//,&
&'*****',//)
    
```

```

&'***          LA CANTIDAD DE CARGA RECOMENDABLE A TIRAR
ES:',2X,F6.2,'%')
WRITE(75,102) CRISPLS
CLOSE(75)
END SUBROUTINE RESULT
    
```

## D.5 PROGRAMA DEL COMPORTAMIENTO DE LA FRECUENCIA UTILIZANDO ESQUEMAS DIFUSOS DE TIRO DE CARGA

### a) Nomenclatura Utilizada

```

!H= Inercial del sistema.
!DL= Factor de amortiguamiento de carga.
!OL= Nivel de sobrecarga visto por el sistema debido a
pérdida de generación.
!TG= Par de generación.
!TL= Par de carga.
!TA= Par de aceleración del sistema.
!DT= Factor de amortiguamiento total.
!F1= Frecuencia nominal (60 Hz).
!F= Vector de frecuencias del sistema.
!DF= Variación de frecuencia en Hz.
!FP= Vector para la variación de frecuencia en pu.
!TMAX= Tiempo máximo de simulación.
!INC= Incremento de tiempo.
!TIME= Vector para medir al tiempo total simulado.
!AUXTIME= Variable para medir el tiempo hasta un corte de
carga.
!TLBLS= Par de carga antes del tiro de carga.
!LSEQ= Carga tirada equivalente.
!FSTP= Frecuencia de paso.
!LS= Vector para almacenar los porcentajes de tiro de carga
por paso.
!FREQ= Frecuencia de entrada al FIS
!DFREQ= Variación de frecuencia de entrada al FIS
!NMFF= Número de funciones de membresía de frecuencia.
!NMDFD= Número de funciones de membresía de variación de
frecuencia.
!NMFLS= Número de funciones de membresía de tiro de carga.
!MFNAMEF= Nombre de las funciones de membresía de frecuencia.
!MFNAMEDF= Nombre de las funciones de membresía de cambio de
frecuencia.
!MFNAMELS= Nombre de las funciones de membresía de tiro de
carga.
!PNLTTF= Puntos de la función de membresía trapezoidal
izquierda para difusificar frecuencia.
!PNTRTF= Puntos de la función de membresía trapezoidal
derecha para difusificar frecuencia.
!PNLTDF= Puntos de la función de membresía trapezoidal
izquierda para difusificar variación de frecuencia.
!PNTRDF= Puntos de la función de membresía trapezoidal
derecha para difusificar variación de frecuencia.
!PNTRF= Puntos de las funciones de membresía triangulares
para difusificar frecuencia.
!PNTRDF= Puntos de las funciones de membresía triangulares
para difusificar variación de frecuencia.
!MF_LEFT_TRAP= Función de membresía trapezoidal izquierda.
!MF_RIGHT_TRAP= Función de membresía trapezoidal derecha.
!MF_TRIANGLE= Función de membresía triangular.
!TRIANF= Variable para determinar el número de funciones de
membresía triangular para la frecuencia.
!TRIANDF= Variable para determinar el número de funciones de
membresía triangular para variación de frecuencia.
!FUZZYF= Valores difusos de frecuencia.
!FUZZYDF= Valores difusos de variación de frecuencia.
!FUZZYLS= Valores difusos de tiro de carga.
!CRISPLS= Porcentaje nítido de tiro de carga.
!FREQUENCY= Posición de las funciones de membresía de
frecuencia disparadas en la difusificación.
!DFREQUENCY= Posición de las funciones de membresía de
variación de frecuencia disparadas en la
difusificación.
!LOADSHEDDING= Posición de las funciones de membresía de tiro
de carga (acciones de tiro de carga)disparadas
durante la evaluación de la base de reglas.
!COUNTER= Contador para realizar la inferencia.
!TRIPF= Grado de activación de las funciones de membresía de
frecuencia disparadas en la difusificación.
!TRIPDF= Grado de activación de las funciones de membresía de
variación de frecuencia disparadas en la
difusificación.
!TRIPLS= Grado de activación de las funciones de membresía de
tiro de carga disparadas en la evaluación de la base
reglas.
    
```

```
!STAGE= Porcentajes de tiro de carga para cada función de
      membresía de salida.
!LS= Inferencia de tiro de carga mediante composición min.
!RB= Base de reglas.
!mDATA01= Módulo para la declaración de variables de entrada
      al FIS.
!mDATA02= Módulo para la declaración de variables de salida
      del FIS.
!FUZZYDATAREAD= Subrutina para leer los datos que requiere el
      FIS.
!FUZZIFIER= Subrutina para la difusificación.
!RULE_BASE= Subrutina para la evaluación de la base de reglas
      (mecanismo de inferencia).
!DEFUZZIFIER= Subrutina para la defusificación mediante el
      método del centroide.
!RESULT= Subrutina para generar el archivo de salida con los
      resultados del FIS.
```

#### b) Programa Principal

```
PROGRAM LOADSHEDDING
IMPLICIT NONE
CALL LETRERO
CALL DATAREAD
CALL DELTAFREQ
END PROGRAM LOADSHEDDING
```

#### c) Módulo: Variables del Sistema (DataSystem)

```
MODULE DATASYSTEM
IMPLICIT NONE
INTEGER :: FLAG
REAL (KIND=8) ::
H, DL, OL, TG, TL, TA, DT, F1, FREQ, TLBLS, LSEQ, TMAX, INC, AUXTIME, FINIC
REAL (KIND=8), DIMENSION (:), ALLOCATABLE :: F
END MODULE DATASYSTEM
```

#### d) Módulo: Variables de Funciones de Membresía de Entrada (mData01)

```
MODULE mData01
IMPLICIT NONE
INTEGER :: NMFF, NMFFD
REAL (KIND=8), DIMENSION (2) :: PNTLTF, PNTRTF, PNTLTFD, PNTRTFD
REAL (KIND=8), DIMENSION (:,:), ALLOCATABLE :: PNTRTF, PNTRTFD
REAL (KIND=8), DIMENSION (:), ALLOCATABLE :: FUZZYF, FUZZYDF
REAL (KIND=8) :: DFREQ
END MODULE mData01
```

#### e) Módulo: Variables de Funciones de Membresía de Salida (mData02)

```
MODULE mData02
IMPLICIT NONE
INTEGER :: A, B, C, NMFLS
REAL (KIND=8) :: CRISPLS
INTEGER, DIMENSION (:), ALLOCATABLE :: FREQUENCY, DFREQUENCY,
LOADSHEDDING, COUNTER
REAL (KIND=8), DIMENSION (:), ALLOCATABLE :: TRIPF, TRIPDF,
TRIPLS, FUZZYLS, STAGE
REAL (KIND=8), DIMENSION (:,:), ALLOCATABLE :: LS, RB
CHARACTER (LEN=30), DIMENSION (:), ALLOCATABLE :: MFNAMEF,
MFNAMEFS
END MODULE mData02
```

#### f) Función de Membresía Trapezoidal Izquierda

```
FUNCTION MF_LEFT_TRAP(X,Y)
IMPLICIT NONE
REAL (KIND=8) :: MF_LEFT_TRAP, X, A, B
REAL (KIND=8), DIMENSION(2) :: Y
A=Y(1)
B=Y(2)
IF (X<=A) THEN
  MF_LEFT_TRAP=1.0
ELSE IF (X>A .AND. X<=B) THEN
  MF_LEFT_TRAP=(B-X)/(B-A)
ELSE
  MF_LEFT_TRAP=0.0
END IF
RETURN
END FUNCTION MF_LEFT_TRAP
```

#### g) Función de Membresía Trapezoidal Derecha

```
FUNCTION MF_RIGHT_TRAP(X,Y)
IMPLICIT NONE
REAL (KIND=8) :: MF_RIGHT_TRAP, X, A, B
REAL (KIND=8), DIMENSION(2) :: Y
A=Y(1)
B=Y(2)
IF (X<A) THEN
  MF_RIGHT_TRAP=0.0
ELSE IF (X>=A .AND. X<B) THEN
  MF_RIGHT_TRAP=(X-A)/(B-A)
ELSE
  MF_RIGHT_TRAP=1.0
END IF
RETURN
END FUNCTION MF_RIGHT_TRAP
```

#### h) Función de Membresía Triangular

```
FUNCTION MF_TRIANGLE(X,Y)
IMPLICIT NONE
REAL (KIND=8) :: MF_TRIANGLE, X, A, B, C
REAL (KIND=8), DIMENSION(3) :: Y
A=Y(1)
B=Y(2)
C=Y(3)
IF (X>=A .AND. X<B) THEN
  MF_TRIANGLE=(X-A)/(B-A)
ELSE IF (X>=B .AND. X<=C) THEN
  MF_TRIANGLE=(C-X)/(C-B)
ELSE
  MF_TRIANGLE=0.0
END IF
RETURN
END FUNCTION MF_TRIANGLE
```

#### i) Subrutina: Letrero

```
SUBROUTINE LETRERO
OPEN(UNIT=35, FILE='RESULTADO.TXT', STATUS='NEW')
20 FORMAT('*****',/, &
&'***',/, &
&'*** INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL ***',/, &
&'***',/, &
&'* ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA*',/, &
&'*** SECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACION***',/, &
&'***',/, &
&'*** MAESTRIA EN CIENCIAS EN INGENIERIA ELECTRICA ***',/, &
&'***',/, &
&'***',/, &
&'***',/, &
&'*** PROGRAM DE TIRO DE CARGA DIFUSO ***',/, &
&'***',/, &
&'***** ELABORO: ING. JESUS SANCHEZ CORTES',/, &
&'
WRITE(35,20)
END SUBROUTINE LETRERO
```

#### j) Subrutina: Lectura de Datos del Sistema (DataRead)

```
SUBROUTINE DATAREAD
USE DATASYSTEM
IMPLICIT NONE
!*****
! INICIALIZACION DE VARIABLES
!*****
H=0.0
DL=0.0
F1=0.0
OL=0.0
TMAX=0.0
INC=0.0
TG=0.0
TL=0.0
DT=0.0
TA=0.0

!*****
! LECTURA DE DATOS DEL SISTEMA
!*****
OPEN(UNIT=10, FILE='DATOS.TXT', STATUS='OLD')
READ(10,*) H
READ(10,*) DL
READ(10,*) F1
```

## Diseño de Esquemas de Tiro de Carga por Baja Frecuencia Utilizando Técnicas Inteligentes

```

READ(10,*) OL
READ(10,*) TMAX
READ(10,*) INC
READ(10,*) FINIC
CLOSE(10)
TG=1.0-(OL/100.0)
TL=1.0
DT=TG+(DL-1.0)*TL
TA=TG-TL
END SUBROUTINE DATAREAD

```

### k) Subrutina: Variación de Frecuencia (DeltaFreq)

```

SUBROUTINE DELTAFREQ
USE DATASYSYSTEM
USE mDATA01
USE mDATA02
IMPLICIT NONE
INTEGER :: I, TIME
REAL (KIND=8) :: DF
REAL (KIND=8), DIMENSION (:), ALLOCATABLE :: FP, T
!*****
! INICIALIZACION DE VARIABLES
!*****
TIME=TMAX/INC
ALLOCATE (T (TIME+1), FP (TIME+1), F (TIME+1))
FLAG=0
DF=0.0
T=0.0
FP=0.0
F=0.0
F(1)=F1
DO I=2, TIME+1
    T(I)=T(I-1)+INC
END DO
!*****
! CALCULO DE LA VARIACION DE FRECUENCIA
! Y TIRO DE CARGA MEDIANTE FIS
!*****
21 FORMAT (5X, 'FRECUENCIA', 2X, 'TIEMPO', 5X, 'TG', 7X, 'TL', 7X,
'TA', 6X, 'TLBLS', 5X, 'LSEQ'//)
22 FORMAT (5X, F8.5, 4X, F6.3, 2X, F6.3, 3X, F6.3, 3X, F6.3, 3X, F6.3, 3X,
F6.3)
WRITE (35, 21)
WRITE (35, 22) F(1), T(1), TG, TL, TA, TLBLS, LSEQ
DO I=1, TIME
    AUXTIME=AUXTIME+INC
    FP(I)=(TA/DT)*(1.0-EXP((-DT)*AUXTIME/(2.0*H)))
    DF=FP(I)*F1
    F(I+1)=F(I)+DF
    IF (F(I+1)-F(I)<=0.0 .AND. F(I+1)<=FINIC) THEN
        DFREQ=F(I+1)-F(I)
        FREQ=F(I+1)
        F(1)=F(I+1)
        FLAG=FLAG+1
        IF (FLAG==1) THEN
            CALL FUZZYDATAREAD
        END IF
        CALL FUZZIFIER
        CALL RULE BASE
        CALL DEFUZZIFIER
        CALL RESULT
        PRINT *, 'TIRO DE CARGA=', CRISPLS
        PAUSE
        AUXTIME=0.0
        TLBLS=TL*(1.0+(DL-1.0)*FP(I))
        LSEQ=(CRISPLS/100.0)*(1.0+(DL-1.0)*FP(I))
        TL=TLBLS-LSEQ
        TG=TG*(1.0-FP(I))
        TA=TG-TL
        DT=TG+(DL-1.0)*TL
        WRITE (35, 22)
    F(I+1), T(I+1), TG, TL, TA, TLBLS, LSEQ
    ELSE
        WRITE (35, 22)
    F(I+1), T(I+1), TG, TL, TA, TLBLS, LSEQ
    END IF
END DO
CLOSE (35)
END SUBROUTINE DELTAFREQ

```

### l) Subrutina: Lectura de Datos para FIS (FuzzyDataRead)

```

SUBROUTINE FUZZYDATAREAD
USE DATASYSYSTEM
USE mDATA01
USE mDATA02
IMPLICIT NONE

```

```

INTEGER :: I, J, TRIANF, TRIANDF
!*****
! INICIALIZACION DE VARIABLES
!*****
NMFF=0
NMDF=0
TRIANF=0
TRIANDF=0
OPEN (UNIT=60, FILE='MF_POINTS.TXT', STATUS='OLD')
READ (60, *) NMFF
READ (60, *) NMDF
TRIANF=NMFF-2
TRIANDF=NMDF-2
ALLOCATE (PNTRF (TRIANF, 3), PNTRDF (TRIANDF, 3), MFNAMEF (NMFF), MF
NAMEDF (NMDF))
PNLTF=0.0
PNTRF=0.0
PNTRDF=0.0
PNLTFDF=0.0
PNTRDF=0.0
PNTRDF=0.0
DO I=1, NMFF
    READ (60, *) MFNAMEF(I)
END DO
DO I=1, NMDF
    READ (60, *) MFNAMEDF(I)
END DO
!*****
! CONSTRUCCION DE LAS FUNCIONES DE MEMBRESIA F
!*****
DO I=1, 3
    IF (I==1) THEN
        DO J=1, 2
            READ (60, *) PNLTF(J)
        END DO
    ELSE IF (I==2) THEN
        DO J=1, TRIANF
            READ (60, *) PNTRF(J, 1:3)
        END DO
    ELSE
        DO J=1, 2
            READ (60, *) PNTRF(J)
        END DO
    END IF
END DO
!*****
! CONSTRUCCION DE LAS FUNCIONES DE MEMBRESIA DF
!*****
DO I=1, 3
    IF (I==1) THEN
        DO J=1, 2
            READ (60, *) PNLTFDF(J)
        END DO
    ELSE IF (I==2) THEN
        DO J=1, TRIANDF
            READ (60, *) PNTRDF(J, 1:3)
        END DO
    ELSE
        DO J=1, 2
            READ (60, *) PNTRDF(J)
        END DO
    END IF
END DO
CLOSE (60)
!*****
! LECTURA DE % DE TIRO POR VARIABLE LINGÜISTICA
!*****
NMFLS=0
OPEN (UNIT=50, FILE='LOAD_SHEDDING.TXT', STATUS='OLD')
READ (50, *) NMFLS
ALLOCATE (STAGE (NMFLS), FUZZYLS (NMFLS), LS (NMFLS, NMFLS), COUNTER (
NMFLS), MFNAMELS (NMFLS))
DO I=1, NMFLS
    READ (50, *) MFNAMELS(I)
END DO
STAGE=0.0
DO I=2, NMFLS
    READ (50, *) STAGE(I)
END DO
CLOSE (50)
OPEN (UNIT=500, FILE='RULE_BASE.TXT', STATUS='OLD')
ALLOCATE (RB (NMDF, NMFF))
DO I=1, NMDF
    READ (500, *) (RB(I, J), J=1, NMFF)
END DO
CLOSE (500)
END SUBROUTINE FUZZYDATAREAD

```

### m) Subrutina: Difusificador (Fuzzifier)

```

SUBROUTINE FUZZIFIER
USE DATASYSYSTEM
USE mDATA01
USE mDATA02

```

```

IMPLICIT NONE
INTEGER :: I,J
REAL (KIND=8) :: MF_LEFT_TRAP,MF_TRIANGLE,MF_RIGHT_TRAP
REAL (KIND=8), DIMENSION (3) :: AUX
!*****
! INICIALIZACIÓN DE VARIABLES
!*****
A=0
B=0
AUX=0.0
IF (FLAG==1) THEN
    ALLOCATE (FUZZYF(NMFF),FUZZYDF(NMFF))
END IF
FUZZYF=0.0
FUZZYDF=0.0
!*****
! DIFUSIFICACIÓN DE LA FRECUENCIA
!*****
DO I=1,NMFF
    IF(I==1) THEN
        FUZZYF(I)=MF_LEFT_TRAP(FREQ,PNTLTF)
    ELSE IF(I==NMFF) THEN
        FUZZYF(I)=MF_RIGHT_TRAP(FREQ,PNTRTF)
    ELSE
        DO J=1,3
            AUX(J)=PNTTRF(I-1,J)
        END DO
        FUZZYF(I)=MF_TRIANGLE(FREQ,AUX)
    END IF
END DO
!*****
! DIFUSIFICACIÓN DEL CAMBIO DE FRECUENCIA
!*****
DO I=1,NMFF
    IF(I==1) THEN
        FUZZYDF(I)=MF_LEFT_TRAP(DFREQ,PNTLDF)
    ELSE IF(I==NMFF) THEN
        FUZZYDF(I)=MF_RIGHT_TRAP(DFREQ,PNTRDF)
    ELSE
        DO J=1,3
            AUX(J)=PNTTRDF(I-1,J)
        END DO
        FUZZYDF(I)=MF_TRIANGLE(DFREQ,AUX)
    END IF
END DO
!*****
! FUNCIONES DE MEMBRESÍA DISPARADAS F Y DF
!*****
IF (FLAG==1) THEN
    ALLOCATE (TRIPF(NMFF),FREQUENCY(NMFF),TRIPDF(NMFF),DF
REQUENCY(NMFF))
END IF
FREQUENCY=0
DFREQUENCY=0
TRIPF=0.0
TRIPDF=0.0
DO I=1,NMFF
    IF (FUZZYF(I) .NE. 0.0) THEN
        A=A+1
        TRIPF(A)=FUZZYF(I)
        FREQUENCY(A)=I
    END IF
END DO
DO I=1,NMFF
    IF (FUZZYDF(I) .NE. 0.0) THEN
        B=B+1
        TRIPDF(B)=FUZZYDF(I)
        DFREQUENCY(B)=I
    END IF
END DO
END SUBROUTINE FUZZIFIER

```

#### n) Subrutina: Base de Reglas (Rule\_Base)

```

SUBROUTINE RULE_BASE
USE DATASYSTEM
USE mDATA01
USE mDATA02
IMPLICIT NONE
INTEGER :: I,J
!*****
! INICIALIZACIÓN DE VARIABLES
!*****
C=0
COUNTER=0
FUZZYLS=0.0
LS=0.0
!*****
! MECANISMO DE INFERENCIA
! (EVALUACION DE BASE DE REGLAS)
!*****
DO I=1,A
    DO J=1,B

```

```

        COUNTER(RB(DFREQUENCY(J),FREQUENCY(I)))=COUNTER(RB(DF
REQUENCY(J),FREQUENCY(I)))+1
        LS(RB(DFREQUENCY(J),FREQUENCY(I)),COUNTER(RB(DFREQUEN
CY(J),FREQUENCY(I)))=MIN(TRIPF(I),TRIPDF(J))
    END DO
END DO
!*****
! FUNCIONES DE MEMBRESÍA DISPARADAS LS
!*****
DO I=1,NMFLS
    FUZZYLS(I)=MAXVAL (LS(I,1:NMFLS))
END DO
IF (FLAG==1) THEN
    ALLOCATE (TRIPLS(NMFLS),LOADSHEDDING(NMFLS))
END IF
C=0
LOADSHEDDING=0.0
TRIPLS=0.0
DO I=1,NMFLS
    IF (FUZZYLS(I) .NE. 0.0) THEN
        C=C+1
        TRIPLS(C)=FUZZYLS(I)
        LOADSHEDDING(C)=I
    END IF
END DO
END SUBROUTINE RULE_BASE

```

#### o) Subrutina: Dedifusificador (Defuzzifier)

```

SUBROUTINE DEFUZZIFIER
USE DATASYSTEM
USE mDATA01
USE mDATA02
IMPLICIT NONE
INTEGER :: I
REAL (KIND=8) :: SUM1,SUM2
!*****
! DEDIFUSIFICACIÓN (CENTROIDE)
!*****
SUM1=0.0
SUM2=0.0
CRISPLS=0.0
DO I=1,NMFLS
    SUM1=SUM1+(FUZZYLS(I)*STAGE(I))
    SUM2=SUM2+FUZZYLS(I)
END DO
CRISPLS=(SUM1/SUM2)
END SUBROUTINE DEFUZZIFIER

```

#### p) Subrutina: Resultado (Result)

```

SUBROUTINE RESULT
USE DATASYSTEM
USE mDATA01
USE mDATA02
IMPLICIT NONE
INTEGER :: I
OPEN(UNIT=75, FILE='RESULTADOFIS.TXT', STATUS='NEW')
80 FORMAT('*****',/, &
&'***',/, &
&'*** INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL ***',/, &
&'***',/, &
&'* ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA*',/, &
&'*** SECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACION***',/, &
&'***',/, &
&'*** MAESTRIA EN CIENCIAS EN INGENIERIA ELECTRICA ***',/, &
&'***',/, &
&'***',/, &
&'***',/, &
&'*** SISTEMA DE INFERENCIA DIFUSO ***',/, &
&'***',/, &
&'*****',/, &
&' ELABORO: ING. JESUS SANCHEZ CORTES',///)
WRITE(75,80)
90FORMAT(////, '*****',/, &
&'*** D A T O S ***',/, &
&'*****',/)
91 FORMAT(5X, 'FRECUENCIA NOMINAL:',2X,F5.2,/,5X, 'FRECUENCIA
DE
DISTURBIO:',2X,F5.2,/,5X, 'VARIACION DE
FRECUENCIA
:',2X,F7.3,////)
92 FORMAT(////, '*****',/, &
&'*** D I F U S I F I C A C I O N ***',/, &
&'*****',/, &
&'//,5X, 'FRECUENCIA DIFUSA:',/)
93 FORMAT(10X,F6.3,/)
94 FORMAT(/,5X, 'VARIACION DE FRECUENCIA DIFUSA:',/)
WRITE(75,90)
WRITE(75,91)F1,FREQ,DFREQ
WRITE(75,92)

```

```

DO I=1,NMFF
  WRITE (75,93) FUZZYF(I)
END DO
WRITE (75,94)
DO I=1,NMDFD
  WRITE (75,93) FUZZYDF(I)
END DO
96  FORMAT (//,5X,'FUNCIONES ACTIVADAS EN FRECUENCIA
DIFUSA:',//)
97  FORMAT (5X,A30,2X,'CON',2X,F6.3,2X,'GRADOS DE MEMBRESIA',//)
98  FORMAT (////,5X,'FUNCIONES ACTIVADAS EN VARIACION DE
FRECUENCIA DIFUSA:',//)
WRITE (75,96)
DO I=1,A
  WRITE (75,97) MFNAMEF(FREQUENCY(I)),TRIPF(I)
END DO
WRITE (75,98)
DO I=1,B
  WRITE (75,97) MFNAMEDF(DFREQUENCY(I)),TRIPDF(I)
END DO
99  FORMAT (////,'*****',//,&
&'***      B A S E   D E   R E G L A S      ***',//,&
&'*****',//,&
&'//,5X,'ACCIONES DE TIRO DE CARGA:',//)
100 FORMAT (10X,F6.3)
WRITE (75,99)
DO I=1,NMFLS
  WRITE (75,100) FUZZYLS(I)
END DO
101 FORMAT (//,5X,'FUNCIONES ACTIVADAS PARA ACCION DE TIRO DE
CARGA:',//)
WRITE (75,101)
DO I=1,C
  WRITE (75,97) MFNAMELS(LOADSHEDDING(I)),TRIPLS(I)
END DO
102 FORMAT (////,'*****',//,&
&'***      D E D I F U S I F I C A C I O N      ***',//,&
&'*****',//,&
&'//,5X,'LA CANTIDAD DE CARGA RECOMENDABLE A TIRAR
ES:',2X,F6.2,'%')
WRITE (75,102) CRISPLS
CLOSE (75)
END SUBROUTINE RESULT

```

## D.6 EJEMPLO DE LA EJECUCIÓN DEL PROGRAMA QUE OPERA CON ESQUEMAS DIFUSOS DE TIRO DE CARGA

El programa mostrado en la sección D.5 requiere de cuatro archivos de entrada. El primer archivo debe tener el nombre: DATOS.TXT, el cual contendrá los datos del sistema, tales como inercia, amortiguamiento de carga, frecuencia nominal y frecuencia inicial de corte en Hertz; así mismo se ingresan los datos del disturbio en porcentaje de sobrecarga y el tiempo de simulación e incremento de tiempo para registro de la frecuencia en segundos. En la Figura D.4 se muestra un ejemplo de dicho archivo y el orden en el que se deben ingresar los datos.

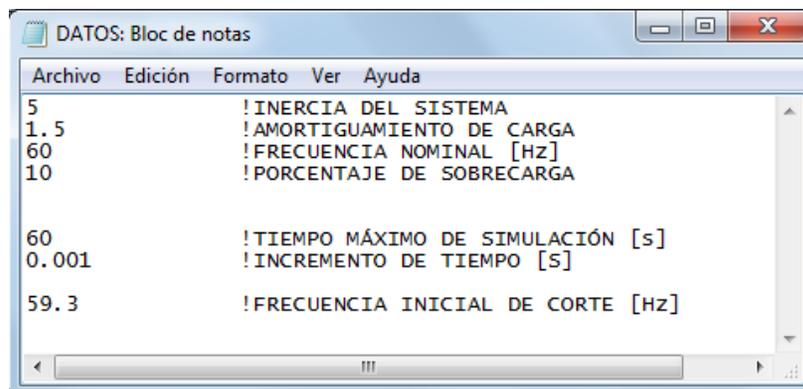


Figura D.4 Ejemplo del archivo DATOS.TXT para el programa de esquemas difusos.

En la Figura D.4 se observa que la frecuencia inicial de corte se solicita como dato del sistema; esto se debe a la naturaleza del esquema dinámico puesto que únicamente requiere de este primer nivel de frecuencia para realizar el cálculo del porcentaje de carga a desconectar.

Los siguientes archivos de entrada corresponden al esquema inteligente; es decir a la construcción del sistema de inferencia difuso. Así entonces, el segundo archivo tiene por nombre MF\_POINTS.TXT y está conformado por el número de funciones de membresía de frecuencia y de variación de frecuencia; así como el nombre de cada una de ellas y el valor de los parámetros que las forman. Las ecuaciones que modelan a las funciones de membresía donde intervienen estos parámetros se detallan en el apéndice B en la sección B.3.3. En la Figura D.5 se presenta un ejemplo de este archivo.

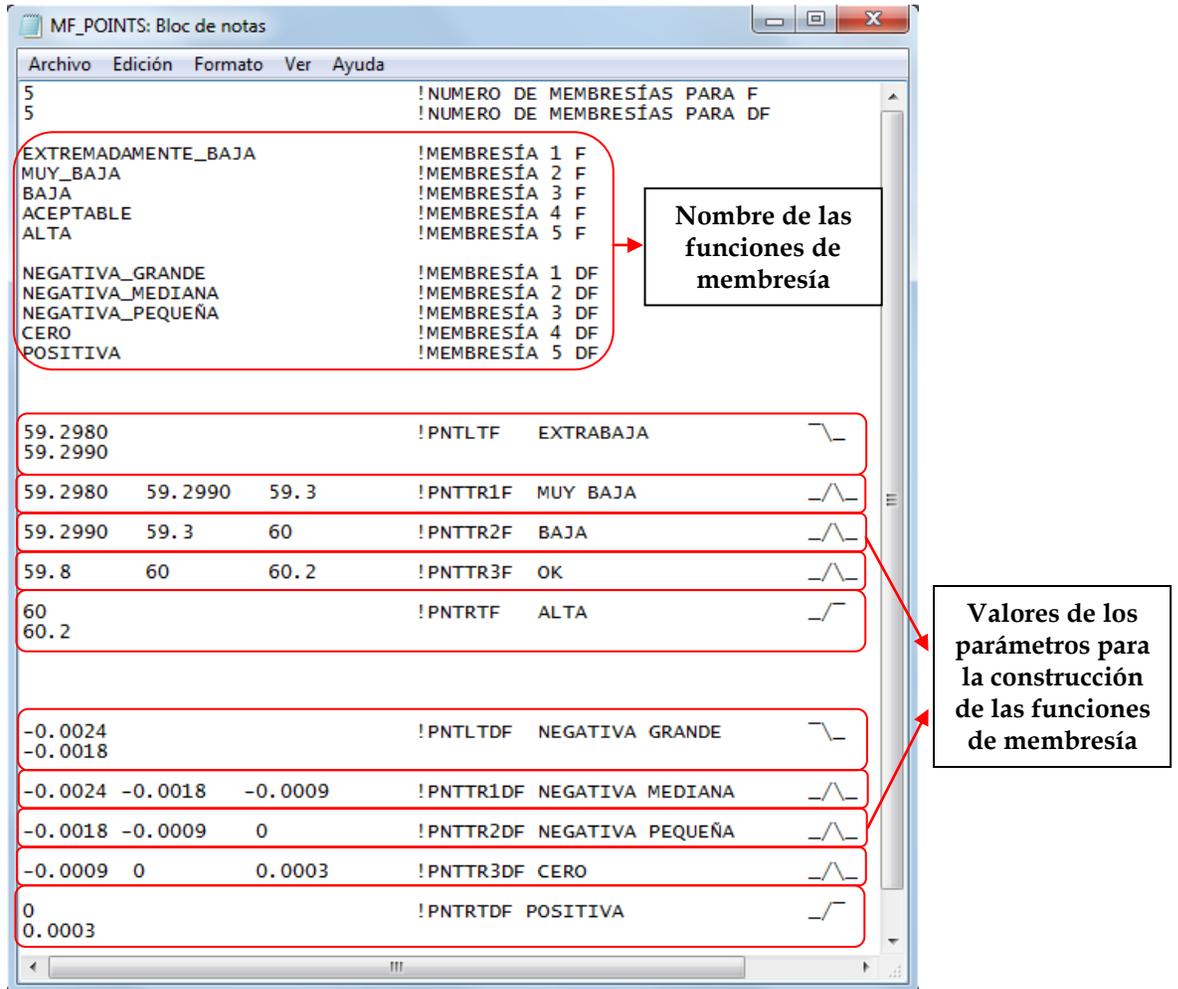


Figura D.5 Ejemplo del archivo MF\_POINTS.TXT para la construcción de las funciones de membresía de entrada.

El tercer archivo de entrada lleva por nombre LOAD\_SHEDDING.TXT y contiene el número de funciones de membresía de salida y su nombre, así como los porcentajes de desconexión de carga de cada una de ellas. En la Figura D.6 se observa un ejemplo de este archivo.

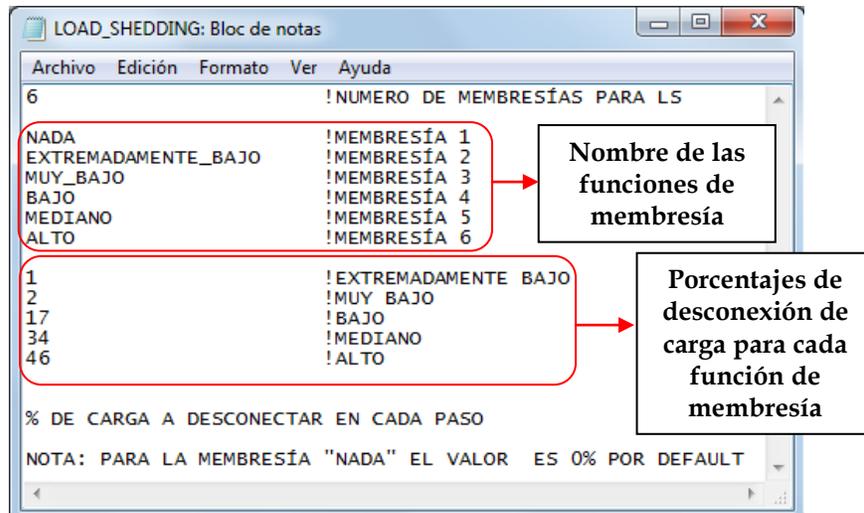


Figura D.6 Ejemplo del archivo LOAD\_SHEDDING.TXT para el tiro de carga de las funciones de membresía de salida.

El cuarto archivo de entrada contiene la base de reglas, la cual ésta formada por números que corresponden a una función de membresía de salida. En la Figura D.7 se aprecia un ejemplo de este archivo cuyo nombre es RULE\_BASE.TXT.

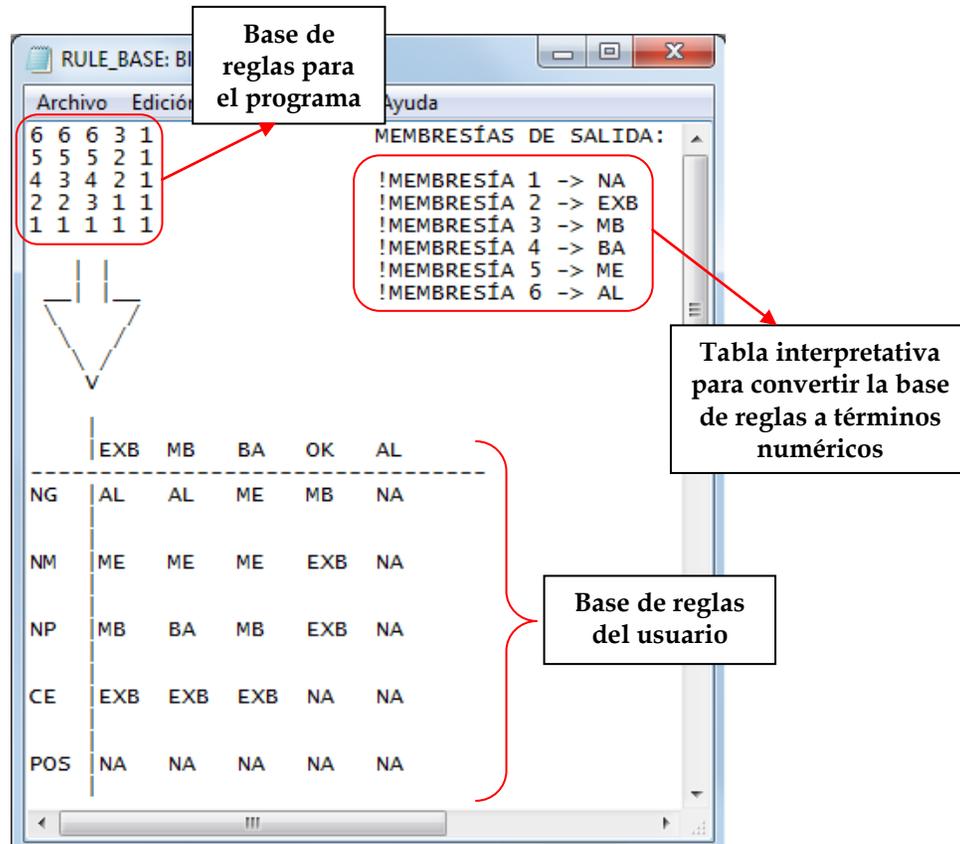


Figura D.7 Ejemplo del archivo RULE\_BASE.TXT.

En la Figura D.7 se puede notar que la base de reglas es interpretada por el programa como una matriz numérica; la cual se obtiene a través de una asignación de etiquetas numéricas a cada variable lingüística, misma que debe realizar el usuario. De tal forma que la matriz numérica es equivalente a la base de reglas que contiene valores lingüísticos.

Una vez creados los cuatro archivos de entrada, se ejecuta el programa para obtener dos archivos de salida. El primero se llamará RESULTADOFIS.TXT, que contendrá un reporte en forma detallada de la operación del sistema de inferencia difuso como se muestra en la Figura D.8.

```

RESULTADOFIS: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
ELABORO: ING. JESUS SANCHEZ CORTES
*****
***          D A T O S          ***
*****
FRECUENCIA NOMINAL: 60.00
FRECUENCIA DE DISTURBIO: 59.30
VARIACION DE FRECUENCIA: -.001
*****
***          D I F U S I F I C A C I O N          ***
*****
FRECUENCIA DIFUSA:          VARIACION DE FRECUENCIA DIFUSA:
.000          .000
.109          .000
.891          .558
.000          .442
.000          .000

FUNCIONES ACTIVADAS EN FRECUENCIA DIFUSA:
MUY_BAJA          CON .109 GRADOS DE MEMBRESIA
BAJA          CON .891 GRADOS DE MEMBRESIA

FUNCIONES ACTIVADAS EN VARIACION DE FRECUENCIA DIFUSA:
NEGATIVA_PEQUEÑA          CON .558 GRADOS DE MEMBRESIA
CERO          CON .442 GRADOS DE MEMBRESIA
*****
***          B A S E   D E   R E G L A S          ***
*****
ACCIONES DE TIRO DE CARGA:
.000
.109
.442
.558
.000
.000

FUNCIONES ACTIVADAS PARA ACCION DE TIRO DE CARGA:
EXTREMADAMENTE_BAJO          CON .109 GRADOS DE MEMBRESIA
MUY_BAJO          CON .442 GRADOS DE MEMBRESIA
BAJO          CON .558 GRADOS DE MEMBRESIA
*****
***          D E D I F U S I F I C A C I O N          ***
*****
LA CANTIDAD DE CARGA RECOMENDABLE A TIRAR ES: 9.44%

```

Figura D.8 Ejemplo del archivo de salida RESULTADOFIS.TXT para una contingencia de 10% de sobrecarga.

El segundo archivo de salida tendrá el nombre de RESULTADO.TXT, donde se puede encontrar el comportamiento de la frecuencia y de los pares del sistema desde el momento en que ocurre el disturbio hasta que termina el tiempo de simulación. Un ejemplo de este archivo se muestra en la Figura D.9 donde la frecuencia está dada en Hertz, los pares del sistema y la carga tirada equivalente en pu y el tiempo en segundos.

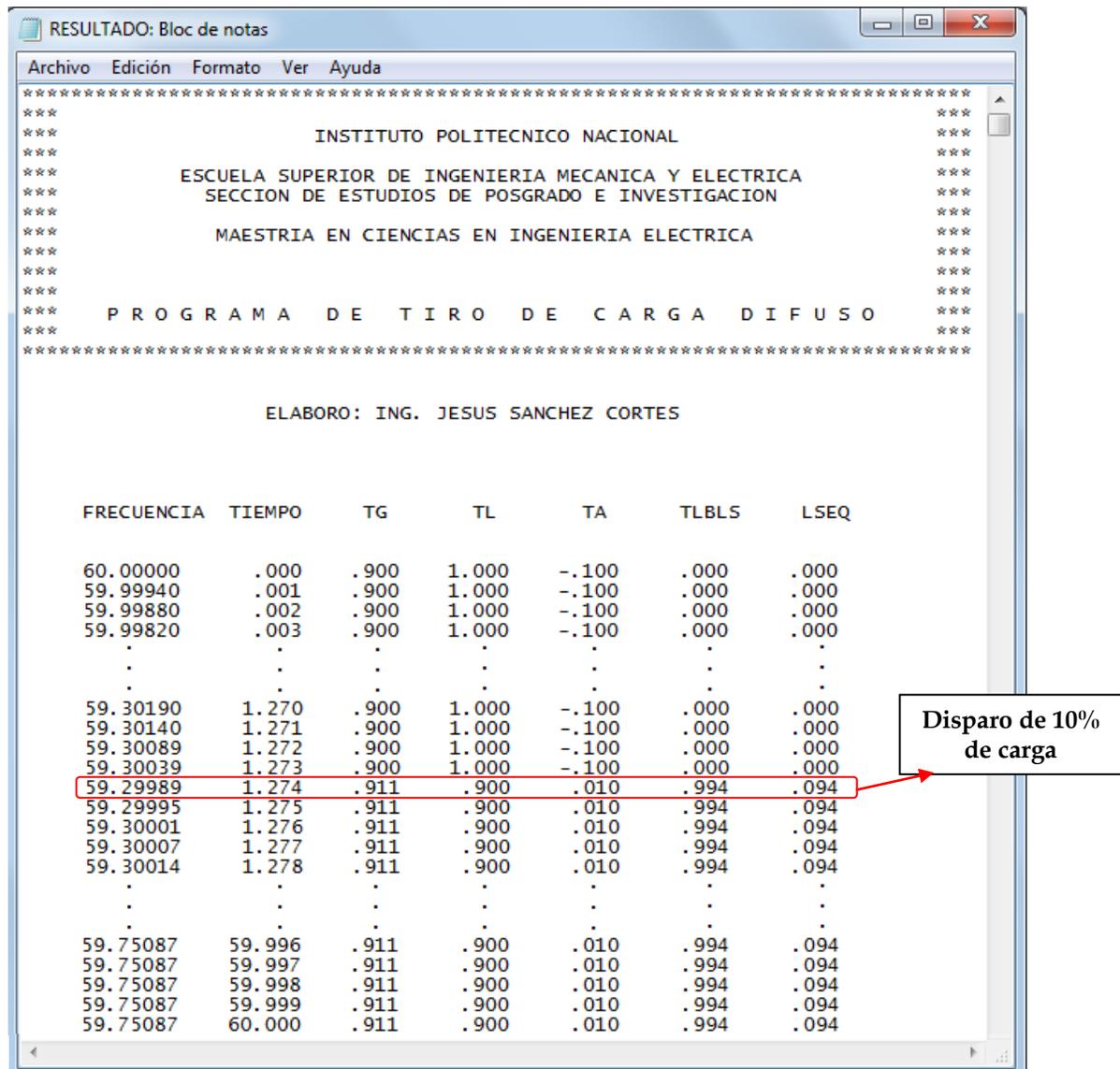


Figura D. 9 Ejemplo del archivo de salida RESULTADO.TXT para una contingencia de 10% de sobrecarga.



