



Universidad Nacional de San Juan
Facultad de Ingeniería
Instituto de Energía Eléctrica

INFERENCIA DINÁMICA DE LA CONFIGURACIÓN OPERATIVA DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN DE MEDIA TENSIÓN UTILIZANDO INFORMACIÓN DE TIEMPO REAL, TIEMPO REAL EXTENDIDO, HISTÓRICA Y CONOCIMIENTO EXPERTO

Julio Enrique Romero Agüero

Temas de Energía Eléctrica

24



INFERENCIA DINÁMICA DE LA CONFIGURACIÓN OPERATIVA DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN DE MEDIA TENSIÓN UTILIZANDO INFORMACIÓN DE TIEMPO REAL, TIEMPO REAL EXTENDIDO, HISTÓRICA Y CONOCIMIENTO EXPERTO.

Tesis doctoral de

JULIO ENRIQUE ROMERO AGÜERO

Aprobada por la Facultad de Ingeniería de la
Universidad Nacional de San Juan
para el otorgamiento del grado académico de

DOCTOR EN INGENIERÍA

Dirección de tesis: Prof. Dr. –Ing. Alberto Vargas
Instituto de Energía Eléctrica
Facultad de Ingeniería
Universidad Nacional de San Juan, Argentina

Jurado de tesis: Prof. Dr. –Ing. Alberto Vargas
Instituto de Energía Eléctrica
Facultad de Ingeniería
Universidad Nacional de San Juan, Argentina

Jurado de tesis: Prof. Dr. –Ing. Antonio Gómez Expósito
Departamento de Ingeniería Eléctrica
Escuela Superior de Ingenieros
Universidad de Sevilla, España

Fecha de la defensa oral: 22 de abril de 2005

Inferencia Dinámica de la Configuración Operativa de la Red de Distribución de Media Tensión Utilizando Información de Tiempo Real, Tiempo Real Extendido, Histórica y Conocimiento Experto.

Tesis doctoral de Julio Enrique Romero Agüero

Diseño de interior: Julio Enrique Romero Agüero
Primera edición de 2005

ISBN 987-43-9137-5

Queda hecho el depósito que marca la ley 22.399

Prohibida la reproducción total o parcial de este libro en forma idéntica o modificada, escrita a máquina por el sistema multigraph, mimeógrafo, impreso, fotocopia, etc., no autorizado por el autor, viola derechos reservados. Cualquier utilización debe ser previamente solicitada.

Se terminó de imprimir en mayo de 2005 en Dirección de Imprenta y Publicación, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de San Juan.

© 2005 por Julio Enrique Romero Agüero

Instituto de Energía Eléctrica de la Universidad Nacional de San Juan
Avenida Libertador General San Martín 1109 Oeste, CP-5400, San Juan, Argentina.
Tel.: +54 264 422 6444 – Fax.: +54 264 4210299

IMPRESO EN ARGENTINA – PRINTED IN ARGENTINA

A Dios agradezco por su amor, guía y protección.

Este trabajo está dedicado a toda mi familia. A mi esposa Mónica por su apoyo y aliento. A mi madre Mercedes por motivarme a estudiar y superarme. A mi padre Julio por fomentar mi interés por las ciencias y el conocimiento en general. A mi abuela Clementina, por creer siempre en mí y enseñarme a leer y escribir. A mi abuelo Edmundo y mis hermanos Erick y Karem por su cariño.

Prefacio

La realización de la presente tesis se logró gracias al apoyo financiero del Servicio Alemán de Intercambio Académico (DAAD), mediante el programa conjunto de becas para estudios de doctorado en el Instituto de Energía Eléctrica de la Universidad Nacional de San Juan, Argentina (IEE-UNSJ).

Deseo agradecer especialmente al Prof. Dr. –Ing. Alberto Vargas por aceptar la dirección de este trabajo de investigación, sus valiosas recomendaciones, apoyo, amabilidad y disponibilidad para atender mis consultas. Su orientación y supervisión científica han contribuido significativamente a la conclusión exitosa de la investigación.

Agradezco al Prof. Dr. –Ing. Francisco Garcés, director del Programa de Doctorado por su apoyo, orientación y esmerada revisión de la tesis doctoral.

Agradezco al Prof. Dr. –Ing. Antonio Gómez Expósito (Universidad de Sevilla, España), por aceptar ser el referente externo de la tesis doctoral y por su cuidadosa revisión de la misma.

Agradezco al Prof. Dr. –Ing. Edmund Handschin (Universität Dortmund, República Federal de Alemania) y al Prof. Dr. –Ing. Vicente Mut (Departamento de Estudios de Postgrado, Universidad Nacional de San Juan, Argentina) por haber formado parte del tribunal evaluador de la tesis doctoral.

Agradezco a los profesores Graciela Colomé y Víctor Doña por su confianza y colaboración durante mi estancia en el IEE-UNSJ.

Agradezco especialmente a mis amigos Miguel Ángel Figueroa, Wilfredo Flores, Mauricio Caballero y Camilo Cortés, quienes fueron mis compañeros de oficina en diferentes momentos durante estos años, por hacer muy grata mi estancia en el IEE-UNSJ.

Finalmente agradezco a todos mis colegas, profesores y personal del IEE-UNSJ por su colaboración durante mi estadía en San Juan, Argentina.

San Juan, mayo de 2005

Julio Enrique Romero Agüero

Resumen

Como resultado de la desregulación de los mercados eléctricos, las distribuidoras latinoamericanas se enfrentan a un ambiente de crecientes exigencias, en el que uno de sus principales objetivos es satisfacer los requerimientos impuestos por las regulaciones de Calidad de Servicio Eléctrico (CSE), particularmente aquellos referidos a la frecuencia y duración de las interrupciones. El incumplimiento de estos requisitos implica penalizaciones y pérdidas económicas para las distribuidoras. Debido a las características de los Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica (SDEE), sus costos asociados y a la existencia de variables incontrolables (e.g., clima), no es posible garantizar un servicio sin interrupciones. Sin embargo, tanto los organismos reguladores como los clientes continúan aumentando sus exigencias respecto a la CSE. Para cumplir con estas demandas y restricciones, las distribuidoras están moviéndose hacia la implementación e integración de sistemas de información que permitan ejecutar estrategias más eficientes de operación y control de la red. Esto ha motivado un creciente interés en la gestión de interrupciones y la Estimación de Estado (EE) de SDEE. Para la implementación de estas funciones de los modernos Sistemas de Gestión de Distribución / Sistemas de Gestión de Interrupciones (DMS / OMS) es de fundamental importancia conocer la Configuración Operativa (CO) de la red de distribución de media tensión, la cual se define como el estado operativo de los dispositivos de protección y maniobra de media tensión

En este trabajo se presenta una novedosa metodología de inferencia de la CO de la red de distribución de media tensión, de arquitectura modular, capaz de integrar los datos cuantitativos y cualitativos suministrados en Tiempo Real (TR) y Tiempo Real Extendido (TRE) por los sistemas de información de la distribuidora y los expertos. La metodología modela las incertidumbres asociadas a los datos de TR y TRE y aprovecha la sinergia de los mismos para obtener soluciones dinámicamente, a medida que el volumen de datos aumenta. La metodología es suficientemente flexible para ser utilizada como paso inicial en la gestión de interrupciones y EE de SDEE. Asimismo sus resultados son muy importantes para el mantenimiento de una base de datos actualizada de la cronología de operación de la red, fundamental para el cálculo de los índices de CSE y confiabilidad y la planificación del SDEE.

La metodología obtiene una solución inicial mediante análisis de flujo de potencia, teoría de conjuntos fuzzy tipo 2, cálculo de corrientes de falla fuzzy (CFF) y Sistemas de Lógica Fuzzy Tipo 2 (T2-FLS). En esta etapa, se logra integrar de forma eficiente y sistemática el conocimiento experto y los datos cuantitativos y cualitativos disponibles en TR (flujos de potencia activa, magnitudes de corrientes de falla, clima, datos históricos de operación relacionados con la frecuencia de interrupciones y mantenimiento). Posteriormente se mejora la solución inicial, mediante un procedimiento basado en ecuaciones relacionales e inferencia abductiva fuzzy. En esta etapa se incorporan al proceso de inferencia los datos disponibles en TRE (llamadas telefónicas de los clientes), hasta alcanzar una solución final. Este modelo permite vincular las etapas de TR y TRE y extender la metodología para la inferencia de la CO en presencia de interrupciones múltiples. En cada etapa se calculan todas las alternativas plausibles de solución del problema, ordenadas de acuerdo a su certeza, a fin de obtener una perspectiva general del estado operativo del SDEE.

La modelación matemática propuesta facilita la implementación inicial de la metodología, ya que permite la utilización de los datos inciertos y conocimiento experto usualmente disponibles en los SDEE. Este trabajo es la primera aplicación de la teoría de conjuntos fuzzy tipo 2 y T2-FLS para la solución de problemas operativos en sistemas eléctricos de potencia, específicamente en SDEE. La metodología ha sido evaluada en un distribuidor real de la ciudad de San Juan, Argentina. Los resultados demuestran sus beneficios, ventajas y potencialidad de implementación práctica.

Abstract

As a consequence of the de-regulation of electricity markets, the Latin American utilities are confronting an environment of growing exigencies, in which one of their main objectives is to satisfy the requirements imposed by regulations of quality of service, particularly those referred to occurrence frequency and duration of outages. The failure to comply with these requirements implies penalties and economical losses for the utilities. The characteristics of distribution systems, their associated costs and the existence of uncontrollable variables (e.g., weather), turn it difficult to guarantee a supply without outages. However, regulatory agencies and customers are augmenting their demands about the quality of service. To meet these demands and constraints, utilities are moving towards the implementation and integration of information systems that allow the execution of more efficient strategies of outage management, and network operation and control. This has spurred a growing interest on outage management and distribution state estimation. For the implementation of these functions of modern Distribution Management Systems / Outage Management Systems (DMS / OMS) it is fundamentally important to know the operative configuration (OC) of the medium voltage distribution network, which is defined as the operative state of the medium voltage protective and switching devices.

This work presents a novel methodology to infer the OC of the medium voltage distribution network, which has a modular architecture and is capable of integrating the quantitative and qualitative data supplied in Real-Time (RT) and Extended Real-Time (ERT) by the information systems of the utility and by the experts. The methodology models the uncertainties associated to RT and ERT data and exploits their synergy in order to obtain solutions dynamically, as the volume of data increases. The methodology is flexible enough to be used as the initial step of the outage management and state estimation of the distribution system. In addition, the results from this procedure are very important to keep updated a chronological database on the network's operations, which is fundamental to calculate the quality of service and reliability indexes as well as to plan the electrical distribution system.

The methodology obtains an initial solution by means of power flow analysis, type-2 fuzzy sets theory, fuzzy fault-currents calculation and Type-2 Fuzzy Logic Systems (T2-FLS). This first stage attains an efficient and systematic integration of both the expert knowledge and the quantitative and qualitative data available in RT (power flows, fault currents, weather condition and historical data of operation related to the occurrence frequency of outages and network maintenance). On a second stage, the initial solution is improved using a procedure based on fuzzy relation equations and fuzzy abductive inference. The data available in ERT, i.e. customer trouble calls, are incorporated to the inference process, until a final solution is reached at. This second model links the RT and ERT stages and extends the methodology in order to infer the OC in the presence of multiple outages. In each stage, all the plausible alternatives of solution of the problem are calculated and ranked according to their certainty, to obtain a general perspective of the distribution system situation.

The proposed mathematical modelling facilitates the initial implementation of the methodology, because it allows using both the uncertain data and the expert knowledge that is typically available in distribution systems. This work is the first application of type-2 fuzzy sets theory and T2-FLS for the solution of operative problems in distribution systems. The methodology has been evaluated on a real distribution feeder of the city of San Juan, Argentina. The results show its benefits, advantages and potential for a practical implementation.

Tabla de contenidos

CAPÍTULO 1.....	1
1 Introducción y objetivo del trabajo.....	3
1.1 Descripción del problema.....	3
1.1.1 CO y gestión de interrupciones.....	3
1.1.2 CO y operación y control de SDEE.....	4
1.2 Objetivos del trabajo.	6
1.3 Estructura del trabajo.	8
CAPÍTULO 2.....	11
2 Análisis del problema.	13
2.1 Sistemas de distribución de energía eléctrica (SDEE).	13
2.1.1 Sistemas de información en SDEE.....	14
2.1.2 Red de distribución de MT.....	17
2.1.3 CO de la red de distribución de MT.....	18
2.1.4 Operación de la red de distribución de MT.....	19
2.2 Inferencia de la CO.....	22
2.2.1 Inferencia en TR.....	22
2.2.2 Inferencia en TRE.....	24
CAPITULO 3.....	27
3 Modelación matemática.	29
3.1 Modelo de inferencia de la CO en TR (CO_{TR}).	29
3.1.1 Modelo matemático del distribuidor de MT en TR.....	29
3.2 Modelo de inferencia de la CO en TRE (CO_{TRE}).	32
3.2.1 Modelo matemático del distribuidor de MT en TRE.....	34
3.2.2 Incertidumbre en las manifestaciones.....	34
3.2.3 Incertidumbre en la relación de causalidad.....	36
3.2.4 Fallas múltiples.....	38
3.2.5 Solución del modelo de TRE mediante la inferencia abductiva fuzzy.....	38
CAPÍTULO 4.....	41
4 Metodología de solución.	43
4.1 Inferencia de la CO en TR (CO_{TR}).	43
4.1.1 Cálculo de I^P	43
4.1.2 Cálculo de I^I	48
4.1.3 Cálculo de I^Q	51
4.1.4 Cálculo de μC^+	54
4.1.5 Decodificación de valores numéricos y cálculo de términos lingüísticos... 56	
4.2 Inferencia de la CO en TRE (CO_{TRE}).	57
4.2.1 Solución del modelo crisp.....	57
4.2.2 Solución del modelo fuzzy.....	59
4.3 Algoritmo de solución general.	60
4.3.1 Descripción del algoritmo.....	60
4.3.2 Descripción del programa de cálculo.....	62
CAPÍTULO 5.....	65
5 Análisis de resultados.	67
5.1 Características del distribuidor de MT.	67
5.2 Cálculo de I^P.....	68
5.3 Cálculo de I^I.....	69

5.4	Cálculo de I^Q.	70
5.4.1	Variables cuantitativas.	71
5.4.2	Variables cualitativas.	73
5.5	Cálculo de μC^+.	76
5.6	Aplicación de la metodología.	81
5.6.1	Caso 1 – Operación de R021.	82
5.6.2	Caso 2 – Operación de F1342.	84
5.6.2.1	Modelo de TR.	84
5.6.2.2	Modelo de TRE.	86
5.6.3	Caso 3 – Operación de F1339 y F1368.	90
5.6.4	Caso 4 – Operación de F2403 y F1369.	93
5.6.5	Fallas de conductor abierto.	95
5.6.5.1	Caso 5 – Falla de conductor abierto en zona protegida por F1355.	96
5.6.5.2	Caso 6 – Falla de conductor abierto en zona protegida por F1342.	97
5.6.6	Resultados utilizando conjuntos fuzzy gaussianos tipo 2.	100
5.7	Tiempos de ejecución del programa de cálculo.	103
CAPÍTULO 6		105
6	Conclusiones.	107
6.1	Resumen del trabajo.	107
6.2	Conclusiones particulares.	108
6.2.1	Gestión de Interrupciones.	108
6.2.2	Utilización del conocimiento experto.	109
6.2.3	Operación y control del SDEE.	110
6.2.4	Metodología de cálculo.	110
6.2.5	Aplicabilidad de la metodología.	111
6.3	Aportes principales.	112
6.4	Futuros trabajos.	113
CAPÍTULO 7		115
7	Referencias	117
7.1	Gestión de interrupciones.	117
7.2	Identificación de errores topológicos en EE de STEE.	118
7.3	EE de SDEE.	119
7.4	Inferencia de la CO en TR.	121
7.5	Inferencia de la CO en TRE.	122
7.6	Anexos.	123
ANEXO A		127
A	Aplicaciones de la teoría de conjuntos y sistemas de lógica fuzzy.	129
A.1	Conjuntos fuzzy tipo 2.	129
A.1.1	Función de pertenencia secundaria (FPS) y huella de incertidumbre (FOU).	130
A.1.2	Join y meet de conjuntos fuzzy tipo 2 de intervalo.	132
A.2	T2-FLS.	133
A.2.1	Reglas.	134
A.2.2	Motor de inferencia fuzzy.	135
A.2.3	Fuzzificador.	136
A.2.3.1	Fuzzificación Singleton Tipo 2.	137
A.2.3.2	Fuzzificación No Singleton Tipo 1.	137
A.2.3.3	Fuzzificación no singleton tipo 2.	137

A.2.4	Reductor de tipo	138
A.2.5	Defuzzificación.	139
A.3	Modelación de incertidumbres en T2-FLS.....	139
A.3.1	Construcción de funciones de pertenencia de conjuntos fuzzy tipo 2.....	140
A.3.2	Construcción de base de reglas de T2-FLS y cálculo del centroide promedio.	143
ANEXO B.....		149
B	Corrientes de falla fuzzy (CFF).	151
B.1	Principio de extensión.	151
B.2	El método vertex.....	152
B.3	Teorema de representación.	154
B.3.1	Conjuntos fuzzy incrustados tipo 2.....	155
B.3.2	Conjuntos fuzzy incrustados tipo 1.....	155
B.3.3	Formulación matemática.	155
B.4	Cálculo de corrientes de falla fuzzy (CFF).	157
ANEXO C		165
C	Análisis de flujos de potencia.	167
ANEXO D		171
D	Inferencia abductiva.	173
D.1	Conceptos básicos de la PSCT.	173
D.2	Solución del problema de diagnóstico.	174
D.3	Algoritmos de solución.....	176
ANEXO E.....		181
E	Tablas y resultados adicionales.....	183
ANEXO F		195
F	Glosario.	197
F.1	Abreviaturas.	197
F.2	Simbología.	198
F.2.1	Letras latinas.....	198
F.2.2	Letras griegas.	200
F.2.3	Símbolos.	201
Biografía.		203

CAPÍTULO 1

1 Introducción y objetivo del trabajo.

1.1 Descripción del problema.

Como resultado de la liberalización de los mercados eléctricos, las empresas de distribución latinoamericanas se enfrentan a un ambiente de crecientes exigencias. En este contexto uno de sus principales objetivos es el cumplimiento de las regulaciones de CSE, particularmente aquellas referidas a la continuidad del suministro de energía eléctrica. Esta última es evaluada mediante la cuantificación de la frecuencia y duración de las interrupciones, la violación de los límites permitidos es penalizada utilizando valores relacionados con los costos de energía no suministrada, causando pérdidas económicas a las distribuidoras. La continuidad del suministro puede asegurarse en buena medida mediante el mantenimiento y mejoramiento de las instalaciones físicas. Sin embargo, debido a las características de los SDEE, sus costos asociados y a la existencia de variables incontrolables (e.g., clima), no es posible garantizar económicamente un servicio sin interrupciones. Sin embargo, los organismos reguladores y clientes continúan aumentando sus exigencias respecto a la CSE. Para cumplir con estas demandas y restricciones, las distribuidoras están moviéndose hacia la implementación de estrategias más eficientes de gestión de interrupciones y de operación y control de la red. En este contexto surge el interés de disponer de una metodología para identificar la CO de la red de MT en situaciones anormales, la CO se define como el estado operativo (cerrado / abierto) de los dispositivos de protección y maniobra¹ de MT.

1.1.1 CO y gestión de interrupciones.

El control de la CSE ha impulsado con mayor énfasis el surgimiento de los Sistemas de Gestión de Interrupciones (OMS). Las funciones básicas de los OMS incluyen la localización de interrupciones y restauración, así como el registro de datos históricos de operación para el cálculo de índices de CSE y análisis de confiabilidad de los SDEE [1]-[7]. Las interrupciones al nivel de distribución son resultado de la apertura de los dispositivos de protección de MT o BT. Desde el punto de vista de la localización de interrupciones, son los dispositivos de protección de MT los de mayor importancia, por la cantidad de clientes que pueden ser afectados. Desde el punto de vista de la restauración, es además necesario conocer el estado operativo de los dispositivos de maniobra de MT, a fin de proponer la secuencia de operaciones más adecuada para la normalización del suministro luego de una interrupción [8]. De este análisis se observa que la identificación de la CO de la red de MT² es muy importante para una adecuada gestión de interrupciones [1]-[11].

La gestión convencional de interrupciones utiliza las llamadas telefónicas de los clientes afectados para identificar la CO [12]-[20]. Este procedimiento tiene como ventajas su bajo costo de implementación y abundancia de datos, sin embargo, la identificación puede tomar mucho tiempo ya que las llamadas telefónicas son recibidas en TRE, i.e., varios minutos después de ocurrida la interrupción. Además, generalmente son necesarias varias llamadas telefónicas para identificar correctamente al dispositivo de protección operado. Estas limitaciones pueden aumentar la duración de las interrupciones a niveles incompatibles con las regulaciones de CSE. Esta ha sido una de las motivaciones para la implementación del

¹ Dispositivos normalmente abiertos o normalmente cerrados, sin capacidad de protección.

² En adelante cuando se utilice CO será para referirse exclusivamente a la CO de la red de MT.

SCADA en el nivel de distribución, estos sistemas suministran datos cuantitativos (estados operativos de dispositivos de protección y maniobra, flujos de potencia, tensiones, corrientes, etc.) en TR, i.e., algunos segundos después de ocurridos los eventos. Estos datos son de gran utilidad para múltiples labores, entre ellas la identificación de la CO [22]-[30]. Desgraciadamente, la penetración del SCADA es todavía incipiente, particularmente en los SDEE latinoamericanos, en los que comúnmente las mediciones supervisadas están ubicadas en la SE AT/MT. En la red de MT, en cambio, la mayoría de mediciones no son supervisadas, por lo tanto generalmente no es posible identificar con precisión la CO utilizando solamente los datos disponibles en TR. Una opción para mejorar la identificación es también utilizar los datos históricos de operación de la red [18]-[21], sin embargo, los SDEE son muy heterogéneos, extensos y dinámicos, lo cual dificulta el mantenimiento de una base de datos históricos completa, confiable y actualizada. En muchos casos solamente se dispone del conocimiento experto, el cual a pesar de ser abundante y muy utilizado en la operación diaria de la red, tiene la desventaja de ser inherentemente cualitativo e impreciso. No obstante, este conocimiento también puede contribuir a la identificación de la CO [20], [22].

De la revisión de la literatura se observa que la estrategia más conveniente para la gestión de interrupciones de SDEE es la utilización e integración de los datos suministrados por varias fuentes (llamadas telefónicas, SCADA, bases de datos históricos de operación y expertos). De esta forma es posible explotar sus potencialidades y complementar sus deficiencias individuales, a fin de reducir la incertidumbre de los resultados finales. En este sentido se han hecho algunos aportes importantes, sin embargo las metodologías propuestas dependen en buena medida de recursos de supervisión y control todavía no disponibles en la mayoría de los SDEE, particularmente los latinoamericanos (e.g., sistemas AMR). Otras propuestas no toman en cuenta algunas incertidumbres que pueden influir significativamente en los resultados (e.g., incertidumbres asociadas a los valores de las demandas nodales, magnitudes de las corrientes de falla, etc.) [21]-[33]. Por lo tanto, el desarrollo de una metodología de identificación de la CO capaz de integrar los datos suministrados por las fuentes analizadas, modelando sus incertidumbres, representaría un aporte al estado del arte.

1.1.2 CO y operación y control de SDEE.

Satisfacer los límites establecidos por las regulaciones de CSE también implica disponer de procedimientos eficientes de operación y control del SDEE. Para lograr este objetivo es necesario contar con una base de datos coherente, confiable y actualizada de parámetros eléctricos, la cual puede ser obtenida mediante la EE del SDEE. La EE tradicional es un algoritmo de procesamiento de datos que, en base a un conjunto redundante de mediciones, información sobre la CO³ y parámetros de la red, calcula el estado estimado de funcionamiento del sistema eléctrico [34]. La EE utiliza mediciones analógicas de parámetros eléctricos (flujos de potencia, corrientes, tensiones, etc.) y mediciones del estado operativo (cerrado / abierto) de los dispositivos de protección y maniobra [36].

³ En la literatura sobre EE se utilizan los términos “topología operativa” [31], “configuración operativa” [32], “topología de la red” [36], “topología en TR” [38] y “topología on-line” [41], entre otros.

La EE es una función vital de los EMS modernos, ya que proporciona los datos necesarios para la ejecución de otras funciones importantes (e.g., despacho económico, análisis de contingencias, etc.) [37]. La penetración del SCADA en el nivel de distribución y el avance de las tecnologías de información, ha permitido adoptar algunos de los conceptos utilizados en los EMS y utilizarlos en el análisis del funcionamiento de los SDEE. Surgiendo así los actuales DMS [35] y el creciente interés en el estudio de la EE del SDEE.

La EE puede ser estática o dinámica [37]. En la EE estática convencional utilizada en STEE, un procesador topológico identifica la CO a partir de los estados operativos reportados por el SCADA [36]-[39]. Se asume que no existen errores en los estados reportados y que la CO es conocida completamente y con precisión. Posteriormente, en base a esta CO y al conjunto redundante de mediciones analógicas, el algoritmo de EE calcula las variables de estado del sistema (magnitud y ángulo de las tensiones nodales). Mediante las variables de estado es posible calcular todos los parámetros eléctricos del sistema y compararlos con los correspondientes parámetros medidos. De esta comparación se obtienen los residuos, los cuales son utilizados para detectar, identificar y filtrar errores en las mediciones analógicas [36]-[38]. Si existen errores en los estados operativos reportados, el procesador topológico puede obtener una CO equivocada, esto puede afectar significativamente los resultados de la EE, causar problemas de convergencia y la aparición de grandes residuos [38]-[62]. Se han propuesto metodologías que utilizan estos residuos para detectar e identificar los errores topológicos presentes [40]-[42], estos métodos tienen la desventaja que necesitan partir de una EE exitosa, lo cual no está garantizado [43].

Durante la última década ha surgido la llamada EE generalizada [38], [49]-[57], en la cual se modela el estado operativo de los dispositivos de protección y maniobra, mediante la introducción de variables de estado y restricciones adicionales. En vista que no es práctico modelar detalladamente todas las subestaciones de un STEE real, primero se realiza una EE convencional para identificar las subestaciones sospechosas, solo estas son posteriormente modeladas en detalle. Es importante mencionar que la introducción de variables de estado adicionales puede deteriorar la redundancia local del sistema, solamente si existe un elevado nivel de redundancia es posible efectuar una EE generalizada [40]. En este sentido se han propuesto metodologías orientadas a reducir la cantidad de variables de estado necesarias para la modelación [52]. La EE generalizada de dos etapas no siempre es exitosa, se han reportado problemas de convergencia de algunos algoritmos en presencia de errores topológicos [52], [53]. Por ello se han propuesto metodologías alternativas a fin de reforzar el desempeño de los procesadores topológicos utilizados en la EE convencional [43]-[48].

En la EE dinámica, los algoritmos propuestos evalúan las variables de estado utilizando una secuencia de mediciones en el tiempo. El tiempo es definido como una variable discreta que es incrementada considerando un paso de discretización. La EE dinámica puede ser clasificada de acuerdo a los algoritmos utilizados como EE de seguimiento, EE dinámica lineal y EE dinámica no lineal. La complejidad relacionada con el problema de la EE dinámica conduce a muchas simplificaciones en los modelos y algoritmos. Por esta razón, estos algoritmos son muy poco utilizados en los centros de control. Por el contrario, los algoritmos basados en la EE estática son los más populares y aplicados en los paquetes comerciales [74].

En los SDEE, las limitaciones logísticas y las características del sistema imposibilitan la aplicación directa de las metodologías de EE desarrolladas para STEE, esto ha motivado el desarrollo de algoritmos de EE de SDEE basados en el modelo de EE estática convencional. Los algoritmos más comunes son los basados en el método de los mínimos cuadrados ponderados y en cálculos de flujos de potencia [64]-[85]. Las principales dificultades para la EE de SDEE son la escasa disponibilidad de mediciones supervisadas en TR y la dificultad de conocer la CO con precisión. Estas limitaciones pueden causar problemas de observabilidad de partes de la red y de convergencia de los algoritmos, respectivamente. El problema de observabilidad ha sido muy estudiado en la literatura, la mayoría de las metodologías utilizan pseudo mediciones obtenidas a partir de datos estadísticos para lograr la observabilidad del sistema [67]-[78]. El problema de la inferencia de la CO, en cambio, no ha sido estudiado con profundidad. Muchas propuestas reconocen la necesidad de realizar la EE de SDEE en base a una CO conocida con precisión, sin embargo no presentan métodos detallados para su identificación [64]-[70]. Las excepciones son [71]-[74], donde se propone un modelo de EE generalizada que utiliza variables topológicas binarias para modelar el estado operativo de los dispositivos. Sin embargo, las características de los sistemas analizados en estas publicaciones difieren de las de los SDEE latinoamericanos. Un punto importante de estas propuestas es que reconocen la necesidad de modelar en detalle solamente los dispositivos cuyo estado operativo es desconocido o dudoso, para evitar problemas de observabilidad y reducir el esfuerzo computacional. Sin embargo no se presenta una metodología de selección de estos dispositivos, solamente se indica que pueden ser escogidos por el operador basándose en criterios heurísticos.

De la revisión de la literatura se observa que la mayoría de las propuestas de EE de SDEE centran su análisis en el cálculo de los parámetros eléctricos y no proponen metodologías específicas para la identificación de la CO [75]-[85]. En vista que las limitaciones logísticas de los SDEE no hacen factible (en la mayoría de los casos) la identificación de la CO mediante la aplicación de los modelos de EE generalizada, es habitualmente más conveniente utilizar el modelo de EE convencional. Por lo tanto es necesario disponer de una metodología de identificación de la CO que sirva como punto de partida para la implementación de este modelo. En caso que sea factible realizar una EE generalizada, también es necesaria una metodología para la selección de los dispositivos que serán modelados detalladamente. El desarrollo de una metodología de identificación de la CO suficientemente flexible para ser utilizada por ambos modelos de EE (convencional y generalizado) representaría un aporte al estado del arte.

1.2 Objetivos del trabajo.

En el contexto analizado se observa la necesidad de disponer de una metodología de identificación de la CO que considere las características, limitaciones logísticas e incertidumbres propias de los SDEE, como el caso de los latinoamericanos. Para lograr este objetivo es necesario utilizar todos los datos comúnmente disponibles en TR y TRE, datos históricos de operación de la red y conocimiento experto de los operadores del SDEE. Este problema presenta como principales retos la modelación e integración de variables de diferente naturaleza y con diferentes niveles de incertidumbre (cuantitativa y cualitativa), las cuales se encuentran disponibles en diferentes instantes (segundos y minutos). *Esto implica utilizar una metodología y algoritmos suficientemente flexibles para modelar e integrar ambos tipos de variables, las cuales deben ser supervisadas a través de una ventana*

dinámica de tiempo. La motivación para el desarrollo de esta metodología es mejorar los procedimientos de gestión de interrupciones del servicio y la operación y control de SDEE con bajo nivel de supervisión en TR, como un medio para satisfacer las regulaciones de CSE vigentes y la CSE del usuario final.

Desde el punto de vista de la gestión de las interrupciones, el objetivo es obtener rápidamente una solución inicial aproximada (CO_{TR}), a partir de las variables activadas en TR. Luego mejorar paulatinamente la solución inicial utilizando las variables activadas en TRE, hasta obtener una solución final (CO_{TRE}). A pesar que la solución inicial es menos precisa que la solución final, proporciona un diagnóstico rápido de la situación real del SDEE. Esta solución sirve de guía para iniciar la gestión de las interrupciones y tomar algunas decisiones operativas que no necesitan de gran exactitud. A medida que transcurre el tiempo se mejora la precisión de los resultados utilizando las llamadas telefónicas de los clientes afectados, de esta manera se aprovecha la interacción directa entre clientes y distribuidora. El resultado global es reducir el tiempo medio de duración de las interrupciones y evitar la violación de los límites de CSE.

Desde el punto de vista de la operación y control, el objetivo es obtener una CO que sirva de punto de partida para la EE del SDEE, independientemente de si esta es convencional o generalizada. En caso que solamente sea factible efectuar una EE convencional, es fundamental partir de una CO precisa, en vista que los algoritmos utilizados no son capaces de filtrar errores topológicos de forma integral, en este caso se puede utilizar la CO calculada en TRE (CO_{TRE}). En caso que sea factible efectuar una EE generalizada, es necesario identificar un pequeño grupo de dispositivos candidatos (cuyo estado es dudoso), para evitar los problemas de observabilidad y excesivo cálculo computacional derivados de la introducción de muchas variables de estado y restricciones adicionales. En este caso se puede utilizar la CO calculada en TR (CO_{TR}) para seleccionar los dispositivos candidatos, en lugar de utilizar métodos heurísticos como los propuestos en [71]-[74]. Este procedimiento también puede ser utilizado como primera etapa de los algoritmos de EE generalizada de dos etapas, para evitar los problemas de convergencia reportados en la literatura [52], [53].

Desde el punto de vista de la metodología de cálculo, el objetivo es que la herramienta desarrollada se adapte a las necesidades y realidades de los SDEE, en este sentido debe ser:

- Robusta: debe modelar las incertidumbres presentes en los datos disponibles y obtener buenos resultados a pesar de las mismas.
- Flexible y modular: su arquitectura debe permitir la incorporación de nuevas tecnologías de supervisión y control, a medida que se disponga de ellas.
- Fácil de implementar y actualizar: se necesita una metodología cuyos beneficios sean perceptibles en el corto plazo. Para su implementación es importante que no se exija una gran cantidad de requisitos difíciles de cumplir (gran cantidad de datos e información). En su lugar es más útil una herramienta que pueda ser incorporada rápidamente a la operación de la red y que sirva como medio para la obtención de nuevos datos, que serán utilizados para su actualización y mejora.
- Fácil incorporación del conocimiento experto: el ser humano es especialista en el manejo y la toma de decisiones en presencia de incertidumbres, por esta razón la utilización del conocimiento de los expertos es muy importante para resolver el problema bajo análisis.

Para cumplir con estos objetivos se ha desarrollado una metodología basada en sistemas de lógica fuzzy tipo-2 (T2-FLS)⁴, ecuaciones relacionales fuzzy e inferencia abductiva fuzzy. A la utilización de estas herramientas matemáticas debe su nombre este trabajo.

1.3 Estructura del trabajo.

Este trabajo está estructurado de la siguiente forma:

- Capítulo 2: se hace un análisis del problema descrito, orientando su solución para el caso de los SDEE latinoamericanos. Se presentan las principales características de los SDEE. Se analizan los problemas relacionados con la inferencia dinámica de la CO en TR y TRE. Se estudian las principales incertidumbres involucradas en el proceso. Se justifica la utilización e integración de variables de diferente naturaleza (cuantitativa y cualitativa), disponibles en diferentes instantes (TR y TRE). Se analizan las dificultades y requisitos de la modelación.
- Capítulo 3: se presentan los modelos matemáticos utilizados para la inferencia dinámica de la CO en TR y TRE.
- Capítulo 4: se presenta la metodología de solución utilizada. Se explica el cálculo de los índices de operación, se introducen los números fuzzy y el concepto de corrientes de falla fuzzy (CFF). Se presenta la modelación de variables de naturaleza cualitativa (variables lingüísticas) mediante conjuntos fuzzy tipo 2 y su integración con variables determinísticas mediante los T2-FLS. Se explica la resolución de los sistemas de ecuaciones relacionales fuzzy y la inferencia abductiva fuzzy.
- Capítulo 5: se presentan los resultados obtenidos con la metodología desarrollada. Se analiza la influencia de cada una de las variables sobre los resultados finales y se presentan seis casos de estudio, en los que se utiliza un distribuidor de MT de la ciudad de San Juan, Argentina.
- Capítulo 6: se presentan las conclusiones finales de la investigación y los aportes realizados al estado del arte.
- Capítulo 7: se presentan las referencias bibliográficas.
- Anexo A: se presenta una introducción a los conjuntos fuzzy tipo 2 y T2-FLS (funciones de pertenencia fuzzy tipo 2, base de reglas de T2-FLS, etc.).
- Anexo B: se explica el principio de extensión fuzzy, el método vertex y su aplicación para el cálculo de CFF.
- Anexo C: se presenta el algoritmo utilizado para el cálculo de demandas nodales en distribuidores de MT, el cual está basado en análisis de flujos de potencia.

⁴ Los sistemas de lógica fuzzy son conocidos como sistemas de inferencia fuzzy, sistemas expertos fuzzy y sistemas de control fuzzy.

- Anexo D: se explica la teoría básica de la inferencia abductiva y se presenta el algoritmo utilizado para calcular las explicaciones de las manifestaciones observadas, el cual está basado en la PSCT.
- Anexo E: se presentan algunos resultados adicionales:
 - Resultados obtenidos por el modelo de TR cuando se utilizan conjuntos fuzzy gaussianos tipo 2 para modelar los términos lingüísticos de las entradas y base de reglas de los T2-FLS utilizados en este trabajo.
 - Gráficas de CFF del distribuidor de MT utilizado en este trabajo.
- Anexo F: se presenta el glosario de abreviaturas y simbología utilizada.

CAPÍTULO 2

2 Análisis del problema.

Este capítulo se divide en dos secciones, en la primera sección se presentan las principales características de los SDEE y redes de distribución de ^{MT} estudiadas en este trabajo y en la segunda sección se analiza el problema de la inferencia de la CO en TR y TRE. En cada sección se explican los puntos de interés y se justifican las simplificaciones realizadas.

2.1 Sistemas de distribución de energía eléctrica (SDEE).

El SSEE es usualmente dividido en tres áreas: SGEE, STEE y SDEE. El SGEE se encarga de la producción de energía eléctrica, el STEE de su transporte a los grandes centros de consumo y el SDEE de su distribución al nivel de los clientes finales. El SDEE está constituido básicamente por los siguientes componentes [86]-[88]:

- Red de subtransmisión o red de AT (34.5kV-345kV)⁵: es alimentada por el STEE y su función es suministrar energía a las SE AT/MT. Su topología puede ser mallada o radial y generalmente tiene un alto nivel de supervisión y control en TR.
- Subestaciones transformadoras de AT a MT (SE AT/MT): su función es reducir el nivel de tensión de AT a MT. Consisten de uno o más transformadores trifásicos de potencia y sus dispositivos de protección, medición y maniobra asociados. Su capacidad es seleccionada de tal forma que exista reserva suficiente para permitir la transferencia de cargas de subestaciones vecinas. Suministran energía a uno o más distribuidores de MT, comúnmente vinculados a la subestación a través de un interruptor de circuito y protegidos por relevadores de sobrecorriente. Generalmente las SE AT/MT tienen un alto nivel de supervisión y control en TR, es posible conocer en TR los flujos de potencia suministrados a cada distribuidor de MT, el estado operativo de los interruptores de circuito y algunos datos adicionales proporcionados por el sistema de protección (tipo de falla, magnitudes de corrientes de falla, etc.).
- Red de distribución de MT (2.4kV-34.5kV): está compuesta por un conjunto de distribuidores de MT, su función es suministrar energía a las SE MT/BT. Su topología es mallada en áreas urbanas, y radial en áreas suburbanas y rurales. Tiene un bajo nivel de supervisión y control en TR, solo aproximadamente el 5 por ciento del total de dispositivos es supervisado en TR [10]. Generalmente es operada de forma radial, sin embargo en algunos SDEE, principalmente de Europa y Norteamérica, es común la instalación de generadores distribuidos de pequeña capacidad en las SE AT/MT y en menor medida en la red de distribución de MT. En este trabajo solamente se estudian redes de distribución de MT radiales, esta es la práctica más común en los SDEE latinoamericanos actuales.
- Subestaciones transformadoras de MT a BT (SE MT/BT): su función es reducir el nivel de tensión de MT a BT. Consisten de un transformador trifásico o de un banco de transformadores monofásicos de distribución y sus dispositivos de

⁵ En algunas clasificaciones se la considera parte del SDEE [83] y en otras como un subsistema del STEE [6] debido a que sus niveles de tensión se traslapan y sus prácticas operativas y de protección son muy similares [84].

protección y maniobra asociados (e.g., descargadores, fusibles, etc.). Suministran energía a uno o más circuitos de BT, vinculados a la subestación directamente o a través de un dispositivo de protección (interruptor o fusible de BT). El número total de SE MT/BT en un distribuidor de MT puede ser muy alto, por lo tanto generalmente tienen un bajo nivel de supervisión y control en TR.

- Red de distribución de BT (120V-600V): es alimentada por las SE MT/BT y suministra energía a las instalaciones de los clientes de BT. Su topología puede ser mallada o radial, pero es operada normalmente de forma radial. Es la red con menor supervisión y control en TR, esta tendencia está cambiando, principalmente en Norteamérica y Europa, con la introducción de los sistemas AMR [89].

2.1.1 Sistemas de información en SDEE.

Para hacer frente al ambiente competitivo resultado de la desregulación de los mercados eléctricos, las distribuidoras están moviéndose hacia la implementación e integración de:

- Sistemas de información diseñados para la gestión de negocios de la empresa, el procesamiento de datos comerciales, atención al cliente y administración de facilidades: BMS, CIS, AM/FM GIS.
- Sistemas de información diseñados para la supervisión, control y análisis del funcionamiento del SDEE: DA, SCADA, DMS, OMS.

Tradicionalmente estos sistemas han existido de forma aislada, en diferentes plataformas de hardware y combinando software comercial con aplicaciones desarrolladas por la distribuidora. La tendencia actual es integrar estas “islas de información” con el objetivo de mejorar la eficiencia global. Los costos asociados a la integración ocupan un porcentaje considerable dentro del presupuesto asignado por las distribuidoras para las tecnologías de la información y los resultados obtenidos son importantes. Por ejemplo, en [103] se indica que distribuidoras con sistemas de información integrados han reducido en más del 30 por ciento la duración promedio de sus interrupciones, en comparación con distribuidoras con sistemas no integrados. Además existen otros beneficios, como los derivados de la reducción del tamaño de las bases de datos. A continuación se describen brevemente las principales características y funciones de estos sistemas:

- *Business Management System (BMS)*: es un sistema cuyas funciones están diseñadas para asistir en la gestión de negocios de la distribuidora en mercados eléctricos competitivos, e.g., para realizar transacciones en el mercado spot, gestionar contratos, etc.
- *Customer Information System (CIS)*: es un sistema de información multi-funcional diseñado para la gestión de los procesos comerciales de la distribuidora (medición, facturación, etc.) y la atención y servicio al cliente (autorización de nuevos servicios, atención de reclamos, etc.). El CIS gestiona toda la relación entre el cliente y la distribuidora, por ejemplo durante una interrupción procesa las llamadas telefónicas recibidas, verifica si se deben a problemas comerciales u operativos y deriva los problemas operativos a otros sistemas para su resolución.

Las llamadas telefónicas son recibidas en el centro de llamadas o *call center*, el cual es una parte integral de los CIS modernos⁶. El centro de llamadas funciona en diferentes modalidades, las más comunes son mediante un representante de servicio al cliente (Customer Service Representative-CSR) o mediante sistemas de respuesta interactiva por voz (Interactive Voice Response-IVR). Esta tecnología tiene la ventaja de no requerir de la interacción humana y que el cliente está posibilitado tanto a adquirir información como a ingresar datos en la base de datos. En referencia a la base de datos del CIS, es necesario mencionar su importancia para la ejecución de funciones de otros sistemas de información de la distribuidora. Por ejemplo, la base de datos de consumos históricos de energía del CIS es muy útil para calcular las pseudo mediciones utilizadas en la EE del SDEE, una de las funciones fundamentales del DMS.

- *Geographic Information System (AM/FM GIS)*: es un sistema capaz de ensamblar, almacenar, manipular y visualizar información referenciada geográficamente, i.e., datos identificados de acuerdo a su ubicación. El AM/FM GIS integra operaciones comunes de bases de datos como interrogación o consulta (*query*) y análisis estadístico, con los beneficios de visualización y análisis geográfico de los mapas digitales. El AM/FM GIS contiene una base de datos completa y actualizada de todos los componentes del SDEE (postes, líneas de MT y BT, SE MT/BT, dispositivos de protección y maniobra, medidores de energía, etc.) y de los clientes. Sus capacidades gráficas son extremadamente útiles para la visualización y ubicación geográfica o espacial de los componentes y para la actualización de los cambios. Por ejemplo, permite ubicar los reportes de interrupción en un diagrama unifilar georeferenciado y determinar el conjunto de dispositivos de protección que posiblemente han causado la interrupción. Estos datos son utilizados por otros sistemas de información de la distribuidora (OMS, CIS, etc.) para la ejecución de procesos relacionados (e.g., gestión de interrupciones, atención al cliente, etc.).
- *Distribution Automation (DA)*: consiste en la ejecución automática de acciones inteligentes y coordinadas de control, para la corrección de violaciones de parámetros eléctricos (tensiones, flujos de potencia, etc.). Este proceso puede efectuarse mediante la utilización de los datos suministrados por el SCADA y procesados por el DMS o efectuando todo el proceso (adquisición de datos, procesamiento y análisis de resultados) en dispositivos inteligentes coordinados entre sí. El nivel de automatización, está determinado por las exigencias de CSE demandadas por los organismos reguladores y los clientes, estas exigencias deben justificar las grandes inversiones necesarias para implementar estos sistemas. Como se indicó anteriormente, los SDEE generalmente tienen un bajo nivel de supervisión y control en TR, esto imposibilita en la mayoría de los casos la implementación de funciones DA en los distribuidores de MT y limita su cobertura solamente a algunas SE AT/MT. Como excepciones se pueden citar los SDEE de los grandes centros urbanos de los países industrializados, en los que las exigencias de CSE son muy grandes y justifican las inversiones necesarias para implementar los sistemas DA. Se vislumbra que la evolución futura del SDEE, como resultado de la introducción de la generación distribuida (GD), impulsará la utilización de estos sistemas de forma más generalizada.

⁶ El centro de llamadas también puede ser un sistema de información independiente que suministra datos al CIS.

- *Supervisory Control And Data Acquisition (SCADA)*: es un sistema de información orientado a la supervisión y control remoto en TR de los dispositivos y equipos instalados en el SDEE. Los datos suministrados por el SCADA permiten supervisar el comportamiento del SDEE y controlar sus dispositivos y equipos en TR. Como la penetración del SCADA en la mayoría de los SDEE solamente alcanza las SE AT/MT y algunos puntos de los distribuidores, los “datos crudos” suministrados por el SCADA pueden ser insuficientes para realizar una evaluación completa del estado operativo del SDEE y tomar decisiones operativas confiables. Estas limitaciones han impulsado el desarrollo de los DMS, con el objetivo de contar con un sistema de apoyo para la operación del SDEE, que cuente con funciones de análisis no disponibles en el SCADA.
- *Distribution Management System (DMS)*: el DMS contiene las funciones básicas tradicionales del SCADA y funciones de análisis de funcionamiento presente y futuro del SDEE. Estas funciones sirven de apoyo para la operación en TR y para la planificación de la operación. Los principales objetivos del DMS son conocer el estado eléctrico de operación y el estado eléctrico óptimo del SDEE. Para ello procesa los “datos crudos” suministrados por otros sistemas de información de la distribuidora (SCADA, AM/FM GIS, CIS, etc.) utilizando herramientas computacionales especializadas (análisis de flujo de potencia, estimación de estado, análisis de cortocircuito, etc.). Los resultados son utilizados como referencia para ejecutar las acciones necesarias para la operación eficiente del SDEE (reconfiguración, control de tensión y potencia reactiva, etc.).
- *Outage Management System (OMS)*: es uno de los principales componentes del DMS, es un sistema de información orientado a asistir al operador del SDEE en las labores relacionadas con la gestión de interrupciones (localización de interrupciones y la restauración del servicio). Sus funciones principales son estimar la localización de las interrupciones y proponer la estrategia de restauración más conveniente. Sus funciones adicionales son documentar todas las operaciones que ocurren durante la gestión de interrupciones, para mantener registros actualizados de los índices de calidad y confiabilidad. Además debe suministrar estos datos al CIS, para mantener informados a los clientes afectados por las interrupciones, sobre el avance del proceso de restablecimiento del servicio y para atender sus consultas. La naturaleza de las funciones asignadas al OMS lo hacen muy dependiente de su integración con los demás sistemas de información de la distribuidora (SCADA, AM/FM GIS, CIS, etc.). Un evento en el OMS se inicia con un reporte de interrupción recibido del CIS o con una indicación de falla recibida del SCADA. La función del OMS es rastrear todos los reportes y alertar al operador de la presencia de una interrupción. Con estos datos y la base de datos AM/FM GIS, se identifican los dispositivos de protección responsables de las interrupciones y se ubican las fallas, si esto es posible. Luego se calcula la secuencia de maniobras de restauración, se generan las órdenes de reparación y se estima el tiempo de restablecimiento del servicio. Esta información es proporcionada al operador para iniciar la restauración y al CIS para notificar a los clientes afectados. Todos los datos recibidos y la secuencia de operaciones es almacenada en los registros históricos, para la elaboración de los índices de calidad y confiabilidad y para su utilización en otras funciones de análisis del SDEE.

Los sistemas de información disponibles actualmente en las distribuidoras (SCADA, CIS, AM/FM GIS), suministran “datos crudos” en TR (flujos de potencia medidos en la SE AT/MT, tipos de falla, corrientes de falla, etc.) y TRE (llamadas telefónicas). Además mantienen “datos crudos” en sus bases de datos (parámetros eléctricos de líneas de MT, consumos históricos de energía, etc.). El objetivo de esta investigación es desarrollar una metodología que procese estos “datos crudos” y los transforme en información útil (CO), que pueda ser utilizada por las funciones de análisis disponibles en el DMS / OMS (EE, localización de interrupciones y restauración) y sirva de referencia para la toma de decisiones operativas confiables. Esta metodología funcionaría en el ambiente de los DMS / OMS, por lo tanto se dispondría de los datos necesarios para su implementación, gracias a la integración existente entre los sistemas de información de la distribuidora. Además, en las bases de datos de los DMS / OMS se dispone de datos adicionales que también pueden ser utilizados (frecuencias de operación de dispositivos de protección, programa de mantenimiento de los distribuidores, etc.).

2.1.2 Red de distribución de MT.

La red de MT puede ser aérea o subterránea, las redes aéreas son las más utilizadas por razones económicas, sin embargo son más susceptibles al ambiente y tienen mayores tasas de fallas que las redes subterráneas, las cuales son utilizadas principalmente en zonas céntricas de grandes ciudades. La red de MT es poco confiable, de acuerdo a la literatura en una distribuidora típica aproximadamente el 60 por ciento del tiempo promedio de indisponibilidad del servicio por cliente por año, es debido a fallas en este nivel de tensión [90]. La red de MT puede ser trifásica, bifásica o monofásica, con neutro distribuido o retorno por tierra. Predominan las redes trifásicas, excepto en algunas zonas rurales donde son más comunes las líneas bifásicas y monofásicas⁷. La red de MT tiene muchos componentes, los de mayor interés para este trabajo son los dispositivos de protección y maniobra de MT. Sus características principales son [86]-[88]:

- Dispositivos de protección de MT: están ubicados en puntos estratégicos de los distribuidores de MT, pueden ser trifásicos o monofásicos. Su función es evitar daños en los elementos protegidos y riesgos a los clientes y personal de las distribuidoras. Como resultado de la operación radial y tipo de puesta a tierra⁸, los dispositivos de protección de MT se basan en el principio de detección de sobrecorriente. Su operación causa la desconexión de la carga y la interrupción del servicio a los clientes ubicados aguas abajo. Son coordinados de forma tal que el componente fallado sea aislado por la operación automática del dispositivo de protección más cercano, así se afecta a la menor cantidad de clientes posible. Los dispositivos de protección también pueden ser operados de forma programada, como parte de una estrategia de reconfiguración o restauración de la red de MT. Por razones económicas generalmente no son supervisados por el SCADA, por lo tanto no se conoce con certeza su estado operativo en TR. Los más utilizados son:

⁷ Por ejemplo, en los SDEE de las provincias argentinas, del 95 al 100 por ciento de las líneas primarias de MT son aéreas y del 1 al 2 por ciento son bifásicas o monofásicas con retorno por tierra [32].

⁸ Los más comunes en Latinoamérica son la puesta a tierra rígida y la puesta a tierra de baja impedancia, (sin neutro o con neutro distribuido con múltiples puestas a tierra).

- Reconectadores: son dispositivos con capacidad de interrupción de corrientes de falla. Se utilizan en coordinación con seccionadores y fusibles, realizan un número predefinido de operaciones de apertura y cierre para eliminar fallas transitorias o aislar fallas permanentes. Los reconectadores modernos basados en microprocesadores tienen funciones muy similares o inclusive superiores a las de los relevadores convencionales de sobrecorriente.
 - Seccionadores: son dispositivos sin capacidad de interrupción de corrientes de falla. Se utilizan en coordinación con reconectadores para aislar fallas permanentes, operan después de un número predefinido de aperturas del reconector ubicado aguas arriba.
 - Fusibles: son dispositivos con capacidad de interrupción de corrientes de falla. Generalmente son utilizados en coordinación con reconectadores y seccionadores (u otros fusibles) para aislar fallas permanentes. Básicamente consisten de un elemento metálico que se funde ante la circulación de una sobrecorriente, interrumpiendo su paso. Por lo tanto es necesario reemplazarlos cada vez que operan.
- Dispositivos de maniobra de MT: son dispositivos sin capacidad de protección (e.g., seccionadoras e interruptores de distribución). Se utilizan para reconfigurar la red de MT en condiciones de emergencia, mantenimiento o para optimizar su funcionamiento. Son dispositivos trifásicos y están ubicados en puntos estratégicos de los distribuidores de MT, su estado operativo puede ser normalmente abierto o normalmente cerrado. Los dispositivos normalmente abiertos están ubicados en puntos donde se encuentran dos distribuidores, se les denomina dispositivos de enlace y delimitan el área de servicio de cada distribuidor. Los dispositivos normalmente cerrados están ubicados en puntos intermedios de un distribuidor, se les denomina dispositivos de seccionamiento. Por razones económicas generalmente no son supervisados por el SCADA⁹, esto limita su utilización en esquemas con operación automática (e.g., transferencia automática de carga), por motivos de seguridad operativa y del personal. Su operación (sea manual o remota) siempre es autorizada por el operador del SDEE, por lo tanto siempre se conoce su estado operativo, independientemente de si el dispositivo es supervisado o no.

2.1.3 CO de la red de distribución de MT.

La CO se define como el estado operativo de los dispositivos de protección y maniobra instalados en la red de MT. El bajo nivel de supervisión de la red de MT hace que la CO sea prácticamente desconocida, solamente se tiene una idea aproximada del estado operativo de algunos dispositivos. La extensión, dinámica, heterogeneidad y gran cantidad de componentes de la red de MT dificultan la inferencia de la CO.

La red de MT está compuesta por m distribuidores, estos distribuidores forman una red de topología mallada pero operada de forma radial. Los dispositivos de enlace delimitan el área de servicio de cada distribuidor. En vista que estos dispositivos no operan automáticamente, la CO de cada distribuidor es independiente de la CO del resto de la red. Las modificaciones

⁹ En adelante al referirse a esta característica de los dispositivos de protección y maniobra de MT, solamente se utilizan los términos “supervisados” y “no supervisados”.

de la CO de cada distribuidor solamente pueden deberse a cambios en el estado operativo de sus dispositivos. Esta simplificación permite descomponer el problema principal de inferir la CO de una red de MT de m distribuidores, en m sub-problemas independientes, uno por cada distribuidor. Esto se observa en la Fig. 2.1, los dispositivos de enlace (d_8 y d_9) no pueden operar automáticamente, por lo tanto mantienen aislado al distribuidor A_1 del resto de la red de MT. Los cambios en la CO de los distribuidores vecinos (A_2 y A_3) no modifican la CO del distribuidor A_1 .

Esta simplificación reduce la complejidad del problema, solamente es necesario desarrollar una metodología de inferencia de la CO para un distribuidor genérico. Luego, para inferir la CO de una red de m distribuidores, se analiza cada distribuidor individualmente. Esto no representa un problema significativo desde el punto de vista computacional, debido a que solamente es necesario analizar aquellos distribuidores en los que se ha detectado un posible cambio de su CO y es prácticamente imposible que ocurran cambios simultáneos en todos los distribuidores. Basándose en este análisis, en adelante este trabajo se centrará en el problema de inferir la CO de un distribuidor de MT.

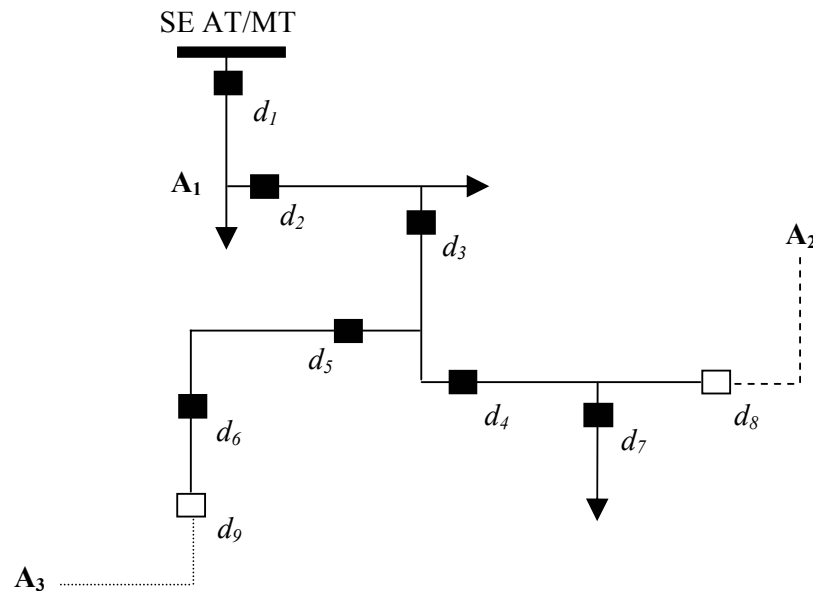


Fig. 2.1 Distribuidor típico de MT

2.1.4 Operación de la red de distribución de MT.

En un distribuidor de MT existen dos tipos de operaciones o cambios en el estado operativo de sus dispositivos:

- Operación programada: es un cambio previsto en el estado operativo de un dispositivo de protección o maniobra. Es realizado de forma manual o remota, con la autorización del operador. Las operaciones programadas causan interrupciones previstas y modifican la CO de un estado inicial conocido a un estado final también conocido, por lo tanto no son de interés para este trabajo.
- Operación no programada: es un cambio imprevisto en el estado operativo de un dispositivo de protección. Es realizado automáticamente, sin la intervención del

- operador. Por lo tanto, si el dispositivo involucrado no es supervisado, no se conoce con precisión su estado operativo final. Las operaciones no programadas causan interrupciones imprevistas y modifican la CO de un estado inicial que puede ser conocido o desconocido, a un estado final desconocido. Las operaciones no programadas son las más frecuentes. En [86] se indica que aproximadamente el 80 por ciento del total de interrupciones experimentadas por los clientes ocurren debido a fallas en el SDEE. Evidentemente estas fallas implican la operación no programada de los dispositivos de protección. En [91] se presentan datos de un pequeño SDEE, en el que las interrupciones causadas por operaciones no programadas contribuyen con aproximadamente el 85 por ciento de la frecuencia y duración promedio de interrupciones por cliente por año. Por estas razones, las operaciones no programadas son de interés para este trabajo.

Del análisis anterior se concluye que para conocer la CO de un distribuidor de MT solamente es necesario inferir el estado operativo de sus dispositivos de protección, porque solamente estos pueden modificar su estado operativo de forma imprevista, sin la intervención del operador. Los dispositivos de maniobra en cambio, solamente pueden cambiar de estado con intervención del operador.

Dentro de los dispositivos de protección, evidentemente son de mayor interés los no supervisados, debido a que su estado operativo no es conocido con precisión y porque es aceptable asumir que el estado operativo de los dispositivos de protección supervisados es conocido con precisión, en todo instante. Sin embargo, en caso que sea necesario, también es posible inferir el estado operativo de los dispositivos de protección supervisados, por ejemplo para verificar si existen errores de medición o comunicación. Esto implica que la metodología debe ser capaz de inferir la CO aún en el peor de los casos, i.e., asumiendo que no existen dispositivos de protección supervisados.

En el contexto de este trabajo son de interés solamente las operaciones no programadas de los dispositivos de protección. Estas producen la desconexión de carga e interrupción del servicio a los clientes ubicados aguas abajo de los dispositivos involucrados¹⁰. Pueden ser causadas principalmente por sobrecargas en los componentes, errores de coordinación de protecciones o fallas en la red de MT. Las sobrecargas no ocurren con frecuencia en la red de MT, son más comunes en las redes de BT. Los errores de coordinación tienen una probabilidad de ocurrencia baja y se consideran esencialmente problemas de planificación. Las fallas en cambio son muy frecuentes, particularmente en redes aéreas y son debidas primordialmente a fenómenos climatológicos e.g., descargas atmosféricas y a problemas relacionados con el mantenimiento¹¹, e.g., contacto de árboles con las líneas de MT [87], [92]. Las fallas en redes de distribución de MT pueden ser clasificadas como:

- Fallas transitorias: causan cambios transitorios de la CO, i.e., cambios transitorios en el estado operativo de los dispositivos de protección (e.g., apertura de contactos durante los intervalos de reconexión o tiempos muertos de los reconectores).

¹⁰ Por la similitud de sus efectos con los causados por la operación de los dispositivos de protección, en la sección 5.6.5 también se estudian las fallas de conductor abierto, las cuales podrían ser consideradas como un caso especial de las operaciones no programadas.

¹¹ En [89] se muestran los resultados de un estudio realizado en una distribuidora estadounidense, de acuerdo al cual aprox. el 30 y 25 por ciento de las interrupciones son causadas por problemas relacionados con el clima (descargas atmosféricas, tormentas) y el mantenimiento (árboles, envejecimiento, falla de equipos) respectivamente. Las sobrecargas solamente causan el 2 por ciento de las interrupciones.

Estas fallas representan aproximadamente del 70 al 90 por ciento de las fallas en SDEE [87], [88], [93] y solamente causan interrupciones transitorias¹².

- Fallas permanentes: pueden ser clasificadas como [87]:
 - Fallas de baja impedancia [93], [94]: son las fallas permanentes más comunes. Producen magnitudes de corrientes de falla dentro del rango de coordinación de los dispositivos de protección, causando su operación. Los valores más comunes de impedancia de falla (Z_f) se encuentran entre los 5Ω y 25Ω . Los valores más comunes de Z_f utilizados para la coordinación de protecciones se encuentran entre los 0Ω y 40Ω . Estas fallas causan cambios permanentes de la CO, i.e., cambios permanentes en el estado operativo de los dispositivos de protección (e.g., operación de fusibles, bloqueo de reconectadores¹³). Estas fallas causan interrupciones permanentes y pueden ser clasificadas de acuerdo al número de fases involucradas en la falla como, monofásicas, bifásicas con y sin contacto a tierra y trifásicas.
 - Fallas de alta impedancia [93]-[100]: son menos frecuentes que las fallas de baja impedancia. Estas fallas no causan la operación de los dispositivos de protección por sobrecorriente convencionales (fusibles, reconectadores y relevadores), porque sus magnitudes de corrientes de falla son menores que las corrientes de falla mínimas identificables por estos dispositivos. Sus magnitudes de corrientes de falla pueden ser del mismo orden que las corrientes de carga de los distribuidores o inclusive menores, dependiendo de la superficie sobre la cual ocurra la falla. Por lo tanto, para su identificación son necesarios dispositivos de protección especializados. Una vez que son detectadas e identificadas, son eliminadas mediante la operación programada del interruptor de circuito o del dispositivo ubicado más cerca de la falla. Por esta razón, no son consideradas en este trabajo¹⁴. Estas fallas pueden ser clasificadas como fallas activas y pasivas, las cuales se caracterizan por la presencia o ausencia de un arco eléctrico, respectivamente.

En el contexto de este trabajo son de interés solamente las fallas permanentes de baja impedancia, porque son las más frecuentes y son las únicas que causan modificaciones permanentes y no programadas de la CO, i.e., hasta que la falla es despejada o el componente dañado es reparado o reemplazado y los dispositivos de protección involucrados retornan a su estado operativo normal. Las fallas transitorias no tienen este efecto, porque generalmente son eliminadas mediante las operaciones automáticas de apertura y cierre de los reconectadores, sin que estos lleguen al bloqueo.

¹² Interrupciones cuya duración es muy corta, menor a un valor límite que oscila entre 1 y 5 minutos, de acuerdo a la regulación vigente. Las interrupciones cuya duración es mayor a este valor límite son consideradas permanentes [4].

¹³ Bloqueo (*lockout*) es la apertura permanente del reconectador, después de haber realizado todas sus operaciones predefinidas de apertura y cierre, se llega a esta condición en presencia de fallas permanentes.

¹⁴ En algunos sistemas con puesta a tierra compensada o aislados se utiliza la operación sostenida con falla [18]. Este tipo de operación no es factible en SDEE con puesta a tierra rígida o de baja impedancia.

2.2 Inferencia de la CO.

2.2.1 Inferencia en TR.

Cuando una falla permanente ocurre en un distribuidor de MT, una corriente de falla es detectada y posteriormente eliminada por la operación del dispositivo de protección ubicado más cerca de la falla (reconectador, seccionalizador o fusible). Esta operación modifica la CO y el flujo de potencia activa suministrado al distribuidor (P_A), como se muestra en la Fig. 2.2, donde P_a y P_b son los flujos de potencia activa suministrados al distribuidor antes y después de la operación del dispositivo de protección y $\Delta P = P_a - P_b$ es la potencia activa desconectada.

Actualmente, muchas SE AT/MT tienen modernos relevadores de sobrecorriente basados en microprocesadores, los cuales son capaces de clasificar las fallas y registrar la magnitud de las corrientes de falla (I_{sc}) [21], [22], [24], [88], [101]. La potencia activa desconectada y los datos de las corrientes de falla pueden ser reportados al centro de control por medio del SCADA, de su análisis conjunto es posible identificar el dispositivo de protección operado y obtener la nueva CO del distribuidor. Esto es particularmente cierto si el nivel de supervisión del distribuidor es alto (e.g., múltiples dispositivos supervisados, detectores de falla instalados en puntos estratégicos de los distribuidores, dispositivos DFR¹⁵ instalados en las SE AT/MT, dispositivos AMR instalados masivamente, etc.) o si algunas incertidumbres no son tomadas en cuenta (e.g., valores de los flujos de potencia a través de los dispositivos de protección, valor de la impedancia de falla, etc.). En este sentido, se han presentado aportes importantes en [22], [26]-[30].

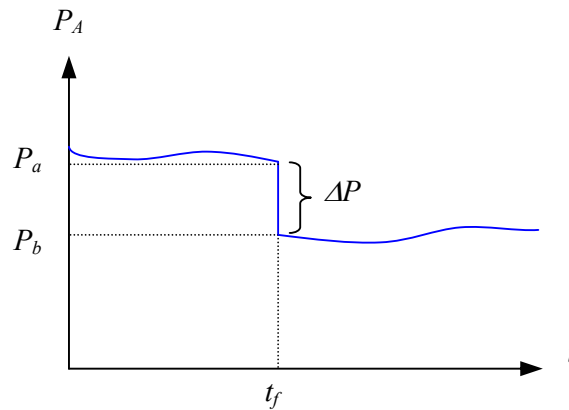


Fig. 2.2 Variación de flujo de potencia activa suministrado a un distribuidor de MT.

Debido a las características topológicas de los distribuidores de MT y a las limitaciones logísticas derivadas de su bajo nivel de supervisión, en muchas ocasiones los datos de TR son insuficientes para calcular una CO definitiva e indisputable [27]. Por ejemplo, es posible que dos dispositivos de protección, ubicados en puntos extremos de un mismo distribuidor, tengan niveles de cortocircuito y flujos de potencia similares. En caso que una falla cause la operación de uno de estos dispositivos, utilizando ΔP e I_{sc} seguramente no será posible identificar con precisión cual de los dos efectivamente ha operado. En estas situaciones

¹⁵ *Digital Fault Recorder*: dispositivo que registra la forma de onda de las corrientes y tensiones de falla, es utilizado comúnmente para el análisis y diagnóstico de fallas principalmente en STEE y SGEE y en menor medida en SDEE.

solamente es posible reducir el espacio de solución inicial hasta obtener un pequeño grupo de soluciones candidatas. Para mejorar los resultados se pueden utilizar datos cuantitativos obtenidos del análisis de la historia de operación de los distribuidores [21], específicamente la frecuencia de operaciones (no programadas) de los dispositivos de protección.

Un problema importante que se presenta en la utilización de la frecuencia de operación de los dispositivos de protección, es que la confiabilidad de los distribuidores de MT puede ser modificada significativamente por el mantenimiento, aspecto que no es considerado en la mayoría de las propuestas. Por ejemplo, un dispositivo puede tener una alta frecuencia de operación, debido a fallas causadas principalmente por el contacto de árboles con la línea de MT. Si se realiza mantenimiento (e.g., podando los árboles cercanos a la línea), la frecuencia de operación del dispositivo, a partir de ese momento, seguramente será muy baja. En esta situación los datos históricos de operación pierden validez y su utilización puede provocar la toma de decisiones operativas equivocadas. *Por lo tanto, también es necesario considerar la interrelación entre la frecuencia de operación de los dispositivos y el mantenimiento, a fin de tomar decisiones operativas confiables. Este es uno de los aportes de este trabajo.*

Lamentablemente, en muchas distribuidoras los datos históricos cuantitativos pueden ser escasos y/o imprecisos, lo cual dificulta su utilización para tomar decisiones operativas. En contraste los datos históricos cualitativos y las reglas basadas en el conocimiento experto son abundantes, aunque subjetivas y también imprecisas, debido a la naturaleza del lenguaje humano. Sin embargo, son exitosamente utilizadas por los operadores y cuadrillas, para compensar la escasez de datos históricos cuantitativos y transmitir sus conocimientos durante la operación diaria de la red, especialmente durante emergencias (e.g., gestión de interrupciones). Los datos cualitativos (e.g., expresiones lingüísticas) también son utilizados para describir los factores externos que afectan el desempeño de los distribuidores (e.g., clima). Las reglas vinculan lógicamente todos estos datos para tomar las decisiones operativas correspondientes. El conocimiento transmitido de esta manera es suficiente para lograr una comprensión rápida y correcta de la historia reciente de un distribuidor y de sus características, asimismo para realizar deducciones lógicas sobre su estado actual. En este punto es importante resaltar la capacidad del ser humano de obtener resultados muy satisfactorios utilizando datos cualitativos y conocimiento experto, esto se debe a su habilidad para tomar decisiones en ambientes altamente inciertos. Además, es capaz de integrar datos cuantitativos y cualitativos. Estas capacidades son muy difíciles de emular utilizando técnicas matemáticas tradicionales [102].

Del análisis anterior se concluye que es posible inferir la CO utilizando:

- Datos suministrados en TR por el SCADA: potencia activa desconectada (ΔP) y magnitud de corriente de falla (I_{sc}).
- Datos históricos de operación: almacenados en bases de datos (cuantitativos) o basados en conocimiento experto (cualitativos), e.g., frecuencia de operación de los dispositivos de protección, programa de mantenimiento, etc.
- Datos sobre factores externos que afectan el desempeño de la red de MT: clima.
- Reglas basadas en conocimiento experto.

Un punto reconocido en la literatura es la necesidad de integrar todos los datos disponibles para reducir la incertidumbre de los resultados [21], esto no representa un problema

importante cuando todos los datos son cuantitativos. *Sin embargo, la integración de datos de naturaleza diferente (cuantitativos y cualitativos) representa un desafío, la solución de este problema es uno de los aportes de este trabajo.*

Es importante reconocer que aún integrando todos los datos indicados, es posible que no se logre identificar con suficiente precisión al dispositivo de protección que ha operado y que solamente se obtenga una solución aproximada del problema. Sin embargo, seguramente se reducirá el espacio de búsqueda considerablemente, permitiendo la toma de algunas decisiones operativas que no necesariamente requieren de gran precisión. Por ejemplo, se puede verificar si una zona del distribuidor ha sido interrumpida, pidiendo a una cuadrilla que se encuentre cerca que haga una inspección, realizando una llamada telefónica a un cliente importante (e.g., fábrica, hospital, centro comercial, etc.) o esperando a recibir las llamadas telefónicas de los clientes afectados.

En cualquiera de los casos, lo más conveniente es utilizar como punto de partida los resultados preliminares calculados en TR y posteriormente utilizar los datos de TRE (e.g., llamadas telefónicas) a medida que estos sean recibidos. Así es posible mejorar progresivamente la solución inicial aproximada y obtener una solución definitiva. Siguiendo este procedimiento dinámico se utilizan al máximo los datos disponibles a cada momento. Así no se depende exclusivamente de los datos de TR, tampoco se pierde tiempo valioso (desde el punto de vista de la CSE) utilizando solamente los datos de TRE y la precisión de la solución aumenta dinámicamente a medida que transcurre el tiempo, i.e., a medida que se reciben más datos de TRE. Este procedimiento implica realizar una inferencia dinámica de la CO en TRE, para lo cual es necesario considerar las incertidumbres presentes en los datos de TRE, particularmente en las llamadas telefónicas de los clientes afectados por las interrupciones [2], [5]. *El desarrollo de una metodología que considera todos estos aspectos es uno de los aportes de este trabajo.*

2.2.2 Inferencia en TRE.

Tradicionalmente, la solución del problema de la inferencia de la CO ha dependido principalmente de las llamadas telefónicas de los clientes afectados por las interrupciones¹⁶ y de las inspecciones de los distribuidores de MT, debido a los escasos datos de TR comúnmente disponibles en este nivel [13]-[20]. Sin embargo, los reportes de los clientes pueden no ser recibidos inmediatamente después que las interrupciones han ocurrido [2], [5]. Además, varias llamadas telefónicas o inspecciones de los distribuidores pueden ser necesarias para localizar los dispositivos operados. Estas limitaciones tienden a aumentar la duración de las interrupciones a niveles inaceptables, produciendo el correspondiente deterioro de la CSE y penalizaciones económicas para las distribuidoras.

En años recientes, los sistemas SCADA se han vuelto accesibles en las SE AT/MT, suministrando importantes datos de TR a muchas aplicaciones. Sin embargo la cobertura del SCADA en los distribuidores de MT, es generalmente aún insuficiente para obtener una evaluación precisa de la CO utilizando solamente datos de TR [1], [5]. En este sentido, se ha observado que un procedimiento conveniente para inferir la CO es integrar los datos suministrados por las llamadas telefónicas y por el SCADA [1], [5], [9], [11], [24]-[26],

¹⁶ El análisis de las llamadas telefónicas para identificar los dispositivos de protección operados, es un procedimiento conocido en la literatura como *trouble call analysis*.

[31], [103]-[109]. Así sus deficiencias individuales son superadas y sus ventajas son completamente explotadas. Los principales desafíos de este procedimiento son la integración de los resultados obtenidos en TR y los datos recibidos en TRE, así como la consideración de las incertidumbres asociadas a las llamadas telefónicas de los clientes afectados.

En la literatura solamente la propuesta presentada en [5], [9], [31] y [109] trata detalladamente el problema de la integración de datos de TR y TRE, considerando algunas incertidumbres. Sin embargo estas propuestas dependen en gran medida de los reportes de interrupción suministrados por dispositivos AMR. Actualmente no se dispone de estos dispositivos en gran escala en los SDEE latinoamericanos, lo cual limita la aplicación de esta metodología. Otra desventaja es que a pesar de disponer de datos suministrados por el SCADA, estos no son analizados de forma individual y detallada, solo se les utiliza de forma global, como referencia para evaluar cualitativamente la probabilidad de presencia de interrupciones, desaprovechando información valiosa que puede ser de gran utilidad. Tampoco se consideran los datos históricos de operación de la red de MT y la influencia del clima sobre el desempeño de los distribuidores solamente es mencionada como una posible variable de interés. Sin embargo, sí se considera la incertidumbre asociada a las llamadas telefónicas de los clientes. En [26] también se propone la integración determinística de datos de TR y TRE, en esta publicación se propone el procesamiento de los datos suministrados por el SCADA, sin embargo no se consideran las incertidumbres asociadas a los flujos de potencia de los dispositivos de protección y a la impedancia de falla. Además, el tratamiento de las llamadas telefónicas es determinístico, en contraste con el propuesto en [5].

En este trabajo las limitaciones mencionadas son superadas utilizando dos modelos. En el primer modelo se realiza una inferencia de la CO en TR, mediante el procesamiento e integración de los datos suministrados por el SCADA, datos históricos de operación, clima y conocimiento experto. En el segundo modelo se realiza una inferencia dinámica en TRE, mediante la integración de los resultados de TR y los datos de TRE. El modelo de TR está basado en los sistemas de lógica fuzzy tipo 2 (T2-FLS) y el modelo de TRE en el diagnóstico utilizando ecuaciones relacionales fuzzy. Ambos modelos son explicados en el siguiente capítulo.

CAPITULO 3

3 Modelación matemática.

Este capítulo se divide en dos secciones, en la primera sección se presenta el modelo de inferencia de la CO en TR (CO_{TR}) y en la segunda sección se presenta el modelo de inferencia de la CO en TRE (CO_{TRE}).

3.1 Modelo de inferencia de la CO en TR (CO_{TR}).

Como se explicó en la sección 2.2.1, para inferir la CO en TR, es necesario integrar datos cuantitativos y cualitativos y reglas basadas en conocimiento experto, para compensar sus deficiencias y aprovechar sus ventajas. En este trabajo, para fusionar ambos tipos de datos se propone utilizar un sistema de lógica fuzzy tipo 2 basado en reglas (T2-FLS).

Los T2-FLS proveen un marco de referencia matemático robusto, capaz de modelar la incertidumbre del lenguaje natural y calcular utilizando expresiones lingüísticas y valores numéricos. Los datos de entrada del T2-FLS pueden ser números, palabras o una combinación de ambos, representados matemáticamente mediante la teoría de números fuzzy¹⁷ [110]-[112]. Los resultados del T2-FLS también son números y palabras. Los resultados numéricos son un valor central y un intervalo de incertidumbre que representa la confianza de la solución. Los resultados lingüísticos son palabras que facilitan la comprensión de los resultados numéricos y su transmisión mediante el lenguaje natural. En este sentido, esta propuesta se enmarca dentro de los conceptos de computación con palabras (computing with words) y computación perceptiva (perceptual computing) [102], [113], [114] y representa uno de los aportes de este trabajo.

3.1.1 Modelo matemático del distribuidor de MT en TR.

Cada vez que ocurre una falla permanente en un distribuidor, esta causa la operación de un dispositivo de protección y la desconexión de carga. Inmediatamente después de este evento, se reciben los siguientes datos en el centro de control.

- La variación de la potencia activa entregada al distribuidor (ΔP).
- El tipo de falla (monofásica, bifásica, trifásica) y la magnitud de la corriente de falla medida en la SE AT/MT (I_{sc}).

Adicionalmente se cuenta con la base de datos históricos de operación del sistema de distribución (frecuencia de operación de dispositivos, programas de mantenimiento, etc.). Utilizando estos datos es posible obtener una solución inicial rápidamente, si los resultados son concluyentes, se finaliza la inferencia y una nueva CO es obtenida (CO_{TR}). En este caso no es necesario utilizar datos de TRE (llamadas telefónicas) y las cuadrillas pueden ser despachadas de inmediato a la zona afectada, reduciendo el tiempo de restauración y evitando un deterioro mayor de la CSE. En este caso, la CO_{TR} puede ser utilizada directamente para realizar la EE de la red de MT.

¹⁷ La teoría básica de los conjuntos fuzzy y T2-FLS se presenta en el anexo A.

Debido a las características operativas, logísticas y topológicas de la red de MT, ninguna fuente de datos de TR por sí sola proporciona suficiente información para identificar la CO con precisión [1], [5], [26], [27]. Por ejemplo, en un distribuidor de MT pueden existir varios dispositivos de protección con flujos de potencia similares, estos dispositivos generalmente no son supervisados por el SCADA, por lo tanto sus flujos de potencia (P_i) se conocen solamente de forma aproximada. Entonces, si uno de estos dispositivos de protección opera para aislar una falla, no es posible identificarlo con precisión utilizando únicamente ΔP . Asimismo, pueden existir muchos dispositivos de protección que protegen zonas con los mismos niveles de cortocircuito. Si una falla ocurre en alguna de estas zonas, no es posible identificar con precisión que dispositivo de protección ha operado, utilizando únicamente I_{sc} . El tipo de falla puede ser utilizado para discriminar algunas zonas del distribuidor (e.g., una falla trifásica no puede ocurrir en una zona donde solamente existen una o dos fases). Sin embargo, las fallas permanentes más comunes son las monofásicas (aproximadamente el 70 por ciento del total [86]) y estas pueden ocurrir en cualquier zona del distribuidor. Por lo tanto, no es posible identificar con precisión el dispositivo de protección que ha operado, utilizando únicamente el tipo de falla. Lo mismo puede decirse de los datos históricos de operación, los cuales son naturalmente imprecisos.

En cambio, si se integran todos los datos disponibles en TR, la precisión de los resultados puede mejorar sustancialmente. Por ejemplo, si la potencia activa desconectada detectada es trifásica ($\Delta P_{3\phi}$) y el tipo de falla identificado es monofásico ($I_{sc1\phi}$), puede inferirse que el dispositivo que ha operado es trifásico (reconectador o seccionalizador). Esta deducción reduce el espacio de búsqueda significativamente, porque el número total de reconectadores y seccionalizadores instalados en un distribuidor de MT es pequeño. Además, conviene utilizar ΔP e I_{sc} conjuntamente, para descartar algunas “falsas alarmas” o “situaciones confusas”. Por ejemplo, una desconexión programada de carga (e.g., parte de un proceso industrial), puede ser confundida con la operación de un dispositivo de protección. La utilización conjunta de ΔP e I_{sc} puede ayudar a descartar a la mayoría de estas situaciones. Así solamente es necesario prestar atención a algunos casos especiales, en los que ΔP representa un porcentaje considerable de la demanda total del distribuidor (mayor que un valor límite predefinido). Estos casos pueden ser causados, por ejemplo, por la operación por sobrecarga de un fusible ubicado en una derivación importante, debido a un crecimiento imprevisto de la demanda.

Del análisis anterior, se observa que un procedimiento más conveniente para identificar los dispositivos de protección que han operado, es utilizar conjuntamente todos los datos disponibles en TR. Esto se debe a que es menos común que varios dispositivos de protección tengan flujos de potencia, niveles de cortocircuito e historia de operación similares. Aún utilizando este procedimiento, es difícil obtener una solución definitiva e indisputable, debido a las incertidumbres asociadas a los datos disponibles. Sin embargo, es posible reducir el espacio de búsqueda de la solución considerablemente y obtener un pequeño grupo de dispositivos candidatos. Es conveniente ordenar estos dispositivos de acuerdo a la seguridad o certeza que se tiene sobre su operación, i.e. de acuerdo a la “confianza” que se tiene sobre los resultados. Para asociar los datos disponibles, se pueden utilizar reglas heurísticas basadas en conocimiento experto. Por ejemplo, intuitivamente es válido afirmar que mientras más “parecidos” son ΔP e I_{sc} al flujo de potencia (P_i) y nivel de cortocircuito (I_k) de un dispositivo de protección genérico (d_i), mayor certeza o seguridad se tiene que d_i es el dispositivo que en realidad ha operado. Este es el tipo de deducción que los operadores

realizan durante la gestión de interrupciones, obteniendo generalmente resultados exitosos. Por lo tanto, es deseable disponer de una metodología basada en este tipo de inferencia.

En la Fig. 3.1 se muestra un modelo de un distribuidor de MT, en el que cada dispositivo de protección (d_i) es representado de forma genérica, independientemente de su tipo (reconectador, seccionalizador, fusible). Aquí m_j representa la zona protegida por cada d_i .

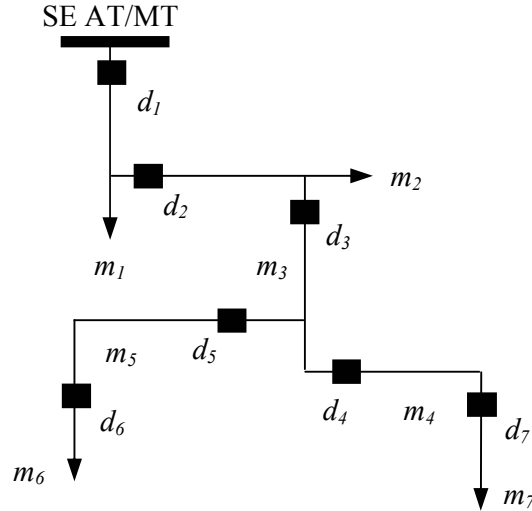


Fig. 3.1 Modelo simplificado del distribuidor de MT.

Desde la perspectiva de TR, el problema de inferir la CO se resume en calcular la certeza de operación de cada d_i (μc_i^+) y posteriormente evaluar la condición de decisión (3.1). Donde (μc_i^{+min}) es un valor de decisión definido en función de las características del problema, este punto es explicado detalladamente en la sección 4.1.4. Los dispositivos que satisfacen la condición de decisión son seleccionados como candidatos para la operación.

$$\mu c_i^+ > \mu c_{i min}^+ \quad (3.1)$$

Si solamente un dispositivo satisface la condición de decisión entonces finaliza la inferencia y se identifica la nueva CO (CO_{TR}). Si más dispositivos satisfacen la condición de decisión, entonces es necesario utilizar datos de TRE para finalizar la inferencia de la CO (CO_{TRE}). En este trabajo μc_i^+ es calculada mediante el T2-FLS de la Fig. 3.2.

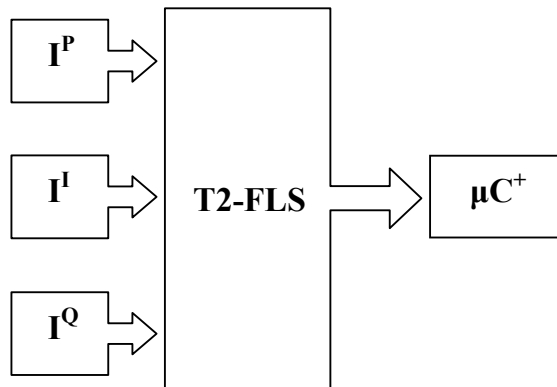


Fig. 3.2 Esquema simplificado del T2-FLS propuesto para el cálculo de μc_i^+ .

Las entradas y salida del T2-FLS son vectores de n elementos, donde n es el número total de dispositivos de protección del distribuidor (3.2)-(3.5). A los vectores de entrada se les denomina índices de operación, los procedimientos utilizados para su cálculo se explican detalladamente en las secciones 4.1.1-4.1.3.

$$\mathbf{I}^P = \begin{bmatrix} I_1^P & I_2^P & \dots & I_n^P \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

$$\mathbf{I}^I = \begin{bmatrix} I_1^I & I_2^I & \dots & I_n^I \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$\mathbf{I}^Q = \begin{bmatrix} I_1^Q & I_2^Q & \dots & I_n^Q \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$\boldsymbol{\mu C}^+ = \begin{bmatrix} \mu c_1^+ & \mu c_2^+ & \dots & \mu c_n^+ \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Cada elemento de (3.2)-(3.5) es una variable asociada a d_i , el dominio de todas las variables es el intervalo $[0, 1]$. Mientras más cercano a uno es el valor de las variables de entrada (I_i^P , I_i^I , I_i^Q), mayor es su influencia sobre la variable de salida (μc_i^+). Mientras más cercano a uno es el valor de μc_i^+ , mayor certeza se tiene sobre la operación de d_i .

- I_i^P : evalúa la certeza de operación de d_i basándose en el análisis de ΔP y P_i .
- I_i^I : evalúa la certeza de operación de d_i basándose en el análisis de I_{sc} y los niveles de cortocircuito (I_k) de su zona (m_j).
- I_i^Q : evalúa la certeza de operación de d_i basándose en el análisis de los datos cuantitativos y cualitativos relacionados con la CSE. Aquí se considera la historia de operación de d_i (frecuencia de operación), de mantenimiento de su zona (m_j) y los factores externos que afectan el desempeño del distribuidor (clima).
- μc_i^+ : certeza de operación de d_i .

Se observa que la certeza de operación de d_i (μc_i^+) es una función de I_i^P , I_i^I e I_i^Q (3.6), el T2-FLS realiza el mapeo del espacio de entrada al espacio de salida de esta función, utilizando una base de reglas definidas basándose en el conocimiento experto de los operadores.

$$\mu c_i^+ = f(I_i^P, I_i^I, I_i^Q) \quad (3.6)$$

3.2 Modelo de inferencia de la CO en TRE (CO_{TRE}).

Como se explicó en el capítulo anterior para resolver el problema de la inferencia de la CO en TRE, se utilizan los resultados obtenidos mediante el modelo de TR y los datos de TRE, principalmente las llamadas telefónicas de los clientes afectados por la interrupción. Para resolver este problema, en este trabajo se propone un modelo de diagnóstico basado en ecuaciones relacionales fuzzy e inferencia abductiva fuzzy¹⁸. El objetivo de este modelo es mejorar los resultados obtenidos por el modelo de TR (CO_{TR}) y obtener una solución en TRE (CO_{TRE}), esta solución es mejorada dinámicamente a medida que se reciben más llamadas telefónicas.

¹⁸ La teoría básica de la inferencia abductiva se presenta en el anexo D.

Un problema de diagnóstico es un problema en el cual, dado un conjunto de efectos (manifestaciones, síntomas), se deben explicar las causas de esas observaciones [123]. Problemas de este tipo son muy comunes, e.g., diagnosticar los síntomas de un paciente en medicina, localizar una falla en un circuito, etc. La identificación de la CO en TRE es un problema de diagnóstico de fallas en el cual, dadas las llamadas telefónicas de los clientes afectados (o los reportes de las cuadrillas), el objetivo es identificar los dispositivos de protección que han operado.

Para resolver este problema de diagnóstico es necesario considerar la información adicional disponible (los resultados de la inferencia en TR, las relaciones causa-efecto existentes entre los dispositivos de protección y los grupos de clientes, etc.). Los problemas de diagnóstico de fallas han sido tratados mediante varias clases de técnicas dependiendo del tipo de falla a ser detectada o aislada y del conocimiento disponible. Entre estas técnicas, los modelos relacionales fuzzy son particularmente de interés en este trabajo porque son adecuados para manejar incertidumbres de forma no probabilística, i.e., estos modelos no presuponen la capacidad de cuantificar probabilidades condicionales y tampoco asumen que se dispone de las probabilidades previas de los modos de falla [115]. Esta es una cualidad importante porque en muchos SDEE, no existen suficientes datos para calcular con precisión las probabilidades previas de ocurrencia de fallas utilizadas por otros modelos de diagnóstico [119].

Los modelos relacionales fuzzy son una metodología de razonamiento abductivo, el cual se define como el proceso de razonar de principios a hechos, bajo incertidumbre, utilizando medidas numéricas. El razonamiento abductivo es conducido de la siguiente manera: “**M** es cierto si **D** es cierto, si **M** es observado entonces hay razones para creer que **D** es cierto”. Contrasta con el razonamiento deductivo, el cual es el proceso de inferir una conclusión a partir de observaciones, de tal forma que si las premisas son conocidas con certeza, entonces la conclusión es cierta. También contrasta con el razonamiento inductivo, el cual es el proceso de razonar a partir de ejemplos específicos para obtener principios generales. De acuerdo a la literatura, la abducción preserva la explicación, la deducción preserva la verdad y la inducción preserva la consistencia [120]. Los modelos relacionales fuzzy describen la asociación de causas (desórdenes, enfermedades, etc.) y efectos (manifestaciones, síntomas, etc.) por medio de una relación fuzzy. Luego, para un conjunto de efectos observados, se identifican las posibles causas mediante la resolución de una ecuación relacional fuzzy. Una relación fuzzy representa la asociación entre un desorden (o conjunto de desórdenes simultáneos) y una manifestación (o conjunto de manifestaciones simultáneas) y un conjunto fuzzy representa los niveles de presencia de las manifestaciones [115]. Los niveles pueden ser de intensidad (manifestaciones graduales) o certeza (manifestaciones binarias).

Entre los modelos relacionales fuzzy utilizados en la literatura para la resolución de problemas de diagnóstico, los modelos de inferencia abductiva fuzzy son particularmente atractivos porque utilizan un método eficiente para obtener las combinaciones de desórdenes candidatos (explicaciones), para un conjunto dado de manifestaciones [121]-[125]. Este método está basado en una teoría matemática conocida como *Parsimonious Set Covering Theory* (PSCT) [126]-[131]. Sin embargo estos modelos tratan con problemas de diagnóstico en los cuales la relación fuzzy y el conjunto fuzzy de manifestaciones representan los niveles de intensidad de manifestaciones graduales (temperatura alta, presión baja, etc.). Por lo tanto son más adecuados para aplicaciones relacionadas por ejemplo, con el diagnóstico médico, procesos químicos, etc. La identificación de la CO en TRE es un

problema de diagnóstico en el que la relación fuzzy y el conjunto fuzzy de manifestaciones debe representar la certeza de presencia de manifestaciones binarias, en este sentido el modelo propuesto en [115]-[118] es más adecuado. Este modelo de diagnóstico es seleccionado como marco de referencia matemático para representar el problema de la inferencia de la CO en TRE, el presente trabajo constituye su primera aplicación para el análisis de problemas operativos en SDEE.

3.2.1 Modelo matemático del distribuidor de MT en TRE.

Para la inferencia de la CO en TRE también se utiliza el modelo simplificado del distribuidor de MT mostrado en la Fig. 3.1. Los dispositivos de protección (d_1 - d_7) y sus zonas protegidas o grupos de clientes (m_1 - m_7) son asociados por medio de una relación fuzzy de causa-efecto. Esto significa que la operación de un dispositivo de protección causa interrupciones en las zonas ubicadas aguas abajo de su ubicación. Por lo tanto, también causa las llamadas telefónicas recibidas de esas zonas. Por ejemplo, la operación de d_5 causa la interrupción de las zonas m_5 y m_6 , así como las llamadas telefónicas de los clientes ubicados en esas zonas. Sin embargo, no puede causar la interrupción de las zonas m_1 , m_2 , m_3 , m_4 y m_7 , por lo tanto tampoco puede causar las llamadas telefónicas de los clientes ubicados en estas zonas. Esta relación puede ser representada mediante un modelo relacional fuzzy en el que los desórdenes son el estado de los n dispositivos de protección del distribuidor y las manifestaciones son el estado de las n zonas protegidas (grupos de consumidores) del distribuidor. Los desórdenes son modelados por un conjunto crisp¹⁹ $\mathbf{D}$ (3.7), donde el elemento d_i representa al i -ésimo dispositivo de protección del distribuidor. Cada d_i modela los posibles estados operativos del dispositivo correspondiente, $d_i = 1$ si el dispositivo está abierto y $d_i = 0$ si está cerrado.

$$\mathbf{D} = \{d_1 \quad d_2 \quad \dots \quad d_n\} \quad (3.7)$$

Las manifestaciones son modeladas por un conjunto crisp $\mathbf{M}$ (3.8), donde el elemento m_j representa la j -ésima zona o grupo de clientes del distribuidor. Cada m_j modela los posibles estados de la zona correspondiente, $m_j = 1$ si las llamadas telefónicas recibidas confirman la presencia de una interrupción que afecta a todos los clientes de la zona y $m_j = 0$ en caso contrario.

$$\mathbf{M} = \{m_1 \quad m_2 \quad \dots \quad m_n\} \quad (3.8)$$

3.2.2 Incertidumbre en las manifestaciones.

Uno de los problemas de inferir la CO en TRE, es que basándose en la evidencia disponible, generalmente no es posible confirmar con “certeza absoluta” la presencia o ausencia de las manifestaciones. Solamente se puede confirmar que se sospecha o que se tiene “certeza parcial” acerca de la presencia o ausencia de las mismas.

Para modelar las manifestaciones “más o menos” ciertamente presentes y “más o menos” ciertamente ausentes se utilizan los conjuntos fuzzy $\mathcal{M}^+$ (3.9) y $\mathcal{M}^-$ (3.10) respectivamente.

¹⁹ La definición matemática de los conjuntos crisp (o conjuntos clásicos) es presentada en la sección A.1.

Aquí, los grados de pertenencia de los conjuntos fuzzy $\mathcal{M}^+$ y $\mathcal{M}^-$ modelan la certeza de presencia y ausencia de manifestaciones binarias [115]. Estos conjuntos satisfacen el requisito $\mathcal{M}^+ \cap \mathcal{M}^- = \emptyset$, que significa que no es posible estar simultáneamente “más o menos” seguro, tanto de la presencia como de la ausencia de una misma manifestación.

$$\mathcal{M}^+ = \frac{\mu_{m_1}^+}{m_1} + \frac{\mu_{m_2}^+}{m_2} + \dots + \frac{\mu_{m_n}^+}{m_n} \quad (3.9)$$

$$\mathcal{M}^- = \frac{\mu_{m_1}^-}{m_1} + \frac{\mu_{m_2}^-}{m_2} + \dots + \frac{\mu_{m_n}^-}{m_n} \quad (3.10)$$

El complemento del conjunto fuzzy $\mathcal{M}^-$ ($\bar{\mathcal{M}}^-$), modela las manifestaciones “más o menos” posiblemente presentes (3.11).

$$\bar{\mathcal{M}}^- = \frac{1 - \mu_{m_1}^-}{m_1} + \frac{1 - \mu_{m_2}^-}{m_2} + \dots + \frac{1 - \mu_{m_n}^-}{m_n} \quad (3.11)$$

El par de conjuntos $\mathcal{M}^+$ y $\bar{\mathcal{M}}^-$ satisfacen la dualidad usual entre lo que es “más o menos” necesariamente cierto y lo que es “más o menos” posiblemente cierto. Por lo tanto, $\mathcal{M}^+$ y $\bar{\mathcal{M}}^-$ son conjuntos fuzzy duplicados (*twofold fuzzy sets*)²⁰. Esta relación justifica la adopción del modelo propuesto en [115]-[118].

Los niveles de certeza de los elementos de $\mathcal{M}^+$ y $\mathcal{M}^-$ y sus significados son:

- $\mu_{m_j}^+ = 1$ y $\mu_{m_j}^- = 0$ indican que la manifestación m_j está ciertamente presente. Esto significa que basándose en las llamadas telefónicas recibidas, es seguro que una interrupción afecta a todos los clientes de la zona m_j .
- $0 < \mu_{m_j}^+ \leq 1$ y $\mu_{m_j}^- = 0$ indican que la manifestación m_j está presente pero con incertidumbre. Esto significa que basándose en las llamadas telefónicas recibidas, se sospecha (pero no se está completamente seguro) que una interrupción afecta a todos los clientes de la zona m_j .
- $\mu_{m_j}^+ = 0$ y $\mu_{m_j}^- = 0$ indica completa ignorancia respecto a m_j . Esto significa que no se han recibido llamadas telefónicas de la zona m_j , por lo tanto se desconoce si una interrupción afecta a todos los clientes de la zona m_j .

Se observa que el significado de presencia o ausencia de una manifestación está relacionado con la presencia o ausencia de llamadas telefónicas (u otro dato de TRE) que confirman la presencia de una interrupción que afecta a todos los clientes de la zona m_j . De esta manera

²⁰ En realidad para cualquier evento **A** (donde **A** representa la presencia de una manifestación), sus medidas duales de necesidad (**N**) y posibilidad (**II**) se relacionan mediante $\mathbf{II}(\mathbf{A}) = 1 - \mathbf{N}(\bar{\mathbf{A}})$.

se considera la incertidumbre asociada a los datos de TRE, esto es necesario porque los mismos pueden estar relacionados a un problema en la red de BT, en lugar de a una interrupción en MT. En este trabajo, solamente se analizan interrupciones causadas por la operación de un dispositivo de protección de MT (reconectador, seccionalizador, fusible). Esta decisión se basa en una evaluación de prioridades, las interrupciones en MT afectan a más clientes y más carga que las interrupciones de BT. Por lo tanto, en una situación de fallas múltiples, donde existen interrupciones independientes en MT y BT, los operadores atienden primero las interrupciones de MT y posteriormente las de BT.

Los niveles de certeza son escogidos por los operadores basándose en su criterio y experiencia. El nivel de certeza seleccionado depende principalmente del tipo y cantidad de clientes que han llamado (residencial, comercial, industrial, etc.) y de la descripción del problema (si está disponible). Los reportes pueden ser realizados por clientes o por cuadrillas que realizan una inspección de la zona afectada, evidentemente los reportes realizados por las cuadrillas tienen certeza máxima, en vista que son resultado de una inspección realizada por expertos. Es conveniente asignar calificadores lingüísticos a estos niveles de certeza para facilitar la comunicación entre operadores, cuadrillas y clientes. En este trabajo, se utilizan los calificadores sugeridos en [116], los cuales se presentan en la Tabla 3.1. Sin embargo, los niveles de certeza y calificadores lingüísticos pueden ser modificados para ajustarse a los criterios y léxico de los usuarios. Esta flexibilidad es una de las ventajas de la modelación mediante conjuntos fuzzy.

Tabla 3.1 Calificadores lingüísticos utilizados y sus niveles de certeza.

Calificador Lingüístico	$\mu_{m_j}^+$	$\mu_{m_j}^-$
Cierto	1.00	0.00
Casi cierto	0.70	0.00
Probable	0.30	0.00
Desconocido	0.00	0.00

3.2.3 Incertidumbre en la relación de causalidad.

Cuando el estado operativo de los dispositivos de protección del distribuidor es conocido con “certeza absoluta”, entonces también se conoce con “certeza absoluta” que manifestaciones están presentes y ausentes. Por ejemplo, si se sabe con “certeza absoluta” que el estado operativo de d_i es abierto, entonces también se sabe con “certeza absoluta” que las manifestaciones causadas por d_i están presentes (o se presentarán).

El problema de la inferencia de la CO en TRE es que basándose en la evidencia disponible ($\mu_{c_i}^+$) solamente se conoce con “certeza parcial” el estado operativo de los dispositivos, esto implica que también solamente se conoce con “certeza parcial” que manifestaciones están presentes y ausentes. Por ejemplo, si se sospecha (i.e., se sabe con “certeza parcial”) que el estado operativo de d_i es abierto, entonces también solamente se sospecha que las manifestaciones causadas por d_i están presentes (o se presentarán).

Para modelar la relación de causa-efecto entre desórdenes y manifestaciones se utilizan las matrices μC^+ (3.12) y μC^- (3.13). Los elementos de μC^+ modelan la relación entre todos los desórdenes y sus manifestaciones “más o menos” ciertas. Los elementos de μC^- modelan la relación entre los desórdenes y sus manifestaciones “más o menos” imposibles. Aquí μc_{ij}^+ y μc_{ij}^- expresan el nivel de certeza de presencia y ausencia de la manifestación m_j cuando

solamente el desorden d_i está presente, respectivamente. La representación matricial ha sido seleccionada por conveniencia, para facilitar la presentación del procedimiento de solución del modelo. Formalmente, como se explica en [115]-[118], la i -ésima fila de μC^+ es el conjunto fuzzy de manifestaciones que están “más o menos” ciertamente presentes cuando solamente el desorden d_i está presente ($\mathbf{M}(d_i)^+$). La i -ésima fila de μC^- es el conjunto fuzzy de manifestaciones que están “más o menos” ciertamente ausentes cuando solamente el desorden d_i está presente ($\mathbf{M}(d_i)^-$). Se observa que $\mathbf{M}(d_i)^+$ y $\mathbf{M}(d_i)^-$ también son conjuntos fuzzy duplicados.

$$\mu C^+ = \begin{bmatrix} \mu c_{11}^+ & \mu c_{12}^+ & \cdots & \mu c_{1n}^+ \\ \mu c_{21}^+ & \mu c_{22}^+ & \cdots & \mu c_{2n}^+ \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mu c_{n1}^+ & \mu c_{n2}^+ & \cdots & \mu c_{nn}^+ \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

$$\mu C^- = \begin{bmatrix} \mu c_{11}^- & \mu c_{12}^- & \cdots & \mu c_{1n}^- \\ \mu c_{21}^- & \mu c_{22}^- & \cdots & \mu c_{2n}^- \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mu c_{n1}^- & \mu c_{n2}^- & \cdots & \mu c_{nn}^- \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Los niveles de certeza utilizados y sus significados son:

- $\mu c_{ij}^+ = 1$ y $\mu c_{ij}^- = 0$ significa que la manifestación m_j siempre está presente cuando solamente el desorden d_i está presente.
- $0 < \mu c_{ij}^+ \leq 1$ y $\mu c_{ij}^- = 0$ expresa el nivel de incertidumbre acerca de la presencia de la manifestación m_j cuando solamente el desorden d_i está presente i.e., es una gradación de la incertidumbre de causalidad.
- $\mu c_{ij}^+ = 0$ y $\mu c_{ij}^- = 1$ significa que m_j nunca está presente cuando solamente el desorden d_i está presente, no significa que d_i evita que m_j ocurra (cuando otros desórdenes también están presentes) sino que no puede causarla.

Una simplificación importante para el modelo es que el valor de μc_{ij}^+ es el mismo para todas las b ($b \leq n$) zonas ubicadas aguas abajo del i -ésimo dispositivo de protección (3.14). Esta simplificación está basada en el siguiente análisis: a medida que la duración de la interrupción aumenta, se recibirán llamadas telefónicas de todas las zonas afectadas, pero en un orden desconocido. No se tiene mayor o menor certeza de recibir llamadas telefónicas de una zona en particular, por esta razón se asume que la certeza de recibir llamadas telefónicas es igual para todas las zonas. Se observa que existe una relación de necesidad (o certeza) entre la operación del i -ésimo dispositivo de protección y la recepción de llamadas telefónicas de las zonas ubicadas aguas abajo. Esta relación también justifica la adopción del modelo propuesto en [115]-[118].

$$\mu c_{i1}^+ = \mu c_{i2}^+ = \dots = \mu c_{ib}^+ = \mu c_i^+ \quad i = 1, \dots, n \quad (3.14)$$

Los elementos de μC^+ (3.12), (3.14) son los calculados por el T2-FLS de la Fig. 3.2, esto es posible porque la relación fuzzy μC^+ desempeña un doble papel. Desde la perspectiva de TR representa la certeza de operación del i -ésimo dispositivo de protección (3.5). Desde la perspectiva de TRE representa la relación de causalidad entre la operación del i -ésimo dispositivo de protección y la recepción de llamadas telefónicas de sus zonas protegidas. La interpretación de TRE se basa en el siguiente razonamiento aproximado: mientras mayor certeza se tiene de la operación de un dispositivo de protección, mayor certeza se tiene que se recibirán llamadas telefónicas de sus zonas protegidas.

Es interesante observar que los valores de μc_i^+ son dinámicos y dependen de los datos de TR. La relación fuzzy μC^- por el contrario es definida de acuerdo a la configuración inicial del distribuidor, la cual se asume como conocida. Los valores iniciales de μc_{ij}^- son cero o uno y cambian solamente si se efectúa una reconfiguración de la red de MT.

3.2.4 Fallas múltiples.

En algunas ocasiones el retardo entre la ocurrencia de una interrupción y la recepción de las llamadas telefónicas respectivas puede ser importante, e.g., si una falla ocurre en un distribuidor residencial durante la madrugada. En estos casos, particularmente si las condiciones climáticas son adversas, es posible que una segunda interrupción ocurra antes que se reciba alguna llamada telefónica (o un reporte de las cuadrillas). En estas situaciones, es necesario actualizar μC^+ utilizando los datos de TR de la segunda interrupción, antes de procesar cualquier llamada telefónica. Esta actualización se realiza mediante (3.15).

$$\mu c_i^+ = \begin{cases} \mu c_i^+(f_1) & \text{si } \mu c_i^+(f_1) \geq \mu c_i^+(f_2) \\ \mu c_i^+(f_2) & \text{si } \mu c_i^+(f_1) < \mu c_i^+(f_2) \end{cases} \quad (3.15)$$

Aquí, $\mu c_i^+(f_1)$ y $\mu c_i^+(f_2)$ son calculados utilizando los datos de TR de la primera y segunda interrupción, respectivamente. μc_i^+ es el valor actualizado para el i -ésimo dispositivo, este valor será utilizado para procesar las llamadas telefónicas, una vez que sean recibidas.

3.2.5 Solución del modelo de TRE mediante la inferencia abductiva fuzzy.

El objetivo de la inferencia abductiva fuzzy (IAF) es obtener las explicaciones (D_s) de las manifestaciones observadas ($\mathcal{M}^+$, $\mathcal{M}^-$), utilizando las matrices de causalidad que describen la relación entre desórdenes y manifestaciones (μC^+ , μC^-). Una explicación (D_s) es un conjunto de desórdenes (dispositivos de protección) que pueden causar las manifestaciones observadas (llamadas telefónicas recibidas) y que además satisfacen un criterio de simplicidad. En este trabajo, las explicaciones son calculadas mediante la PSCT y posteriormente son ordenadas de acuerdo a un criterio de plausibilidad, que evalúa su credibilidad o certeza. La solución del problema de diagnóstico es la explicación cuya plausibilidad es máxima, esta explicación es la solución del problema de la inferencia de la CO en TRE (CO_{TRE}). Este procedimiento se muestra esquemáticamente en la Fig. 3.3, donde

$P(\mathbf{D}_s)$ es la plausibilidad de la s -ésima explicación. Una descripción de la metodología de cálculo de las explicaciones y su plausibilidad es presentada en la sección 4.2.

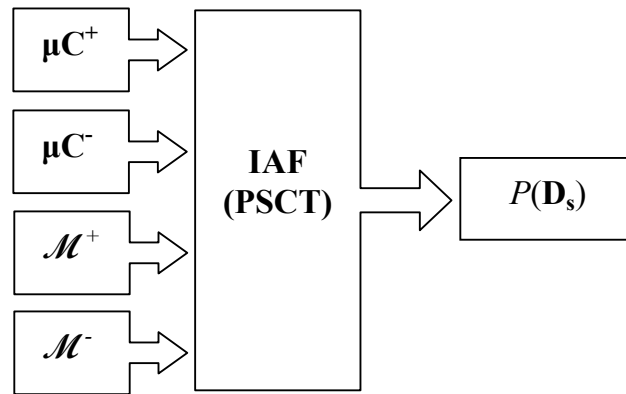


Fig. 3.3 Esquema simplificado del modelo de inferencia de la CO en TRE.

CAPÍTULO 4

4 Metodología de solución.

A continuación se explica la metodología de solución del modelo de inferencia dinámica propuesto en este trabajo. En la sección 4.1 se explica la inferencia de la CO en TR, en la sección 4.2 se explica la inferencia de la CO en TRE y finalmente en la sección 4.3 se muestra el algoritmo de solución general.

4.1 Inferencia de la CO en TR (CO_{TR}).

4.1.1 Cálculo de I^P .

En condiciones normales de operación, mediante un algoritmo de EE es posible calcular los flujos de potencia activa a través de los dispositivos de protección de cada distribuidor de MT. Estos flujos de potencia se muestran en la Fig. 4.1, para el modelo simplificado analizado en la sección 3.1.1, aquí P_i es el flujo de potencia correspondiente al i -ésimo dispositivo de protección del distribuidor (4.1).

$$\mathbf{P}_d = [P_1 \ P_2 \ \dots \ P_n] \quad (4.1)$$

En (4.1) se asume que P_1 es el flujo de potencia activa total suministrado al distribuidor, el cual es medido en la SE AT/MT y reportado al centro de control mediante el SCADA, los flujos de potencia restantes no son conocidos en TR. Esta es una situación típica de muchos distribuidores de MT con bajo nivel de supervisión y control. El vector $\mathbf{P}_d$ es calculado periódicamente para actualizarlo en función de las variaciones temporales de la demanda.

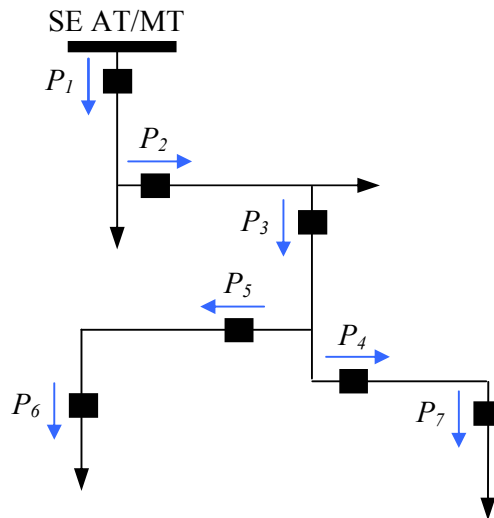


Fig. 4.1. Flujos de potencia a través de los dispositivos de protección de MT.

Como se explicó en la sección 2.2.1, cuando una falla permanente ocurre en un distribuidor de MT, causa la operación del dispositivo de protección más cercano. Como resultado se produce una variación (monofásica, bifásica o trifásica dependiendo del tipo de falla) en el flujo de potencia activa suministrado al distribuidor (ΔP). Asumiendo que se conoce $\mathbf{P}_d$ para la condición de carga previa a la falla, es posible identificar al dispositivo de protección que ha operado, comparando P_i con ΔP . En el caso ideal, el dispositivo de protección que satisface la restricción $P_i = \Delta P$, es el que ha operado. En el caso real, es de esperar que

ningún valor de P_i sea exactamente igual a ΔP , porque los valores calculados de P_i son solamente aproximaciones o buenas estimaciones de los flujos de potencia reales. Las diferencias entre los valores calculados y los reales se deben a las incertidumbres introducidas por las pseudo mediciones utilizadas para la EE, los errores de medición, etc. En este caso es conveniente calcular un índice de operación (I_i^P) que indica que tan “parecidos” son P_i y ΔP [1], [3], [4]. Este índice puede ser utilizado conjuntamente con los datos adicionales disponibles (datos de corriente de falla, datos históricos de operación, etc.), para identificar al dispositivo de protección operado o para reducir el espacio de búsqueda de la solución a un pequeño grupo de dispositivos de protección candidatos.

En este trabajo, $\mathbf{P}_d$ se calcula mediante el algoritmo basado en análisis de flujos de potencia presentado en [3], [35]. Este algoritmo en cada iteración ajusta las demandas nodales del distribuidor, hasta que los flujos de potencia totales calculados son iguales a los flujos de potencia medidos en la SE AT/MT, el algoritmo se describe detalladamente en el anexo C. Aquí es necesario aclarar que $\mathbf{P}_d$ puede ser calculado mediante cualquier algoritmo de EE, por ejemplo el presentado en [71]-[74]. Esto no afecta en forma significativa los resultados obtenidos por la metodología propuesta en este trabajo, aunque evidentemente es deseable que los valores calculados de $\mathbf{P}_d$ sean lo más precisos posible.

Como en el algoritmo utilizado, las demandas nodales son ajustadas respecto al flujo de potencia medido en la SE AT/MT (P_l en la Fig. 4.1), la incertidumbre relativa (IR) de los flujos de potencia es pequeña para los dispositivos de protección ubicados cerca de la SE AT/MT (e.g., P_2 y P_3) y aumenta para aquellos ubicados lejos (e.g., P_6 y P_7) [67], [133]. Esto significa que P_2 y P_3 son mejores aproximaciones o estimaciones de los flujos reales que P_6 y P_7 , los cuales son más inciertos. Una forma apropiada de representar esta incertidumbre es modelando los flujos de potencia calculados como números fuzzy [110]. Los números fuzzy son conjuntos fuzzy convexos y normales, utilizados en conexión con aplicaciones donde se desea una representación explícita de la ambigüedad e incertidumbre encontrada en los datos numéricos. En un sentido intuitivo son conjuntos fuzzy que representan el significado de declaraciones tales como “aproximadamente”, “casi”, “no mucho”, etc. [110]-[112]. En este trabajo se utilizan números crisp²¹ (Fig. 4.2.1), números fuzzy triangulares tipo 1 (Fig. 4.2.2) y números fuzzy triangulares tipo 2 de intervalo (Fig. 4.2.3).

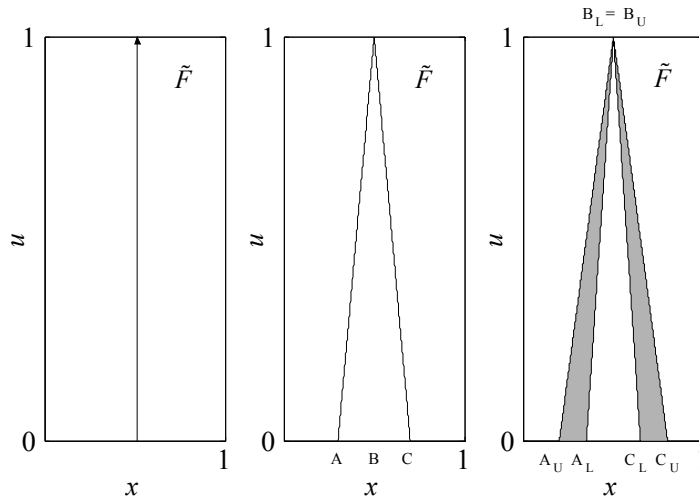


Fig.4.2.1

Fig.4.2.2

Fig.4.2.3

²¹ Los números crisp son números conocidos con precisión, son modelados mediante singletons tipo 2 (Fig.4.2.1).

Singleton tipo 2

Número fuzzy tipo 1

Número fuzzy tipo 2

Se han seleccionado números fuzzy triangulares para esta modelación porque de acuerdo a la literatura son naturalmente asociados al significado intuitivo de “aproximadamente”, “alrededor de”, “cerca de” [110], [132]. Los números fuzzy triangulares tipo 1, han sido sugeridos y utilizados exitosamente en aplicaciones relacionadas [71]-[74], [133]. Los números fuzzy triangulares tipo 2 de intervalo no han sido utilizados anteriormente en este tipo de aplicaciones, sin embargo son más flexibles que su alternativa tipo 1, gracias a la introducción de la función de pertenencia secundaria (FPS). *Los números fuzzy tipo 2 de intervalo²² son utilizados para modelar la incertidumbre asociada al valor de los parámetros de los números fuzzy tipo 1 (A y C en la Fig. 4.2.2), esto es necesario porque no siempre se cuenta con datos suficientes para calcularlos mediante métodos analíticos. Esta modelación es uno de los aportes de este trabajo.* Aquí es necesario mencionar que otra opción para esta modelación es utilizar números fuzzy gaussianos (tipo 1 o tipo 2 de intervalo). En la sección 5.6.6 se analiza esta posibilidad y se comparan los resultados obtenidos utilizando números fuzzy triangulares y gaussianos, concluyendo que las diferencias no son significativas.

Una vez que $\mathbf{P}_d$ es calculado, cada P_i puede ser modelado por un número fuzzy triangular tipo 1 ($\tilde{P}_i$) cuyos parámetros dependerán de la ubicación física del dispositivo de protección correspondiente. El número fuzzy será más “angosto” para los dispositivos ubicados cerca de la SE AT/MT y más “ancho” para los ubicados lejos [1], [133]. Esto se observa en la Fig. 4.3.1 y Fig. 4.3.2, donde se muestran dos números fuzzy triangulares tipo 1 ($\tilde{P}_1$ y $\tilde{P}_7$), que modelan la IR de los flujos de potencia P_1 y P_7 del distribuidor de la Fig. 4.1. La IR de P_1 es insignificante, porque este flujo de potencia es medido en la SE AT/MT, su incertidumbre se debe solamente al error de medición (ε), por lo tanto los parámetros de $\tilde{P}_1$ pueden ser seleccionados como $A = P_1 - \varepsilon$, $B = P_1$ y $C = P_1 + \varepsilon$. En cambio, la IR de P_7 es grande, porque este flujo de potencia es calculado (no es medido) y d_7 está ubicado lejos de la SE AT/MT. En este caso solamente es posible definir un parámetro ($B = P_7$), los parámetros A y C deben ser obtenidos mediante un procedimiento que puede ser analítico o heurístico.

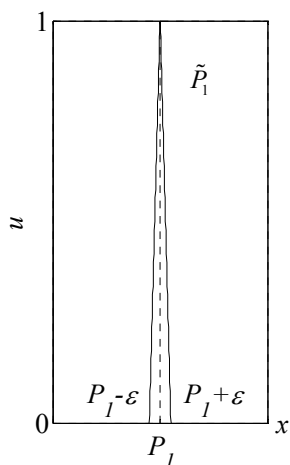


Fig. 4.3.1

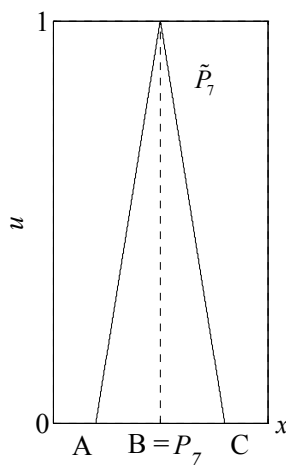
Incertidumbre relativa (IR) de P_1 

Fig. 4.3.2

Incertidumbre relativa (IR) de P_7

²² En adelante solamente se utiliza el término “números fuzzy tipo 2” en lugar de “números fuzzy tipo 2 de intervalo”.

Los parámetros de los números fuzzy tipo 1 que representan a cada P_i pueden ser obtenidos mediante los siguientes procedimientos:

- *Algoritmos de EE fuzzy:* se modelan las seudo mediciones de potencia activa y reactiva de cada nodo del distribuidor como números fuzzy tipo 1, por ejemplo utilizando las metodologías propuestas en [132]-[136]²³. Posteriormente, mediante un algoritmo de EE fuzzy similar al propuesto en [71]-[74], se obtienen directamente los números fuzzy tipo 1 que representan a cada P_i .
- *Algoritmos de EE probabilísticos:* se modelan las seudo mediciones de potencias activa y reactiva de cada nodo del distribuidor como variables aleatorias, por ejemplo utilizando la metodología propuesta en [140]. Posteriormente, mediante un algoritmo de EE probabilístico similar a los propuestos en [67] y [68], se obtienen las variables aleatorias que representan a cada P_i . Finalmente, utilizando el principio de consistencia posibilidad-probabilidad se puede transformar cada función de densidad de probabilidad en un número fuzzy tipo 1 [136]-[139].
- *Algoritmos de EE determinísticos:* si los algoritmos utilizados para calcular las seudo mediciones y para efectuar la EE son determinísticos²⁴, e.g., [3], [35], [64], [65], los resultados obtenidos son números crisp que representan los “mejores estimados” de las variables de estado y de cada P_i . Por lo tanto, una descripción lingüística adecuada para describir a cada P_i es “aproximadamente P_i ”. Esta expresión lingüística puede ser modelada mediante un número fuzzy tipo 1 y sus parámetros definidos intuitivamente, basándose en el criterio de los expertos.

Se observa que independientemente del tipo de algoritmo utilizado para calcular las seudo mediciones y efectuar la EE, siempre es posible modelar a cada P_i como un número fuzzy tipo 1. En los dos primeros casos, existen metodologías para calcular sus parámetros (A y C), en el tercer caso en cambio, deben ser definidos intuitivamente, basándose en el conocimiento experto. Sin embargo, existe incertidumbre asociada a la opinión de los expertos, la cual debe ser modelada y considerada en los cálculos. Los números fuzzy tipo 2 proporcionan un marco de referencia matemático adecuado para esta modelación [102].

Como se explicó anteriormente, en este trabajo $\mathbf{P}_d$ es calculado mediante un algoritmo determinístico. Para considerar las incertidumbres asociadas a los valores calculados, se modela cada P_i como un número fuzzy triangular tipo 2 ($\tilde{P}_i$), sus parámetros ($P_{i \min U}$, $P_{i \min L}$, $P_{i \max L}$, $P_{i \max U}$) son definidos basándose en el conocimiento experto (Fig. 4.4.1). Para obtener I_i^P se calcula la FPS de ΔP en $\tilde{P}_i$ (Fig. 4.4.2), en este caso I_i^P es un intervalo tipo 1 (Fig. 4.4.3). Se observa que mientras más diferentes son ΔP y P_i , mayor es el dominio de la FPS y mientras más parecidos son ΔP y P_i , menor es el dominio de la FPS. En los casos extremos, cuando ΔP y P_i son muy diferentes $I_i^P = I_{iL}^P = I_{iU}^P = 0$ y cuando ΔP y P_i son iguales $I_i^P = I_{iL}^P = I_{iU}^P = 1$. Aunque los parámetros de los números fuzzy tipo 2 ($P_{i \min U}$, $P_{i \min L}$, $P_{i \max L}$, $P_{i \max U}$) también son definidos basándose en el conocimiento experto, la introducción de la FPS provee grados de libertad adicionales que permiten representar la

²³ Estas metodologías utilizan datos estadísticos y técnicas de agrupamiento o *clustering* para construir las funciones de pertenencia de los números fuzzy triangulares o trapezoidales tipo 1.

²⁴ Por ejemplo, algoritmos basados en mínimos cuadrados ponderados (WLS) o en análisis de flujos de potencia.

incertidumbre asociada al valor “correcto” de los parámetros de los números fuzzy tipo 1 ($P_{i \min}$, $P_{i \max}$). Esta modelación permite considerar la incertidumbre asociada a la opinión de los expertos, i.e., a la selección de los parámetros de los números fuzzy tipo 1.

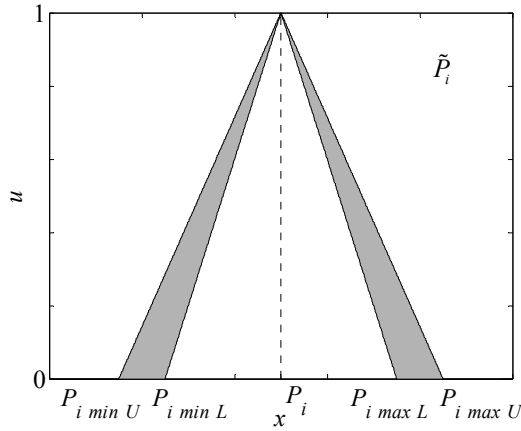


Fig. 4.4.1 Número fuzzy tipo 2 que modela a P_i .

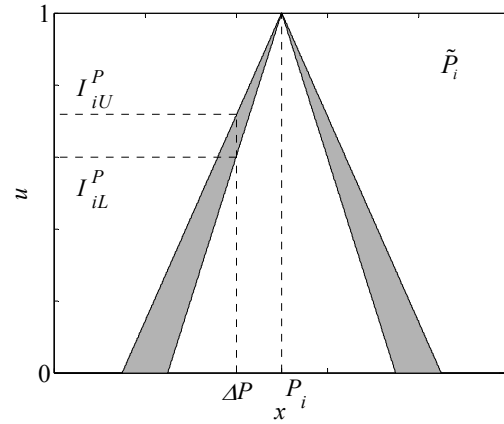


Fig. 4.4.2 Cálculo de índice de operación I_i^P .

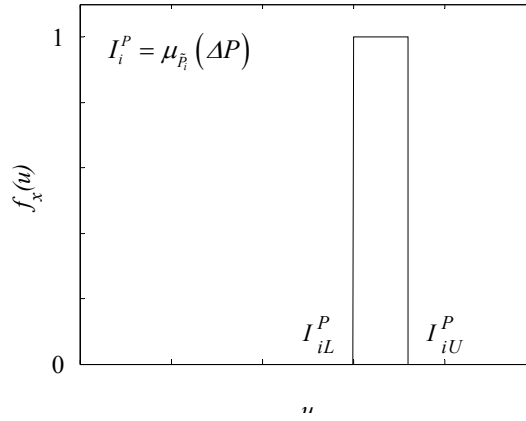


Fig. 4.4.3 Índice de operación I_i^P .

La modelación de P_i mediante números fuzzy tipo 2 es más general que su alternativa tipo 1, la cual es un caso especial en el que I_i^P es un número crisp ($I_{iL}^P = I_{iU}^P = I_i^P$), como se observa en la Fig. 4.5.1 y Fig. 4.5.2. En este caso un valor de I_i^P cercano o igual a uno indica que es muy posible que d_i sea el dispositivo que ha operado, un valor de I_i^P cercano o igual a cero indica que es poco posible que d_i sea el dispositivo que ha operado.

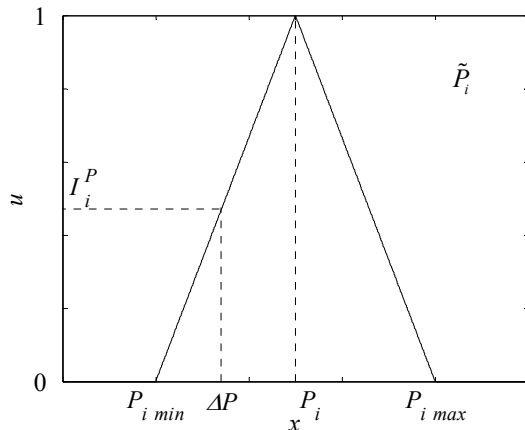


Fig. 4.5.1 Cálculo de I_i^P cuando P_i es número fuzzy tipo 1.

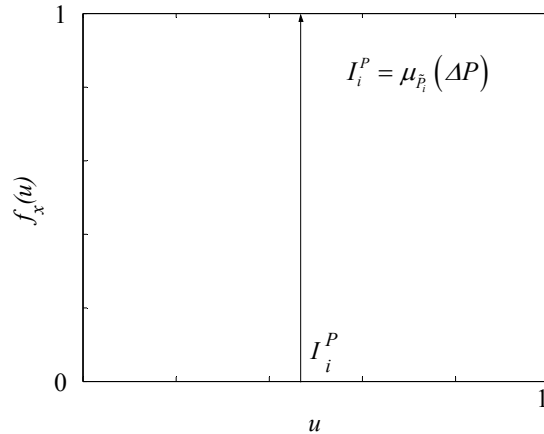


Fig. 4.5.2 I_i^P cuando P_i es número fuzzy tipo 1.

Formalmente, los valores de I_i^P , I_{iL}^P e I_{iU}^P son calculados utilizando las funciones de pertenencia superior e inferior de cada número fuzzy tipo 2, como se muestra en (4.2)-(4.5).

$$I_i^P = \mu_{\tilde{P}_i}(\Delta P) = [\underline{\mu}_{\tilde{P}_i}(\Delta P), \bar{\mu}_{\tilde{P}_i}(\Delta P)] \quad (4.2)$$

$$I_{iL}^P = \underline{\mu}_{\tilde{P}_i}(\Delta P) \quad (4.3)$$

$$I_{iU}^P = \bar{\mu}_{\tilde{P}_i}(\Delta P) \quad (4.4)$$

$$I_i^P = [I_{iL}^P, I_{iU}^P] \quad (4.5)$$

El índice I_i^P varía entre cero y uno, un valor cercano a uno indica que es posible que d_i sea el dispositivo que ha operado, un valor cercano a cero indica lo contrario.

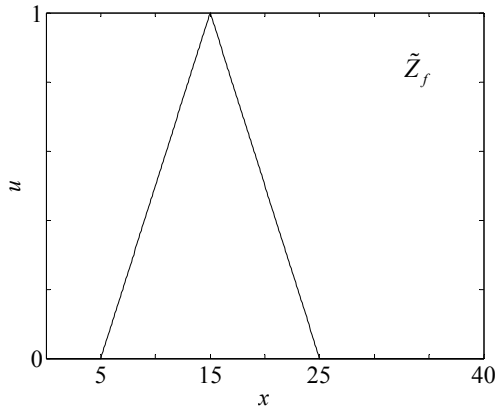
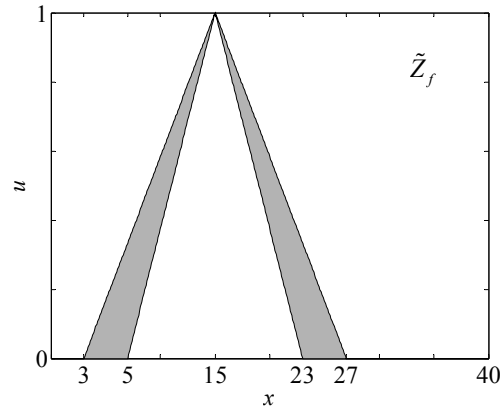
4.1.2 Cálculo de $\mathbf{I}^I$.

El cálculo de $\mathbf{I}^I$ se basa en la aplicación del principio de extensión fuzzy al análisis de fallas tradicional [2]-[4]. El principio de extensión fuzzy²⁵ es una herramienta matemática que permite calcular el valor de una función $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ cuando las entradas (x_i) son determinísticas (números crisp) o fuzzy (números fuzzy tipo 1, números fuzzy tipo 2). *Por medio del principio de extensión se introduce el concepto de corrientes de falla fuzzy (CFF), con el objetivo de considerar las incertidumbres asociadas al cálculo de corrientes de falla. En este cálculo, las variables de entrada pueden ser determinísticas y/o fuzzy, la función (f) es cualquiera de las ecuaciones de falla clásicas y la salida (y) es una CFF. La principal ventaja de este concepto es que provee un marco de referencia matemático para calcular con variables inciertas, i.e., permite la utilización de conocimiento vago y aproximado acerca de los valores de estas variables. Esto es muy útil para considerar la incertidumbre acerca del valor de la impedancia de falla (Z_f), que es la más incierta e influyente de todas las variables involucradas en el cálculo de corrientes de falla. Dependiendo de la incertidumbre de los datos utilizados para el cálculo, todas o solamente algunas de las variables pueden ser modeladas como números fuzzy y las variables restantes consideradas como determinísticas. Esta modelación es uno de los aportes de este trabajo.*

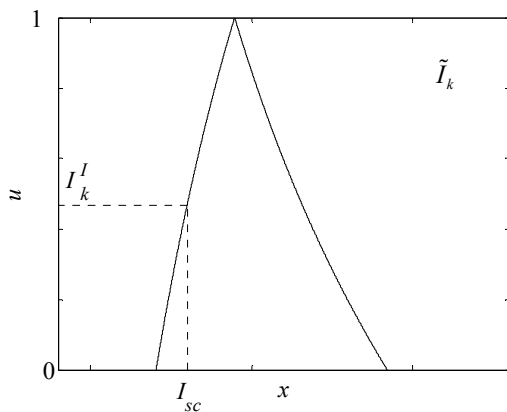
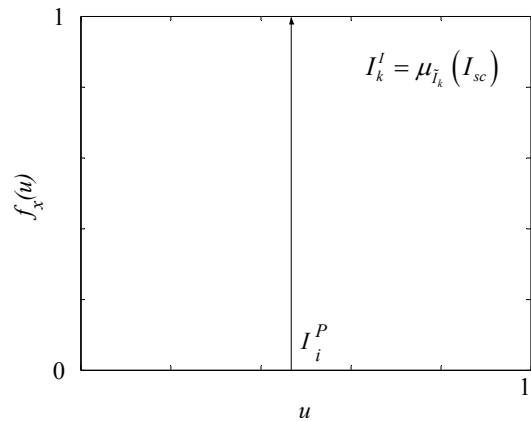
Los parámetros de los números fuzzy utilizados para calcular las CFF son escogidos de acuerdo al rango usual de valores de las variables analizadas. En los resultados presentados en el capítulo 5 solamente se modela Z_f como número fuzzy, las demás variables son consideradas como determinísticas. Sin embargo, en el anexo B (sección B.4) se muestran ejemplos de CFF en los que también se modela la tensión de pre-falla como número fuzzy. Para obtener una idea aproximada del rango de valores usuales de Z_f es necesario realizar un análisis de los datos históricos de falla. El valor aproximado de Z_f es calculado utilizando la magnitud de la corriente de falla medida en la SE AT/MT (I_{sc}), el tipo de falla, su ubicación y los parámetros eléctricos del distribuidor (impedancias de secuencia, etc.). Mediante este procedimiento en [26], [87] y [93] se proponen valores de $Z_f \approx 15\Omega$, 20Ω , 25Ω , $Z_f \approx 0\Omega$ y

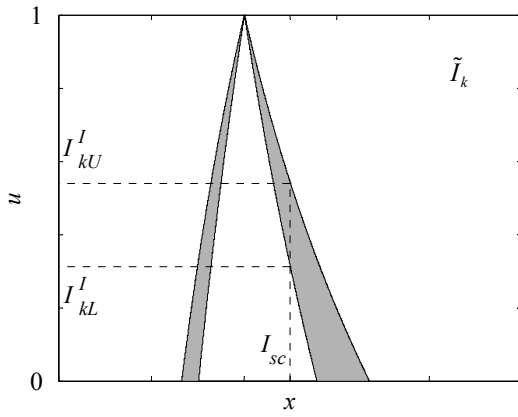
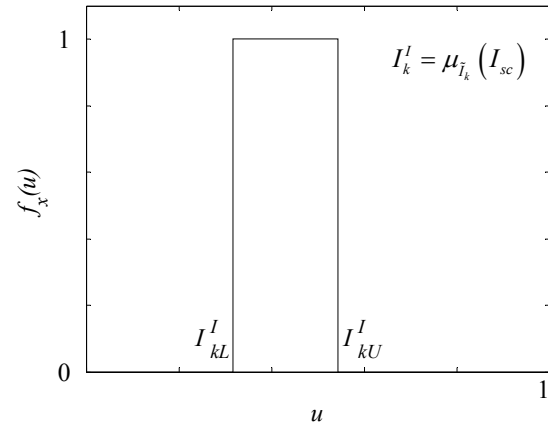
²⁵ La teoría matemática del principio de extensión fuzzy y su aplicación para el cálculo de CFF es explicada detalladamente en el anexo B.

$Z_f \approx [5\Omega, 25\Omega]$ respectivamente. Basándose en estas referencias, en este trabajo Z_f es modelada mediante los números fuzzy triangulares tipo 1 y tipo 2 de la Fig. 4.6.1 y Fig. 4.6.2, los cuales representan a la expresión lingüística “aproximadamente 15Ω ”. Esta modelación se considera adecuada porque se toma en cuenta un intervalo de valores posibles de Z_f en lugar de valores determinísticos únicamente. Algunos valores son más posibles que otros, esta característica es modelada mediante la función de pertenencia, en este sentido los valores de Z_f ubicados en el intervalo $[10\Omega, 20\Omega]$ son más posibles que los valores menores que 10Ω o mayores que 20Ω . Es importante señalar que los valores de Z_f pueden variar de forma significativa de un sistema a otro o de un distribuidor a otro, e.g., de un distribuidor rural a uno urbano. Por lo tanto es necesario realizar un análisis preliminar de los datos de falla para definir la función de pertenencia adecuada para cada sistema. En este trabajo se ha decidido utilizar el mismo valor de Z_f para los k puntos del distribuidor, sin embargo en caso de ser necesario es posible utilizar diferentes valores para cada región del distribuidor. Esto podría ser útil en un distribuidor extenso que suministra energía a zonas urbanas y rurales.

Fig. 4.6.1 Z_f modelada como número fuzzy tipo 1.Fig. 4.6.2 Z_f modelada como número fuzzy tipo 2.

El principio de extensión fuzzy es utilizado para calcular las magnitudes de las CFF (registradas en la SE AT/MT) para k puntos del distribuidor ($\tilde{I}_k$), los resultados obtenidos consideran un espectro mayor de posibilidades que los resultados derivados de cálculos determinísticos. Luego se calcula I_k^I , el cual es la FPS de I_{sc} en $\tilde{I}_k$, este procedimiento se muestra gráficamente para $\tilde{I}_k$ tipo 1 (Fig. 4.7.1) y tipo 2 (Fig. 4.7.3). Estas CFF son calculadas utilizando las Z_f de la Fig. 4.6.1 y Fig. 4.6.2. Se observa que cuando $\tilde{I}_k$ es tipo 1, I_k^I es un número crisp (Fig. 4.7.2) y cuando $\tilde{I}_k$ es tipo 2, I_k^I es un intervalo tipo 1 (Fig. 4.7.4).

Fig. 4.7.1 Cálculo de I_k^I para CFF tipo 1.Fig. 4.7.2 I_k^I para CFF tipo 1.

Fig. 4.7.3 Cálculo de I_k^I para CFF tipo 2.Fig. 4.7.4 I_k^I para CFF tipo 2.

Se observa que también en este caso la modelación de $\tilde{I}_k$ mediante números fuzzy tipo 2 es más general que su alternativa tipo 1, la cual es un caso especial en el que $I_k^I = I_{kL}^I = I_{kU}^I$. Formalmente, los valores de I_k^I , I_{kL}^I e I_{kU}^I son calculados utilizando las funciones de pertenencia superior e inferior de cada número fuzzy tipo 2, como se muestra en (4.6)-(4.9).

$$I_k^I = \mu_{\tilde{I}_k}(I_{sc}) = [\underline{\mu}_{\tilde{I}_k}(I_{sc}), \bar{\mu}_{\tilde{I}_k}(I_{sc})] \quad (4.6)$$

$$I_{kL}^I = \underline{\mu}_{\tilde{I}_k}(I_{sc}) \quad (4.7)$$

$$I_{kU}^I = \bar{\mu}_{\tilde{I}_k}(I_{sc}) \quad (4.8)$$

$$I_k^I = [I_{kL}^I, I_{kU}^I] \quad (4.9)$$

Después de calcular I_k^I , se utilizan (4.10)-(4.12) para calcular I_i^I . En estas ecuaciones, v es el número total de puntos que son protegidos por el i -ésimo dispositivo de protección.

$$I_{iL}^I = \max_k(I_{kL}^I), \quad k = 1, \dots, v \quad (4.10)$$

$$I_{iU}^I = \max_k(I_{kU}^I), \quad k = 1, \dots, v \quad (4.11)$$

$$I_i^I = [I_{iL}^I, I_{iU}^I], \quad k = 1, \dots, v \quad (4.12)$$

El índice I_i^I también varía entre cero y uno, un valor cercano a uno indica que es muy posible que d_i sea el dispositivo que ha operado, un valor cercano a cero indica lo contrario.

4.1.3 Cálculo de I^Q .

Para el cálculo de I^Q es necesario seleccionar variables adicionales que ayuden a compensar la falta de datos de TR y obtener una idea aproximada del desempeño real del distribuidor. Los datos suministrados por estas variables pueden ser cualitativos y/o cuantitativos y generalmente son vagos e inciertos. En este trabajo se han seleccionados tres variables:

- Las condiciones climáticas actuales (4.13).
- La frecuencia de operación de los dispositivos de protección (4.14).
- El tiempo transcurrido desde que el último mantenimiento fue realizado en la zona protegida por cada dispositivo de protección (4.15).

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} W_1 & W_2 & \dots & W_n \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

$$\mathbf{F}^O = \begin{bmatrix} F_1^O & F_2^O & \dots & F_n^O \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

$$\mathbf{T}^M = \begin{bmatrix} T_1^M & T_2^M & \dots & T_n^M \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

Indudablemente, variables adicionales podrían ser consideradas u otras variables podrían ser utilizadas en lugar de W_i , F_i^O y T_i^M , esto depende de las características de los distribuidores bajo análisis y de los datos disponibles. Sin embargo, esta es una buena selección porque utilizando estas variables es posible obtener una idea aproximada de que tan propensa es una ubicación a fallar y por lo tanto que tan propenso es el correspondiente dispositivo de protección a operar. Para alcanzar este objetivo es necesario diseñar un procedimiento que aproveche el conocimiento de los expertos y su habilidad para inferir utilizando datos inciertos, con esta intención se propone utilizar el T2-FLS de la Fig. 4.8.

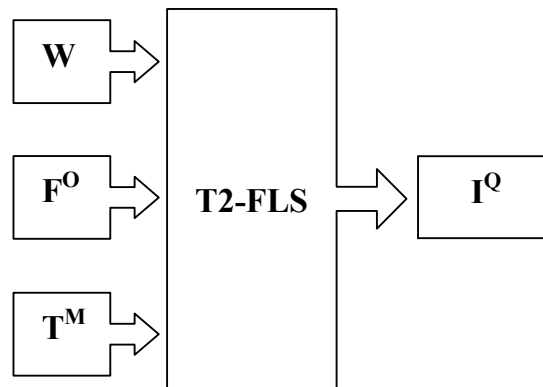


Fig. 4.8. Esquema simplificado del T2-FLS propuesto para el cálculo de I^Q .

Los T2-FLS son muy similares a los sistemas de lógica fuzzy tipo 1 tradicionales (T1-FLS). La principal diferencia es que los T2-FLS utilizan conjuntos fuzzy tipo 2 para modelar las palabras utilizadas en la base de reglas y/o entradas. Las entradas de los T2-FLS pueden ser determinísticas (números crisp) o fuzzy (expresiones lingüísticas modeladas como números fuzzy tipo 1 o números fuzzy tipo 2). Las salidas de los T2-FLS son un número crisp (y_{ic}) y un intervalo tipo 1 ($y_i = [y_{iL}, y_{iU}]$). Este intervalo es una medida de la incertidumbre de la salida crisp, de forma análoga a como en los sistemas probabilísticos, la desviación estándar (σ) es una medida de la incertidumbre de la media (m). La salida crisp es obtenida defuzzificando el intervalo tipo 1 de salida, como se muestra en la Fig. 4.9.

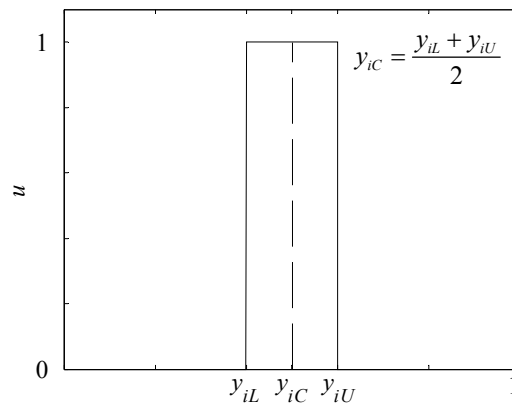


Fig. 4.9. Conjunto reducido de tipo (línea sólida) y salida crisp defuzzificada (línea punteada).

El T2-FLS propuesto para calcular $\mathbf{I}^Q$ utiliza la base de reglas de la Tabla 4.1, cada regla tiene tres antecedentes (W_i , F_i^O y T_i^M) y un consecuente I_i^Q . Cada antecedente es descrito por tres términos lingüísticos y el consecuente por nueve, cada término es modelado por un conjunto fuzzy triangular tipo 2.

Tabla 4.1 Base de reglas del T2-FLS utilizado para calcular I_i^Q (Fig. 4.8).

Regla No.	Antecedente			Consecuente
	W_i	F_i^O	T_i^M	I_i^Q
1	Malo	Bajo	Corto	Medio Pequeño
2	Malo	Bajo	Medio	Medio
3	Malo	Bajo	Largo	Medio Grande
4	Malo	Medio	Corto	Mediano
5	Malo	Medio	Medio	Medio Grande
6	Malo	Medio	Largo	Grande
7	Malo	Alto	Corto	Grande
8	Malo	Alto	Medio	Muy Grande
9	Malo	Alto	Largo	Excesivo
10	Regular	Bajo	Corto	Muy Pequeño
11	Regular	Bajo	Medio	Pequeño
12	Regular	Bajo	Largo	Medio Pequeño
13	Regular	Medio	Corto	Pequeño
14	Regular	Medio	Medio	Medio Pequeño
15	Regular	Medio	Largo	Medio
16	Regular	Alto	Corto	Medio Pequeño
17	Regular	Alto	Medio	Medio
18	Regular	Alto	Largo	Medio Grande
19	Bueno	Bajo	Corto	Insignificante
20	Bueno	Bajo	Medio	Insignificante
21	Bueno	Bajo	Largo	Muy Pequeño
22	Bueno	Medio	Corto	Insignificante
23	Bueno	Medio	Medio	Muy Pequeño
24	Bueno	Medio	Largo	Pequeño
25	Bueno	Alto	Corto	Muy Pequeño
26	Bueno	Alto	Medio	Pequeño
27	Bueno	Alto	Largo	Muy Pequeño

El T2-FLS de la Fig. 4.8 puede utilizar dos tipos de entradas:

- Datos cuantitativos: datos numéricos obtenidos del análisis de la historia de operación del distribuidor, estos datos son determinísticos (números crisp) y son modelados como singletons tipo 2.
- Datos cualitativos: expresiones lingüísticas basadas en el conocimiento experto, estos datos son inherentemente imprecisos, por la naturaleza del lenguaje humano, por esta razón son modelados como números fuzzy triangulares tipo 2.

El modelo es suficientemente flexible para calcular cuando todas las entradas son cuantitativas, cualitativas o una combinación de ambos tipos. Esta modelación permite aprovechar los datos cualitativos disponibles, los que a pesar de ser valiosos y utilizados diariamente durante la operación de la red, generalmente no son considerados por los modelos tradicionales. Por ejemplo, cuando no se dispone de datos estadísticos, es muy común que se describa la frecuencia de operación de un dispositivo de protección utilizando expresiones lingüísticas, e.g., “Muy Alta”, “Baja”, etc. Asimismo es muy común describir la condición climática como “Buena”, “Muy Mala”, etc. En muchas ocasiones estas expresiones son suficientes para que el operador y las cuadrillas se formen una idea aproximada de la historia de operación de la red y de su situación actual. Las expresiones lingüísticas utilizadas como entradas para calcular I_i^Q se muestran en la Tabla 4.2. Para calcular I_i^Q se utilizan los procedimientos matemáticos descritos en el anexo A (sección A.2). El índice I_i^Q (4.16) es el conjunto reducido de tipo (intervalo tipo 1) mostrado en la Fig. 4.10, que representa el efecto de las incertidumbres de los términos lingüísticos de las entradas y base de reglas sobre la salida. Esto significa que mientras mayor es el dominio de I_i^Q mayor es la incertidumbre de la salida.

Tabla 4.2 Entradas cualitativas del T2-FLS utilizado para calcular I_i^Q .

W_i	F_i^O	T_i^M
Pésimo	Insignificante	Insignificante
Muy Malo	Muy Baja	Muy Corto
Malo	Baja	Corto
Medio Malo	Medio Baja	Medio Corto
Regular	Media	Medio
Medio Bueno	Media Alta	Medio Largo
Bueno	Alta	Largo
Muy Bueno	Muy Alta	Muy Largo
Excelente	Extra Alta	Extra Largo

En este caso existen dos posibilidades, defuzzificar el conjunto reducido de tipo y utilizar su valor crisp ($I_i^Q = I_{iC}^Q$) o utilizar (4.16), para permitir el flujo de todas las incertidumbres y considerar su efecto sobre la salida final ($\mu_{c_i}^+$). En este trabajo se selecciona esta última opción, por su generalidad. Sin embargo, en la sección 5.5 se presentan algunos resultados en los que por simplicidad se utiliza I_{iC}^Q .

$$I_i^Q = [I_{iL}^Q, I_{iU}^Q] \quad (4.16)$$

El índice I_i^Q también varía entre cero y uno, un valor cercano a uno indica que es muy posible que d_i sea el dispositivo que ha operado, un valor cercano a cero indica lo contrario.

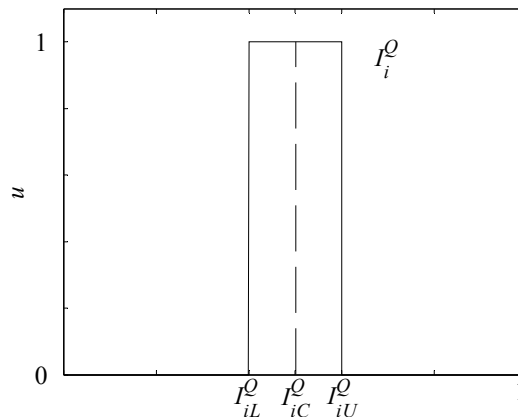


Fig. 4.10 Índice de operación I_i^Q calculado por el T2-FLS de la Fig. 4.8.

4.1.4 Cálculo de μC^+ .

El T2-FLS propuesto para calcular μC^+ utiliza la base de reglas de la Tabla 4.3, cada regla tiene tres antecedentes (I_i^P , I_i^I e I_i^Q) y un consecuente (μc_i^+). Cada antecedente es descrito por tres términos lingüísticos y el consecuente por nueve. Estos términos también son modelados como conjuntos fuzzy triangulares tipo 2. Las entradas son los intervalos tipo 1 calculados utilizando los procedimientos descritos en las secciones 4.1.1-4.1.3. La salida es un intervalo tipo 1 y un número crisp (Fig. 4.9), los cuales también son calculados utilizando los procedimientos matemáticos descritos en la sección A.2.

Tabla 4.3 Base de reglas del T2-FLS utilizado para calcular μc_i^+ (Fig. 3.2).

Regla No.	Antecedente			Consecuente
	I_i^P	I_i^I	I_i^Q	μc_i^+
1	Pequeño	Pequeño	Pequeño	Insignificante
2	Pequeño	Pequeño	Mediano	Muy Pequeño
3	Pequeño	Pequeño	Grande	Pequeño
4	Pequeño	Mediano	Pequeño	Pequeño
5	Pequeño	Mediano	Mediano	Pequeño
6	Pequeño	Mediano	Grande	Medio Pequeño
7	Pequeño	Grande	Pequeño	Medio Pequeño
8	Pequeño	Grande	Mediano	Medio Pequeño
9	Pequeño	Grande	Grande	Medio
10	Mediano	Pequeño	Pequeño	Medio Pequeño
11	Mediano	Pequeño	Mediano	Medio Pequeño
12	Mediano	Pequeño	Grande	Medio
13	Mediano	Mediano	Pequeño	Medio
14	Mediano	Mediano	Mediano	Medio
15	Mediano	Mediano	Grande	Medio Grande
16	Mediano	Grande	Pequeño	Medio Grande
17	Mediano	Grande	Mediano	Medio Grande
18	Mediano	Grande	Grande	Grande
19	Grande	Pequeño	Pequeño	Medio
20	Grande	Pequeño	Mediano	Medio Grande
21	Grande	Pequeño	Grande	Grande
22	Grande	Mediano	Pequeño	Medio Grande
23	Grande	Mediano	Mediano	Grande
24	Grande	Mediano	Grande	Muy Grande
25	Grande	Grande	Pequeño	Muy Grande
26	Grande	Grande	Mediano	Excesivo
27	Grande	Grande	Grande	Excesivo

Antes de continuar es interesante observar que los dos T2-FLS propuestos en este trabajo (Fig. 3.2 y Fig. 4.8), están conectados en cascada²⁶. La salida del T2-FLS utilizado para calcular I_i^Q es una de las entradas del T2-FLS utilizado para calcular μC^+ . En el primer T2-FLS, I_i^Q es descrito por nueve términos lingüísticos, esto se hace con la intención de controlar la sensibilidad del T2-FLS respecto a sus entradas. Sin embargo, en el segundo T2-FLS, I_i^Q es descrito solamente por tres términos lingüísticos, esto se hace con el objetivo de evitar el fenómeno conocido como “explosión de reglas”, el cual consiste en el crecimiento combinatorial de la cantidad de reglas del sistema de lógica fuzzy. Además, de esta manera es más sencillo asociar I_i^Q con los índices restantes (I_i^P e I_i^I), esto facilita la construcción de la base de reglas. Esta selección representa una relación de compromiso entre la carga computacional y la complejidad y desempeño del modelo. Es posible utilizar más términos lingüísticos para describir I_i^Q , sin embargo, esto implica un mayor número de reglas y menor transparencia en la base de conocimiento de los T2-FLS.

²⁶ Una propuesta similar en la que se utilizan T1-FLS para el control de tensión / potencia reactiva en un DMS es presentada en [138].

La identificación del dispositivo de protección que ha operado es un problema de decisión binaria, i.e., el dispositivo ha operado o no, por lo tanto es necesario seleccionar una condición de decisión (3.1), los dispositivos que satisfagan la condición de decisión son considerados como “candidatos” o “sospechosos” de haber operado. Si solamente un dispositivo satisface la condición de decisión, entonces el problema de la inferencia de la CO es solucionado utilizando solamente datos de TR (CO_{TR}). Estos resultados son la base de la gestión de interrupciones y pueden servir como entrada para un algoritmo de EE convencional.

Si dos o más dispositivos cumplen con la condición de decisión, entonces es necesario utilizar los datos de TRE para confirmar que dispositivo ha operado y finalizar la inferencia de la CO (CO_{TRE}). En este último caso los dispositivos de protección son ordenados de acuerdo a su certeza de operación (μ_{ci}^+), sin embargo su número es suficientemente pequeño para ayudar al operador a formarse una idea aproximada de la situación actual del distribuidor. Estos resultados pueden ser utilizados para tomar algunas decisiones operativas y (si es factible) pueden servir como entrada para un algoritmo de EE generalizada.

Basándose en la naturaleza binaria de este problema y en el universo de discurso de las variables utilizadas, se define como valor de decisión $\mu_{ci}^+_{min} = 0.5$, una selección similar también es hecha en [5], [102]. La condición de decisión es definida utilizando el conjunto fuzzy reducido de tipo, de esta manera se considera el efecto combinado de todas las incertidumbres de las entradas y de la base de reglas. De esta manera también es posible obtener una condición de decisión “suave” o flexible. Tres posibles condiciones de decisión son (4.17)-(4.19):

$$\blacksquare \mu_{ci}^+_L > 0.5 \quad (4.17)$$

$$\blacksquare \mu_{ci}^+_C > 0.5 \quad (4.18)$$

$$\blacksquare \mu_{ci}^+_U > 0.5 \quad (4.19)$$

En este trabajo se utiliza la segunda condición de decisión, sin embargo, la primera y tercera condición también pueden ser utilizadas a fin de estudiar el efecto de las incertidumbres de las entradas y base de reglas sobre el proceso de inferencia. En las Fig. 4.11.1-4.11.4 se muestran cuatro salidas del T2-FLS, los intervalos tipo 1 $[\mu_{ci}^+_L, \mu_{ci}^+_U]$ son los intervalos de incertidumbre asociadas a la salida crisp ($\mu_{ci}^+_C$), en estas figuras se observa el efecto de la condición de decisión sobre la selección del dispositivo de protección candidato.

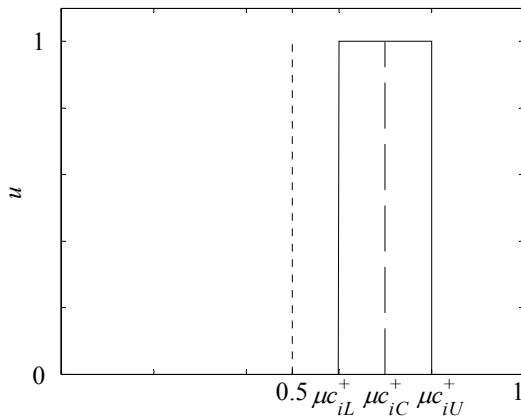


Fig. 4.11.1 Caso 1: d_i satisface todas las condiciones de decisión.

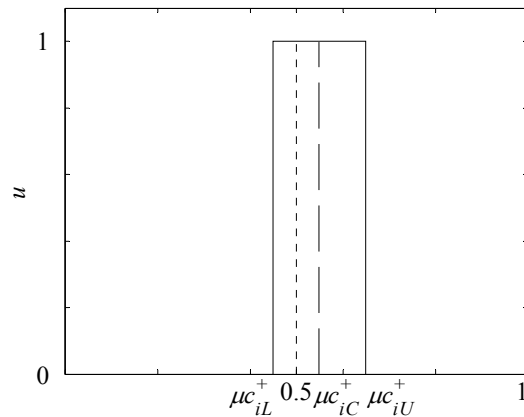
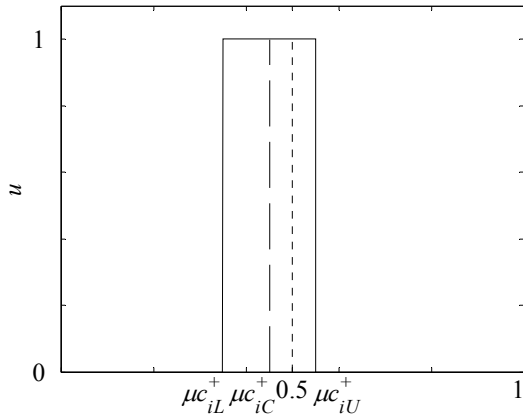
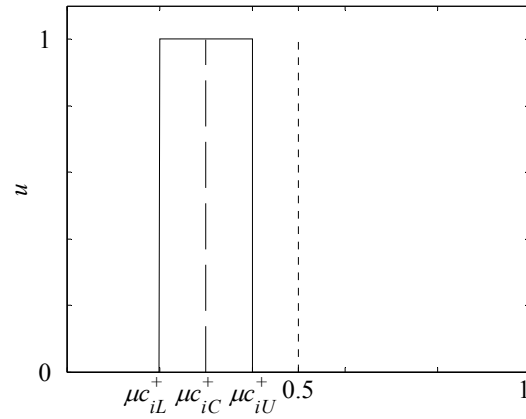


Fig. 4.11.2 Caso 2: d_i no satisface (4.17).

Fig. 4.11.3 Caso 3: d_i no satisface (4.17) y (4.18).Fig. 4.11.4 d_i no satisface ninguna condición de decisión.

En el primer caso (Fig. 4.11.1), el dispositivo satisface todas las condiciones de decisión, por lo tanto independientemente de cual se utilice como criterio de selección, el dispositivo es candidato a haber operado. En el segundo caso (Fig. 4.11.2), el dispositivo no satisface la primera condición de decisión, por lo tanto si esta es utilizada como criterio de selección, el dispositivo no es candidato a haber operado. En el tercer caso (Fig. 4.11.3), el dispositivo no satisface la primera y segunda condiciones de decisión, por lo tanto si estas son utilizadas como criterios de selección, el dispositivo no es candidato a haber operado. Finalmente, en el cuarto caso (Fig. 4.11.4), el dispositivo no satisface ninguna condición de decisión, por lo tanto independientemente de cual se utilice como criterio de selección, el dispositivo no es candidato a haber operado.

Este ejemplo demuestra la flexibilidad y potencialidad de la metodología, la consideración de las incertidumbres de los datos de entrada y base de reglas, permite obtener un espectro mayor de resultados que los obtenidos por modelos determinísticos. De esta forma el operador puede tomar una decisión final considerando todas las posibilidades y de acuerdo a su criterio. Por ejemplo, una decisión conservadora sería utilizar $\mu c_i^+ > 0.5$, una decisión arriesgada sería utilizar $\mu c_i^+ > 0.5$ y una decisión de compromiso sería utilizar $\mu c_i^+ > 0.5$, esta última es la condición seleccionada en este trabajo. La condición de decisión que se seleccione para el modelo de TR, define el valor de μc_i^+ que será utilizado por el modelo de TRE, en este sentido tres posibles valores son:

- Si se escoge $\mu c_i^+ > 0.5$ como condición de decisión entonces $\mu c_i^+ = \mu c_i^+_{L}$.
- Si se escoge $\mu c_i^+ > 0.5$ como condición de decisión entonces $\mu c_i^+ = \mu c_i^+_{C}$.
- Si se escoge $\mu c_i^+ > 0.5$ como condición de decisión entonces $\mu c_i^+ = \mu c_i^+_{U}$.

4.1.5 Decodificación de valores numéricos y cálculo de términos lingüísticos.

Además del análisis numérico y gráfico presentado en las secciones anteriores, también puede efectuarse una decodificación de los valores numéricos de μC^+ para obtener una interpretación lingüística de los resultados. Los resultados lingüísticos sirven como soporte adicional para la toma de decisiones. Para la decodificación de los valores numéricos se utiliza el método propuesto en [102], [113], [114]. Primero se calcula la FPS de μc_i^+ en el q -ésimo conjunto fuzzy tipo 2 del consecuente de la base de reglas (4.20). Aquí μc_i^+ es el valor

definido para ser utilizado por el modelo de TRE, i.e., $\mu c_i^+{}_L$, $\mu c_i^+{}_C$ o $\mu c_i^+{}_U$ u otro, dependiendo de la condición de decisión seleccionada.

$$\mu_{\tilde{F}_q}(\mu c_i^+) = \left[\underline{\mu}_{\tilde{F}_q}(\mu c_i^+), \overline{\mu}_{\tilde{F}_q}(\mu c_i^+) \right] \quad (4.20)$$

Cada FPS es un intervalo tipo 1, sus límites están definidos por las funciones de pertenencia inferior y superior del q -ésimo conjunto fuzzy tipo 2 del consecuente. Posteriormente se calcula el centro de gravedad de cada FPS (4.21), se comparan todos los centros de gravedad y se selecciona el mayor.

$$f_{\mu c_i^+}^{cg}(\tilde{F}_q) = \frac{1}{2} \left[\overline{\mu}_{\tilde{F}_q}(\mu c_i^+) + \underline{\mu}_{\tilde{F}_q}(\mu c_i^+) \right] \quad (4.21)$$

El centro de gravedad máximo está asociado a un conjunto fuzzy tipo 2 del consecuente. El término lingüístico representado por este conjunto es el valor lingüístico correspondiente a μc_i^+ y es calculado mediante (4.22).

$$TL(\mu c_i^+) = \arg \left(\max_{\forall \tilde{F}_q} \left[f_{\mu c_i^+}^{cg}(\tilde{F}_1), f_{\mu c_i^+}^{cg}(\tilde{F}_2), \dots, f_{\mu c_i^+}^{cg}(\tilde{F}_9) \right] \right) \quad (4.22)$$

Se observa que el modelo de inferencia de la CO en TR es capaz de utilizar datos de entrada cuantitativos y/o cualitativos y de obtener resultados numéricos y/o lingüísticos. En este sentido es muy flexible y permite incorporar todos los tipos de datos usualmente disponibles en los SDEE, además facilita la transmisión de la información entre el personal involucrado en la operación de la red de MT. Este es uno de los aportes de este trabajo.

4.2 Inferencia de la CO en TRE (CO_{TRE}).

Como se explicó en la sección 3.2.5 el modelo de TRE es resuelto por medio de un procedimiento basado en inferencia abductiva fuzzy. En este procedimiento se utiliza la PSCT como algoritmo de cálculo para generar las hipótesis de solución o explicaciones del problema de diagnóstico. La noción de causalidad propuesta por la PSCT no es utilizada en este trabajo, en su lugar se utiliza la propuesta de [115]-[118] la cual es más general. El procedimiento se inicia con la formulación de un problema de diagnóstico crisp, en esta etapa no se toman en cuenta las incertidumbres (grados de certeza) de las manifestaciones observadas ($\mathcal{M}^+$, $\mathcal{M}^-$) y de las relaciones de causalidad (μC^+ , μC^-). Luego, se utiliza la PSCT para calcular los desórdenes (o combinaciones de desórdenes) que puedan explicar las manifestaciones observadas. Después, las explicaciones obtenidas son ordenadas de acuerdo a un criterio de plausibilidad, que toma en cuenta la certeza de presencia y ausencia de las manifestaciones y las relaciones de causalidad fuzzy. Finalmente se presentan los resultados al operador.

4.2.1 Solución del modelo crisp.

El primer paso para la solución del modelo fuzzy es solucionar su alternativa crisp. Para ello μC^+ y $\mathcal{M}^+$ son reemplazadas por sus equivalentes crisp **C** (4.23) y **M**⁺ (4.24) [121].

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{n1} & c_{n2} & \cdots & c_{nn} \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

$$\mathbf{M}^+ = \{m_1 \quad m_2 \quad \dots \quad m_r\} \quad (4.24)$$

Estos equivalentes son obtenidos reemplazando los elementos de $\mu\mathbf{C}^+$ y $\mathcal{M}^+$ que son mayores que cero, por uno. Los elementos de $\mathcal{M}^+$ que son iguales a cero no son tomados en cuenta, por lo tanto $\mathbf{M}^+$ solamente tiene r elementos, donde $r \leq n$. El problema crisp es definido como una cuarteta $\mathbf{P} = \langle \mathbf{D}, \mathbf{M}, \mathbf{C}, \mathbf{M}^+ \rangle$, donde $\mathbf{D}$ y $\mathbf{M}$ son (3.7) y (3.8), respectivamente. Para resolver este problema utilizando la PSCT es necesario introducir los conceptos de efectos, causas y covers [121]. Para cualquier $d_i \in \mathbf{D}$ y $m_j \in \mathbf{M}$ en un problema de diagnóstico $\mathbf{P}$:

- $efectos(d_i) = \{m_j \mid c_{ij} > 0\}$
- $causas(m_j) = \{d_i \mid c_{ij} > 0\}$
- Para cualquier $\mathbf{D}_I \subseteq \mathbf{D}$, $efectos(\mathbf{D}_I) = \bigcup efectos(d_i), d_i \in D_I$
- Para cualquier $\mathbf{M}_J \subseteq \mathbf{M}$, $causas(\mathbf{M}_J) = \bigcup causas(m_j), m_j \in M_J$
- El conjunto $\mathbf{D}_I$ es un cover de $\mathbf{M}_J$ si $\mathbf{M}_J \subseteq efectos(\mathbf{D}_I)$

La premisa de la PSCT es que una hipótesis plausible de diagnóstico de $\mathbf{P}$ debe ser cover parsimonioso o simple²⁷ de $\mathbf{M}^+$. A los covers simples se les denomina explicaciones de $\mathbf{M}^+$ ($\mathbf{D}_s$). La explicación más plausible es la solución del problema de diagnóstico $\mathbf{P}$.

Un cover es simple si satisface el principio de parsimonia o principio de simplicidad (comúnmente conocido como navaja de Ocam u *Ocam's razor*). Este principio dice que las soluciones simples son preferidas en lugar de las soluciones complejas, esto es intuitivamente satisfactorio porque es bien sabido que es más probable que ocurran fallas simples en lugar de fallas múltiples o complejas. Hasta la fecha se han propuesto en la literatura muchos criterios para evaluar la simplicidad de un cover, algunos de los criterios usualmente utilizados son [121]:

- Criterio de desorden simple: un cover $\mathbf{D}_I$ de $\mathbf{M}^+$ es una explicación si contiene únicamente un desorden.
- Criterio minimalista: un cover $\mathbf{D}_I$ de $\mathbf{M}^+$ es una explicación si tiene la mínima cardinalidad entre todos los covers de $\mathbf{M}^+$.
- Criterio de no-redundancia: un cover $\mathbf{D}_I$ de $\mathbf{M}^+$ es una explicación si no tiene subconjuntos propios que también sean covers de $\mathbf{M}^+$.
- Criterio de relevancia: un cover $\mathbf{D}_I$ de $\mathbf{M}^+$ es una explicación si contiene desórdenes causalmente asociados con al menos una de las manifestaciones de $\mathbf{M}^+$.

²⁷ En adelante se utilizan “cover simple” y “principio de simplicidad” en lugar de “cover parsimonioso” y “principio de parsimonia” respectivamente, a fin de facilitar la comprensión del significado de estas definiciones.

Claramente un cover de desorden simple es un cover mínimo, un cover mínimo es un cover no redundante, un cover no redundante es un cover relevante y un cover relevante es obviamente un cover. En el anexo D se presenta un pequeño ejemplo de estos conceptos. La selección del criterio de simplicidad depende de las características de cada problema de diagnóstico, sin embargo los criterios de no-redundancia y minimalista son muy utilizados en la literatura. En este trabajo, como se sugiere en [121], se utiliza el criterio de no-redundancia y además se propone utilizar un criterio de no-redundancia modificado, para algunos casos especiales. En el primer criterio se calculan las explicaciones de todas las manifestaciones asumiendo su presencia de forma simultánea. En el segundo criterio se calculan las explicaciones de cada una de las manifestaciones asumiendo su presencia de forma individual. La aplicación del criterio modificado es analizada mediante un caso de estudio en la sección 5.6.2.2.

Es importante mencionar que encontrar la solución del problema de diagnóstico $\mathbf{P}$ es un problema *NP-hard*, donde *NP-hard* es una medida de la complejidad del algoritmo. Específicamente, problemas para los cuales el tiempo de ejecución crece exponencialmente a medida que el tamaño del problema se incrementa, son referidos en la literatura como *NP-hard* [120]. Sin embargo, en el problema tratado en este trabajo debido a la configuración radial de los distribuidores de MT es posible reducir significativamente la dimensión del problema. *Las explicaciones de una llamada telefónica deben ser seleccionadas solamente entre los w dispositivos ubicados aguas arriba de la zona de la cual se ha recibido la llamada, los restantes dispositivos no deben ser considerados. Esta característica reduce notablemente el espacio de búsqueda de la solución, e.g., de 2^n a 2^w combinaciones cuando solo se analiza una llamada. Esto significa que el espacio de búsqueda de la solución para una llamada telefónica proveniente de una zona alejada respecto a la SE AT/MT, generalmente será mayor que el correspondiente a una llamada telefónica procedente de una zona cercana.* Para calcular las explicaciones de $\mathbf{M}^+$ se utiliza el algoritmo interactivo propuesto en [130] para la solución de problemas de diagnóstico crisp, el cual es explicado en el anexo D.

4.2.2 Solución del modelo fuzzy.

Una vez que se han calculado las explicaciones de $\mathbf{M}^+$ ($\mathbf{D}_s$), se evalúa la plausibilidad o credibilidad de las mismas. Esto se hace utilizando el criterio de plausibilidad mostrado en (4.25), (4.26), el cual está basado en las propuestas de [115]-[117], [121]. Este criterio toma en cuenta los niveles de certeza de las manifestaciones ($\mathcal{M}^+$, $\mathcal{M}^-$) y de las relaciones de causalidad ($\mu\mathbf{C}^+$, $\mu\mathbf{C}^-$).

$$P(d_i) = \vee \left\{ \vee_{j=1,n} \left[\wedge \left(\mu\mathbf{C}_{ij}^+, \mu_{m_j}^+ \right) \right], \vee_{j=1,n} \left[\wedge \left(\mu\mathbf{C}_{ij}^-, \mu_{m_j}^- \right) \right] \right\} \quad (4.25)$$

$$P(\mathbf{D}_s) = \sum_{i=1}^{nd} \frac{P(d_i)}{nd} \quad (4.26)$$

En (4.25), (4.26), d_i es el i -ésimo desorden de la s -ésima explicación ($\mathbf{D}_s$) y nd es el número total de desórdenes de cada explicación. La primera parte de la ecuación (4.25) evalúa la consistencia entre las manifestaciones “más o menos” ciertamente causadas por d_i y las

manifestaciones “más o menos” ciertamente presentes. Su segunda parte evalúa la consistencia entre las manifestaciones “más o menos” imposibles de d_i y las manifestaciones “más o menos” ciertamente ausentes. Aquí para evaluar la t-conorma ($\vee$) y la t-norma ($\wedge$), se utilizan la suma algebraica (4.27) y su operación dual, el producto (4.28), respectivamente. Estos operadores son casos especiales de una familia general de normas parametrizadas, conocidas como normas de Hamacher. Estos operadores han sido escogidos siguiendo las recomendaciones presentadas en [142]. La suma algebraica es un operador adecuado porque refleja la contribución de cada componente a su unión, por esta razón ha sido ampliamente utilizada y sugerida en muchas aplicaciones de la teoría de conjuntos fuzzy en ingeniería [22], [142], [144]. Esta característica es utilizada en este trabajo para modelar el siguiente razonamiento intuitivo: la plausibilidad de d_i debe aumentar a medida que más de sus manifestaciones ciertamente causadas, están presentes.

$$\mu_{A \vee B}(x) = \mu_A(x) + \mu_B(x) - \mu_A(x) \cdot \mu_B(x) \quad (4.27)$$

$$\mu_{A \wedge B}(x) = \mu_A(x) \cdot \mu_B(x) \quad (4.28)$$

La ecuación (4.26) evalúa la plausibilidad relativa de la s -ésima explicación. El objetivo de esta ecuación es “penalizar” las explicaciones que contienen múltiples desórdenes, esto es intuitivamente satisfactorio porque estas explicaciones son generalmente menos plausibles. Los resultados de (4.26) son ordenados y presentados al operador, la explicación cuya plausibilidad es máxima es la solución de la CO en TRE (CO_{TRE}). Sin embargo, todas las explicaciones son presentadas para proveer una perspectiva general de las soluciones plausibles, de esta manera el operador puede tomar una decisión final tomando en cuenta todos los resultados disponibles.

4.3 Algoritmo de solución general.

4.3.1 Descripción del algoritmo.

En la Fig. 4.12 se muestra un esquema simplificado del algoritmo de inferencia dinámica de la CO en TR y TRE propuesto en este trabajo. Este algoritmo es descrito brevemente a continuación:

1. Se asume que se parte de una CO inicial conocida, la señal de activación del proceso de inferencia es la detección de ΔP e I_{sc} . Estos datos son obtenidos mediante el SCADA²⁸. El primer paso del proceso de inferencia es calcular los índices de operación (I^P , I^I , I^Q) utilizando los procedimientos presentados en las secciones 4.1.1-4.1.3.
2. Se calcula la certeza de operación de los dispositivos de protección (μC^+) utilizando los índices de operación y el T2-FLS de la sección 4.1.4.
3. Se seleccionan los dispositivos candidatos a haber cambiado de estado, para ello se evalúa la condición de decisión $\mu C_i^+ > \mu C_{imin}^+$.

²⁸ Aquí es necesario recordar que ΔP es una variación repentina (en una o más fases) en el flujo de potencia suministrado al distribuidor e I_{sc} es la magnitud de la corriente de falla registrada por los relevadores de sobrecorriente instalados en la SE AT/MT, estos relevadores también identifican el tipo de falla detectada. Estos “datos crudos de TR” son suministrados por el SCADA.

4. Si solamente existe un d_i candidato, se obtiene la nueva CO (CO_{TR}) y finaliza el proceso. Si existe más de un d_i candidato, se almacena μC^+ y se espera a recibir los datos de TRE (llamadas telefónicas de los clientes afectados).
5. Se reciben y procesan las llamadas telefónicas en el CIS, luego estos “datos crudos de TRE” son suministrados al operador, quien selecciona los calificadores lingüísticos (CL) para describir la certeza de presencia y ausencia de las manifestaciones observadas ($\mathcal{M}^+$, $\mathcal{M}^-$).
6. Se efectúa la inferencia abductiva fuzzy utilizando μC^+ , μC^- , $\mathcal{M}^+$ y $\mathcal{M}^-$. Mediante la PSCT se obtienen las explicaciones de las manifestaciones observadas, las cuales son ordenadas de acuerdo a su plausibilidad. La explicación cuya plausibilidad es máxima es la nueva CO (CO_{TRE}).

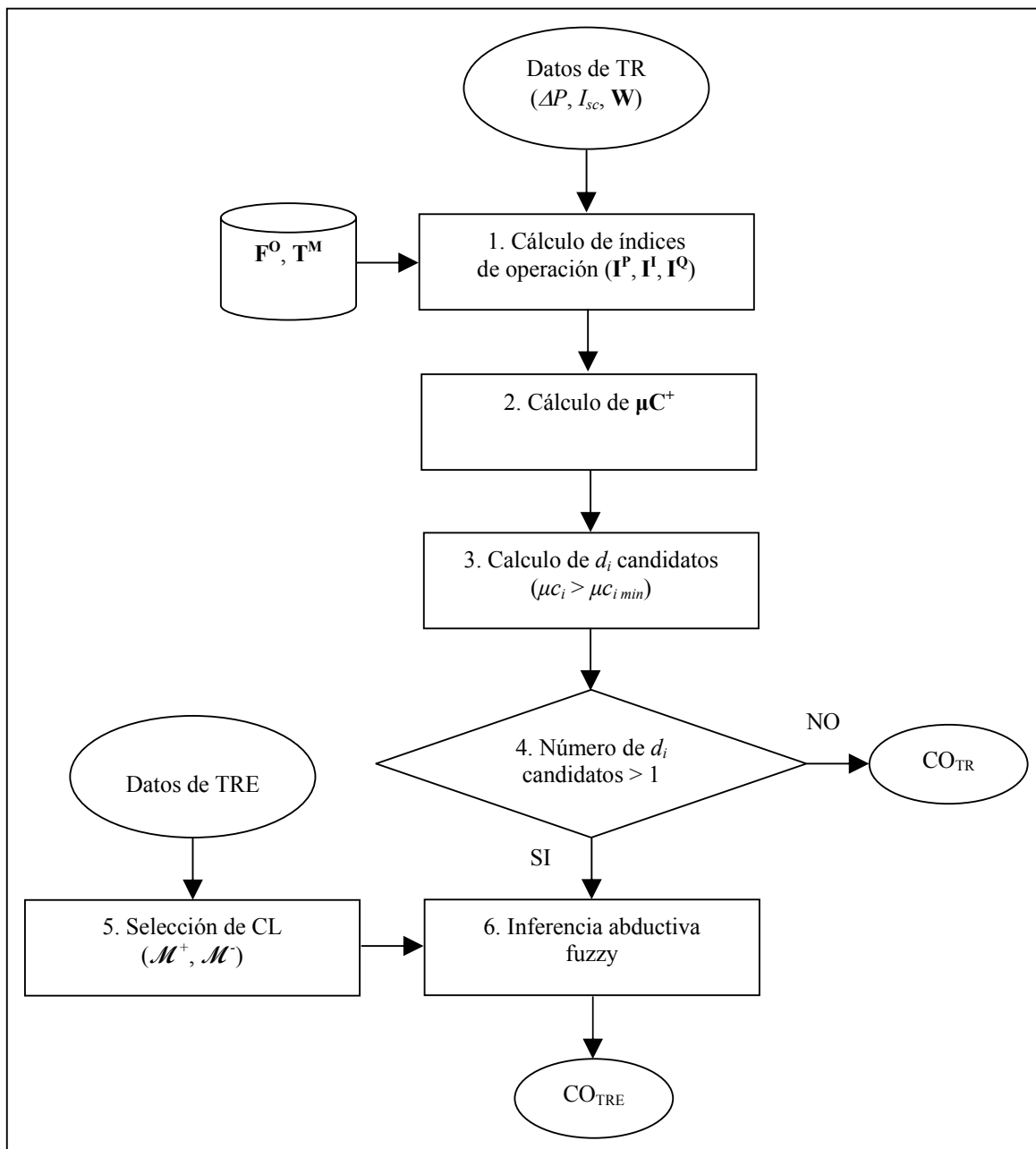


Fig. 4.12. Esquema simplificado del algoritmo de solución general.

4.3.2 Descripción del programa de cálculo.

El programa de cálculo se ha estructurado en dos partes principales correspondientes a la inferencia de la CO en TR (CO_{TR}) y TRE (CO_{TRE}), ambos algoritmos se han integrado en un solo programa de cálculo (CO). El programa ha sido desarrollado completamente en Matlab® y se ha utilizado un algoritmo de flujo de potencia desarrollado en Visual Digital Fortran® por Vargas [35].

La primera parte del programa (CO_{TR}) consiste de cuatro módulos:

- *Módulo 1:* se calculan los valores de P_i utilizando el algoritmo basado en flujos de potencia presentado en el anexo C. Los datos de entrada de este algoritmo son los parámetros eléctricos y las demandas nodales del distribuidor. Luego se utilizan los valores de P_i , las IR de cada d_i y ΔP para calcular $\mathbf{I}^P$, aquí es necesario indicar si ΔP es monofásico ($\Delta P_{1\phi}$), bifásico ($\Delta P_{2\phi}$) o trifásico ($\Delta P_{3\phi}$). Este módulo es la implementación del procedimiento descrito en la sección 4.1.1.
- *Módulo 2:* se calculan las CFF para k puntos del distribuidor, para ello se utiliza el procedimiento presentado en el anexo B, el cual está basado en el método vertex. Los datos necesarios para obtener las CFF son $\tilde{Z}_f$ y los parámetros eléctricos y tensiones nodales de los k puntos predefinidos del distribuidor (las tensiones nodales han sido calculadas previamente por el primer módulo). Luego, se utilizan las CFF e I_{sc} para calcular $\mathbf{I}^I$, aquí es necesario indicar si I_{sc} es monofásica ($I_{sc1\phi}$), bifásica ($I_{sc2\phi}$) o trifásica ($I_{sc3\phi}$). Este módulo es la implementación del procedimiento descrito en la sección 4.1.2.
- *Módulo 3:* se calcula $\mathbf{I}^Q$ utilizando el T2-FLS descrito en la sección 4.1.3. Las entradas del T2-FLS pueden ser términos lingüísticos o números crisp seleccionados para describir los valores de $\mathbf{W}$, $\mathbf{F}^O$ y $\mathbf{T}^M$ del distribuidor.
- *Módulo 4:* se calcula μC^+ utilizando el T2-FLS descrito en la sección 4.1.4. Las entradas del T2-FLS son los resultados obtenidos por los módulos anteriores ($\mathbf{I}^P$, $\mathbf{I}^I$, $\mathbf{I}^Q$). Los resultados de este módulo son los valores numéricos y términos lingüísticos que describen la certeza de operación de cada d_i . Los d_i candidatos son escogidos y ordenados descendientemente de acuerdo a su certeza de operación y al valor ($\mu C_{i\min}^+$) y condición de decisión utilizada (4.17)-(4.19).

La segunda parte del programa (CO_{TRE}) consiste de un módulo:

- *Módulo 1:* se calculan las explicaciones del problema de diagnóstico ($\mathbf{D}_s$) utilizando las manifestaciones observadas ($\mathcal{M}^+$, $\mathcal{M}^-$) y el algoritmo interactivo presentado en el anexo D. Luego se evalúa la plausibilidad de las explicaciones ($P(\mathbf{D}_s)$) utilizando los resultados de la primera parte (μC^+) y las certezas de presencia de las manifestaciones. Finalmente se ordenan las explicaciones de acuerdo a su plausibilidad y se presentan los resultados finales. Este módulo es la implementación del procedimiento descrito en la sección 4.2.

Un punto importante es que el programa es suficientemente flexible para permitir la modificación de los siguientes parámetros de acuerdo al criterio del usuario final:

- Las IR de cada d_i pueden ser modificadas utilizando términos lingüísticos familiares (“Grande”, “Mediana”, “Pequeña”).
- Los parámetros de $\tilde{Z}_f$ pueden ser modificados de acuerdo a los datos disponibles para cada región del distribuidor.
- El valor y condición de decisión utilizados pueden ser modificados de acuerdo al “grado de riesgo” asumido por cada usuario.
- Los cuatros módulos de la primera parte (CO_{TR}) han sido diseñados de tal forma que es posible calcular los valores de I^P , I^I , I^Q y μC^+ utilizando números fuzzy triangulares tipo 2, números fuzzy gaussianos tipo 2 o combinaciones de ambos.

En el siguiente capítulo se presentan los resultados obtenidos por el programa de cálculo cuando se utiliza para inferir la CO de un distribuidor de MT real de la ciudad de San Juan, Argentina.

CAPÍTULO 5

5 Análisis de resultados.

En este capítulo se evalúa el desempeño de la metodología propuesta, se presentan varios casos de estudio con el objetivo de verificar su robustez y versatilidad. En estos casos se utiliza un distribuidor de MT de la ciudad de San Juan, Argentina. Las características principales del distribuidor son descritas a continuación.

5.1 Características del distribuidor de MT.

El distribuidor utilizado pertenece a la red de 13.2 kV de la ciudad de San Juan, Argentina, su nombre código es NACNOR (Nacional Norte) y depende de la subestación AT/MT ANGACO. Este distribuidor tiene 172 nodos y 53 dispositivos de protección (1 interruptor principal, 2 reconectadores automáticos y 50 juegos de fusibles). Se asume que solamente el interruptor principal (DI) es supervisado en TR, por lo tanto su estado operativo es conocido en todo instante. La demanda del distribuidor es principalmente residencial y su valor total medido en la SE AT/MT es $P = 1222$ kW, $Q = 516$ kVAR, registrado a las 21:00 horas de un día hábil. El diagrama unifilar del distribuidor se muestra en la Fig. 5.1, los dispositivos de protección son representados de forma genérica, independientemente de su tipo (reconectador, seccionalizador o fusible). Los puntos de la red son protegidos por los dispositivos R021 (n_1 - n_4), F1355 (n_5), F2403 (n_6 - n_9), F1342 (n_{10} - n_{13}), F1368 (n_{15} - n_{18}), F1369 (n_{19} - n_{22}) y F1339 (n_{23} - n_{26}). Estos dispositivos y puntos son utilizados en las secciones 5.2 y 5.3 para analizar los procedimientos de cálculo de I^P e I^I y en la sección 5.6 para evaluar el desempeño de la metodología.

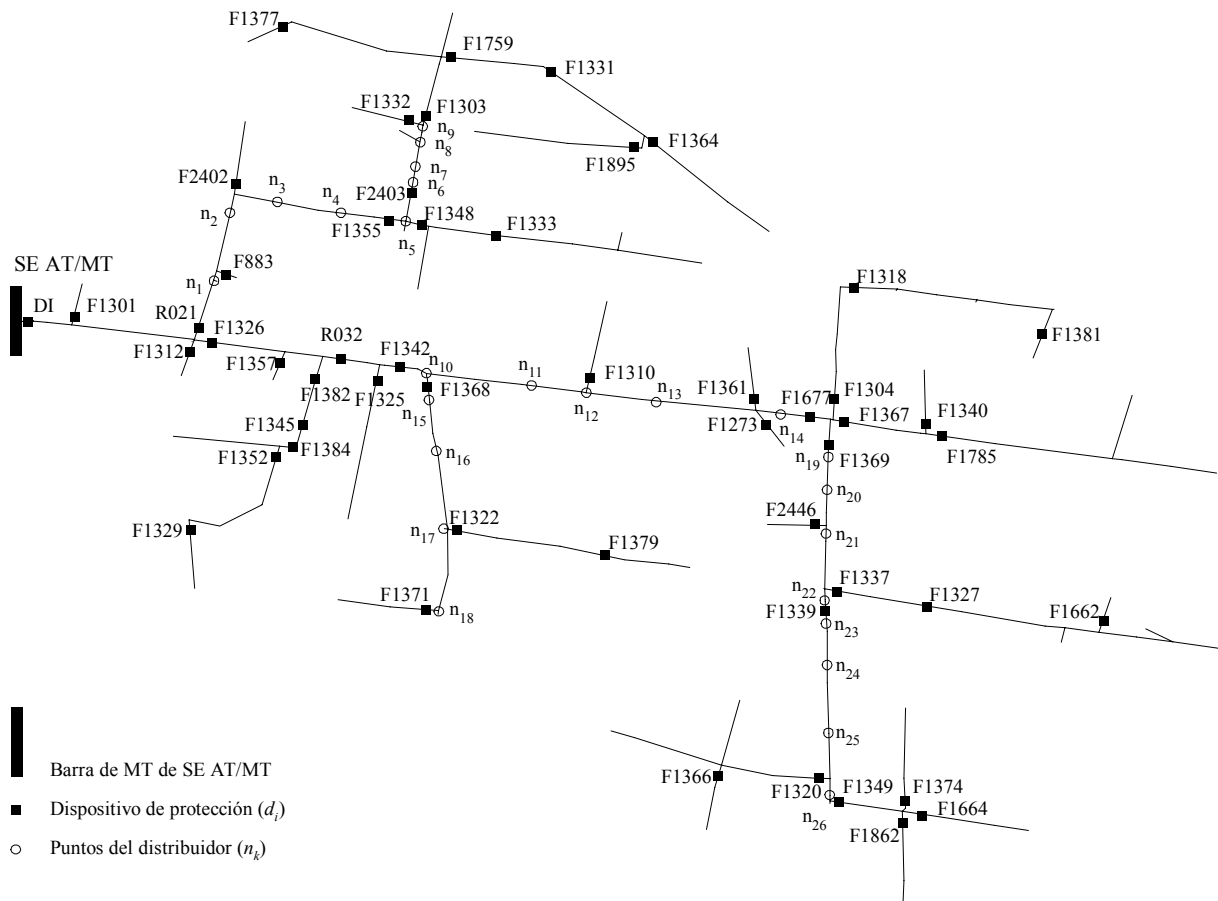


Fig. 5.1 Diagrama unifilar del distribuidor NACNOR.

5.2 Cálculo de I^P .

Los flujos de potencia activa crisp de los dispositivos de protección (P_i) para la condición de carga bajo análisis²⁹, son calculados utilizando el algoritmo presentado en el anexo C, los parámetros del distribuidor NACNOR son presentados en el anexo E (Fig. E.1, Tablas E.1-E.3). La incertidumbre relativa (IR) de P_i varía de acuerdo a la ubicación de d_i respecto a la SE AT/MT: IR pequeña (P) para los d_i ubicados cerca de la SE AT/MT, IR mediana (M) para los d_i ubicados en puntos intermedios e IR grande (G) para los d_i ubicados lejos. En la Tabla 5.1 se muestran los valores de P_i e IR utilizados para cada dispositivo de protección.

Tabla 5.1 Incertidumbres relativas de los d_i del distribuidor de la Fig. 5.1

d_i	$P_{i\phi}$ (kW)	IR	d_i	$P_{i\phi}$ (kW)	IR	d_i	$P_{i\phi}$ (kW)	IR	d_i	$P_{i\phi}$ (kW)	IR
F1301	1.98	P	F1325	9.95	M	F1352	12.17	P	F1340	2.07	G
R021	271.24	P	F1342	266.06	M	F1322	19.15	M	F1785	16.82	G
F1312	208.53	P	F1333	7.48	M	F1371	3.20	M	F1364	6.10	M
F1326	683.94	P	F1303	106.08	M	F1369	101.30	G	F1895	2.34	M
F883	5.06	P	F1332	10.61	M	F1304	41.39	G	F1327	4.14	G
F2402	7.67	P	F1384	13.56	P	F1367	21.69	G	F1320	7.61	G
F1355	246.00	M	F1368	52.01	M	F1331	34.63	M	F1349	16.31	G
F1357	150.17	P	F1310	0.84	M	F1329	4.49	M	F1381	1.51	G
F1382	214.34	P	F1361	4.56	M	F1379	10.26	M	F1662	1.76	G
R032	317.85	P	F1273	3.18	M	F2446	17.11	G	F1366	2.69	G
F1348	29.02	M	F1677	164.45	M	F1337	15.08	G	F1664	5.26	G
F2403	183.57	M	F1759	55.37	M	F1339	34.10	G	F1862	7.52	G
F1345	14.27	P	F1377	7.30	M	F1318	10.83	G	F1374	3.52	G

Los parámetros de los números fuzzy utilizados para modelar P_i en función de su IR se muestran en la Tabla 5.2, el significado de estos parámetros es el indicado en la Fig. 4.2.

Tabla 5.2 Parámetros de conjuntos fuzzy tipo 1 y tipo 2 utilizados para modelar P_i .

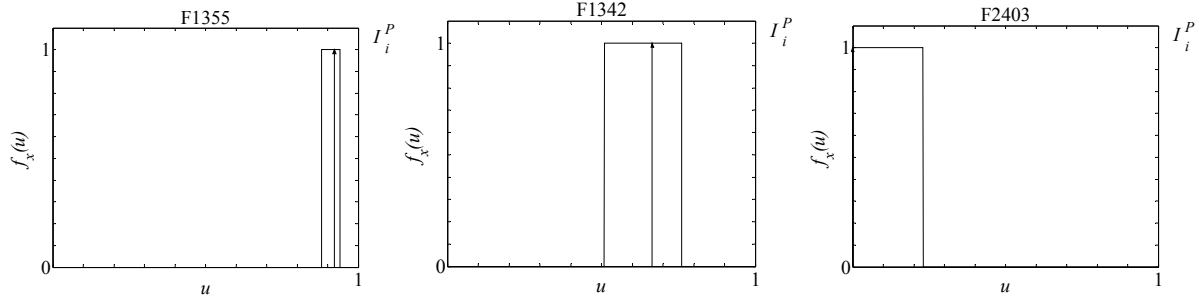
Ubicación	Conjuntos fuzzy triangulares tipo 1			Conjuntos fuzzy triangulares tipo 2				
	A	B	C	A_U	A_L	$B_U = B_L$	C_U	C_L
P	$0.9 \cdot P_i$	P_i	$1.1 \cdot P_i$	$0.8 \cdot P_i$	$0.9 \cdot P_i$	P_i	$1.1 \cdot P_i$	$1.2 \cdot P_i$
M	$0.7 \cdot P_i$	P_i	$1.3 \cdot P_i$	$0.6 \cdot P_i$	$0.8 \cdot P_i$	P_i	$1.2 \cdot P_i$	$1.4 \cdot P_i$
G	$0.5 \cdot P_i$	P_i	$1.5 \cdot P_i$	$0.4 \cdot P_i$	$0.6 \cdot P_i$	P_i	$1.4 \cdot P_i$	$1.6 \cdot P_i$

Cuando P_i es modelado como número fuzzy tipo 1, I_i^P es un número crisp y cuando P_i es modelado como número fuzzy tipo 2, I_i^P es un intervalo tipo 1 ($I_i^P = [I_i^P_L, I_i^P_U]$). Como ejemplo, en la Tabla 5.3 y Fig. 5.2 se muestran los valores de I_i^P correspondientes a F1355, F1342 y F2403, los cuales han sido calculados utilizando los parámetros de la Tabla 5.2 y $\Delta P_{I\phi} = 80$ kW. Se observa que el dominio de I_i^P es pequeño y tiende a uno cuando P_i y ΔP son casi iguales (F1355), luego aumenta cuando crece la diferencia entre P_i y ΔP (F1342) y finalmente disminuye y tiende a cero cuando P_i y ΔP son muy diferentes (F2403). Se observa también que la modelación mediante números fuzzy tipo 2 es más general que su alternativa tipo 1, ya que obtiene un intervalo de posibles valores de I_i^P en lugar de un valor único, como se explicó en la sección 4.1.1. Por esta razón en los casos de estudio analizados en la sección 5.6 se modela P_i como número fuzzy tipo 2, utilizando los parámetros de la Tabla 5.2.

²⁹ Por simplicidad, en los cálculos de este capítulo se asume carga balanceada, sin embargo se puede utilizar el mismo procedimiento para cargas no balanceadas.

Tabla 5.3 I_i^P calculados utilizando los parámetros de la Tabla 5.2

d_i	Conjuntos fuzzy triangulares		
	Tipo 1	Tipo 2	
	I_i^P	I_{iL}^P	I_{iU}^P
F1355	0.92	0.88	0.94
F1342	0.67	0.51	0.76
F2403	0.00	0.00	0.23

Fig. 5.2 Valores de I_i^P calculados para F1355, F1342 y F2403.

5.3 Cálculo de I^I .

Para calcular las CFF del distribuidor NACNOR, se modela Z_f como número fuzzy tipo 2, utilizando los parámetros de la Tabla 5.4 (Fig. 4.6). Estos parámetros han sido seleccionados para incluir los valores más comunes de impedancias de falla de los distribuidores de MT de la ciudad de San Juan [26], [145]. Como ejemplo, en la Fig. 5.3 y Fig. 5.4 se muestran las magnitudes de las CFF de los puntos n_1 , n_8 , n_{14} y n_{26} de la Fig. 5.1, las CFF de los puntos restantes se presentan en los anexos B y E. Los valores de I_k^I en función de I_{sc} pueden ser obtenidos de estas gráficas, como se muestra en la Fig. 5.5 para $I_{sc} = 600$ A. La modelación de Z_f mediante números fuzzy tipo 2 es más general que su alternativa tipo 1, ya que se obtiene un intervalo de posibles valores de I_i^I en lugar de un valor único, como se explica en la sección 4.1.2. Por esta razón también se utiliza en la sección 5.6.

Tabla 5.4 Parámetros de los números fuzzy tipo 1 y tipo 2 utilizados para modelar Z_f .

Números fuzzy triangulares tipo 1			Números fuzzy triangulares tipo 2				
A	B	C	A_U	A_L	$B_U = B_L$	C_U	C_L
5	15	25	3	7	15	23	27

En la Fig. 5.3 y Fig. 5.4 se observa que el dominio de $\tilde{I}_k$ es mayor para fallas ubicadas en puntos cercanos a la SE AT/MT (e.g., n_1), que para fallas ubicadas en puntos lejanos (e.g., n_{26}). Este comportamiento es el esperado porque la impedancia del distribuidor aumenta en función de la distancia a la SE AT/MT, por lo tanto la sensibilidad de $\tilde{I}_k$ respecto a Z_f es mayor en puntos cercanos a la SE AT/MT que en puntos lejanos. Desde el punto de vista de la inferencia de la CO, se observa que los niveles de cortocircuito de los d_i lejanos a SE AT/MT no varían significativamente para diferentes valores de Z_f . En este caso es aceptable describir Z_f de forma aproximada y es conveniente utilizar I_{sc} para identificar los d_i candidatos, sin embargo es menos beneficioso utilizar ΔP , porque la IR de sus P_i generalmente es grande. Asimismo, se observa que los niveles de cortocircuito de los d_i cercanos a la SE AT/MT pueden variar mucho para diferentes valores de Z_f . En este caso es menos conveniente utilizar I_{sc} para identificar los d_i candidatos, sin embargo es más beneficioso utilizar ΔP porque la IR de sus P_i es pequeña. Estas características complementarias confirman la conveniencia de integrar la información proporcionada por I_{sc}

y ΔP , de esta forma es posible compensar sus deficiencias individuales y explotar sus ventajas, con el objetivo de reducir la incertidumbre de los resultados de la inferencia.

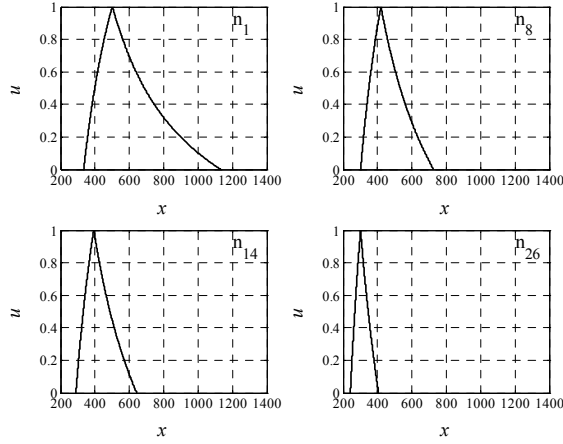


Fig. 5.3 $\tilde{I}_k$ (Z_f número fuzzy triangular tipo 1)

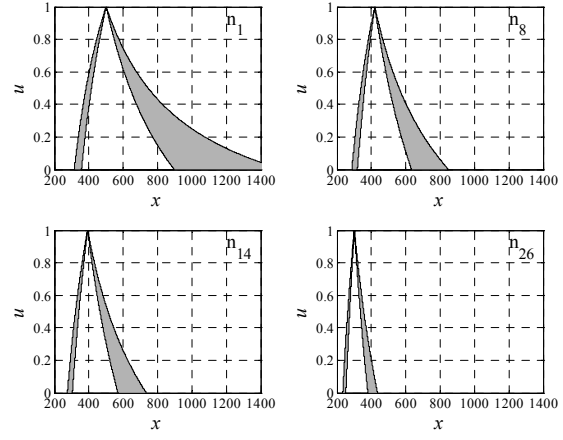


Fig. 5.4 $\tilde{I}_k$ (Z_f número fuzzy triangular tipo 2)

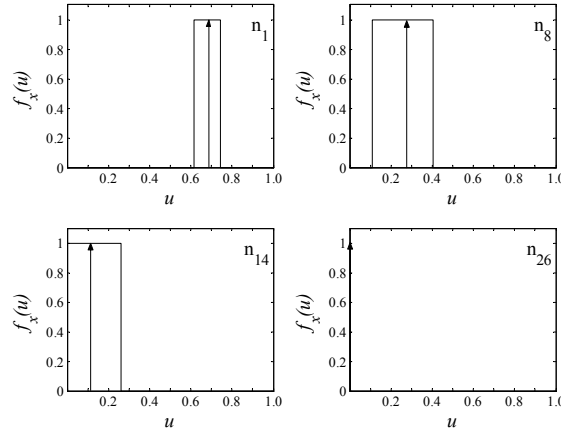


Fig. 5.5 I_k^f para $I_{sc} = 600$ A ($\tilde{I}_k$ de Fig. 5.3 y Fig. 5.4).

5.4 Cálculo de I^Q .

Como se explicó en la sección 4.1.3 para calcular I^Q se utiliza el T2-FLS de la Fig. 4.8, cuyas variables de entrada (W_i , F_i^O y T_i^M) pueden ser datos cuantitativos y/o cualitativos. Esta flexibilidad permite aprovechar toda la información disponible, independientemente de su precisión. El corazón del T2-FLS es la base de reglas, mediante la cual se relacionan las variables de entrada y la variable de salida. En este trabajo, para calcular I^Q se utiliza la base de reglas de la Tabla 4.1, la cual ha sido construida utilizando el criterio del autor y el método de categorización prototipo [110]. Sin embargo, en una implementación práctica de la metodología, en la que generalmente se dispone de un equipo de expertos (e.g., operadores de distribución, ingenieros de operación y mantenimiento, supervisores y personal de las cuadrillas, etc.), se recomienda construir la base de reglas utilizando la metodología presentada en el anexo A (sección A.3.2). Utilizando esta metodología es posible considerar la incertidumbre asociada al criterio de cada experto e inclusive a sus “grados de experiencia”. En este trabajo la base de reglas ha sido construida de tal forma que W_i sea la variable más influyente. Esta decisión se debe a que las redes de MT latinoamericanas son extensas, mayoritariamente aéreas y por lo tanto muy susceptibles a los fenómenos climatológicos. Además, solo W_i es observada en tiempo real, F_i^O y T_i^M son obtenidas del procesamiento de los datos históricos de operación y/o del conocimiento

experto de los operadores. A continuación se analiza el comportamiento de I_i^Q cuando todas las variables de entrada son cuantitativas y luego se analiza cuando todas son cualitativas.

5.4.1 Variables cuantitativas.

En la Fig. 5.6 se muestran las gráficas³⁰ de I_i^Q en función de W_i , F_i^O y T_i^M . Cada gráfica consiste de una superficie superior ($I_i^{Q_U}$) y otra inferior ($I_i^{Q_L}$), donde $I_i^Q = [I_i^{Q_L}, I_i^{Q_U}]$. Estas gráficas han sido calculadas variando F_i^O y T_i^M y manteniendo constante W_i , aquí $W_i = 1.0$ representa la mejor condición climática y $W_i = 0.0$ la peor. Las gráficas han sido obtenidas modelando las entradas mediante números crisp y los términos lingüísticos de la base de reglas mediante los conjuntos fuzzy triangulares tipo 2 de la Tabla 5.5.

Tabla 5.5 Parámetros de los conjuntos fuzzy tipo 2 que modelan la base de reglas del T2-FLS utilizado para calcular I_i^Q .

V.	Términos Lingüísticos	Conjuntos fuzzy triangulares tipo 2				
		A_U	A_L	$B_L = B_U$	C_L	C_U
W_i	Malo	0.000	0.000	0.000	0.500	0.600
	Regular	0.000	0.100	0.500	0.900	1.000
	Bueno	0.400	0.500	1.000	1.000	1.000
F_i^O	Bajo	0.000	0.000	0.000	0.500	0.600
	Medio	0.000	0.100	0.500	0.900	1.000
	Alto	0.400	0.500	1.000	1.000	1.000
T_i^M	Corto	0.000	0.000	0.000	0.500	0.600
	Medio	0.000	0.100	0.500	0.900	1.000
	Largo	0.400	0.500	1.000	1.000	1.000
I_i^Q	Insignificante	0.000	0.000	0.000	0.100	0.150
	Muy Pequeño	0.000	0.050	0.125	0.225	0.275
	Pequeño	0.100	0.150	0.250	0.350	0.400
	Medio Pequeño	0.225	0.275	0.375	0.475	0.525
	Medio	0.350	0.400	0.500	0.600	0.650
	Medio Grande	0.475	0.525	0.625	0.725	0.775
	Grande	0.600	0.650	0.750	0.850	0.900
	Muy Grande	0.725	0.775	0.875	0.950	1.000
	Excesivo	0.850	0.900	1.000	1.000	1.000

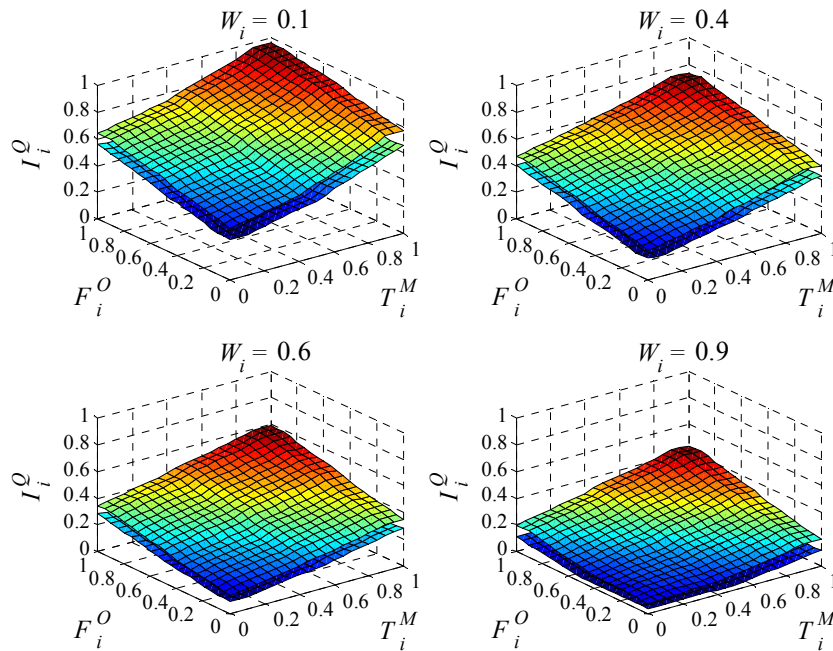


Fig. 5.6 Gráfica de I_i^Q en función de W_i , F_i^O y T_i^M (entradas cuantitativas).

³⁰ Estas gráficas son denominadas en la literatura como “superficies de control”, en este caso son hipersuperficies de $I_i^Q = f(W_i, F_i^O, T_i^M)$.

La principal ventaja de utilizar conjuntos fuzzy triangulares es que la metodología para la construcción de sus funciones de pertenencia es muy intuitiva y directa, esta metodología es descrita detalladamente en el anexo A (sección A.3.1). En la Fig. 5.6 se observa que I_i^Q aumenta rápidamente al pasar de una condición climática a otra peor, este es el comportamiento esperado ya que a medida que el clima empeora, su influencia sobre la operación de los dispositivos aumenta.

En las Fig. 5.7.1-5.7.4 y Fig. 5.8.1-5.8.4 se muestran las gráficas de I_i^Q para F_i^O variable, W_i y T_i^M constantes. En las Fig. 5.7.5-5.7.8 y Fig. 5.8.5-5.8.8 se muestran las gráficas de I_i^Q para T_i^M variable, W_i y F_i^O constantes. En la Fig. 5.7 ($W_i = 0.1$) se observa que I_i^Q crece más rápido para valores de $T_i^M \geq 0.5$, esto significa que para esta condición la influencia de T_i^M sobre I_i^Q es mayor. En la Fig. 5.8 ($W_i = 0.9$) las gráficas son prácticamente iguales, esto significa que para esta condición la influencia de F_i^O y T_i^M sobre I_i^Q es similar. Basándose en este análisis se concluye que la influencia de F_i^O y T_i^M sobre I_i^Q es similar mientras el clima es “Bueno” o “Regular”, pero cuando el clima es “Malo” la influencia de T_i^M es mayor.

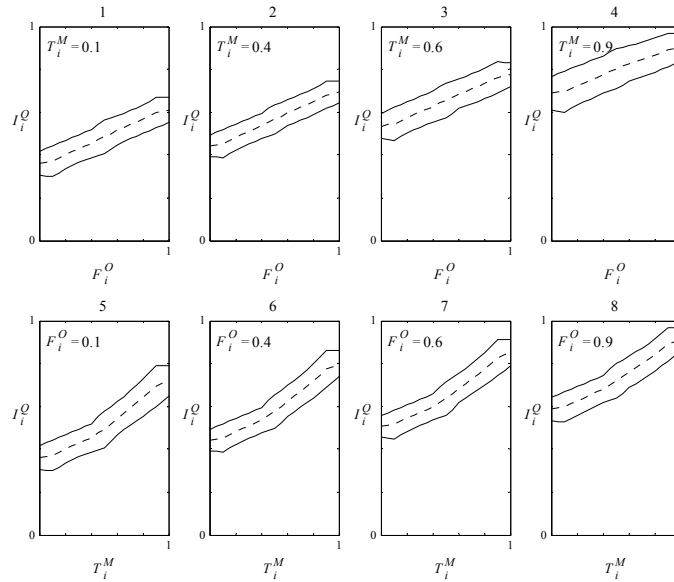


Fig. 5.7 Gráficas de I_i^Q para $W_i = 0.1$

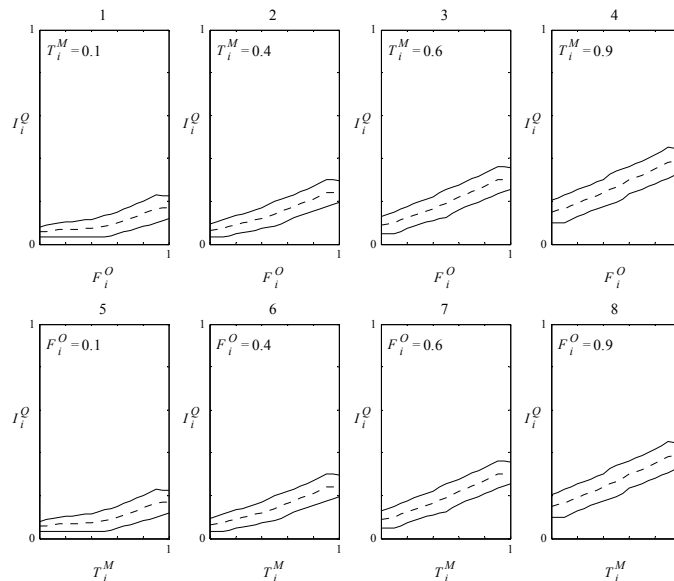


Fig. 5.8 Gráficas de I_i^Q para $W_i = 0.9$

5.4.2 Variables cualitativas.

A continuación se analiza el comportamiento de I_i^Q cuando se utilizan expresiones lingüísticas como entradas para el T2-FLS, en este caso cada expresión es modelada mediante un conjunto fuzzy triangular tipo 2. El vocabulario seleccionado para cada variable de entrada y los parámetros de los números fuzzy correspondientes se muestran en la Tabla 5.6. Otras expresiones pueden ser adicionadas a este vocabulario o pueden sustituir a las propuestas, también pueden utilizarse expresiones de la forma “clima lluvioso con vientos fuertes”, esto dependerá del criterio y léxico de los usuarios. El T2-FLS además es capaz de calcular cuando algunas de las entradas son números crisp y las restantes son expresiones lingüísticas, este caso es analizado en la sección 5.6. En la Fig. 5.9 se muestran las gráficas de I_i^Q en función de W_i , F_i^O y T_i^M . Se observa que las gráficas son muy similares a las de la Fig. 5.6, este resultado es el esperado, ya que la base de reglas no ha sido modificada.

Tabla 5.6 Parámetros de conjuntos fuzzy que modelan los datos de entrada cualitativos del T2-FLS utilizado para calcular I_i^Q (Caso 1).

Términos Lingüísticos			Caso 1				
W_i	F_i^O	T_i^M	A_U	A_L	$B_L=B_U$	C_L	C_U
Pésimo	Insignificante	Insignificante	0.000	0.000	0.000	0.100	0.150
Muy Malo	Muy Baja	Muy Corto	0.000	0.050	0.125	0.225	0.275
Malo	Baja	Corto	0.100	0.150	0.250	0.350	0.400
Medio Malo	Media Baja	Medio Corto	0.225	0.275	0.375	0.475	0.525
Regular	Media	Medio	0.350	0.400	0.500	0.600	0.650
Medio Bueno	Media Alta	Medio Largo	0.475	0.525	0.625	0.725	0.775
Bueno	Alta	Largo	0.600	0.650	0.750	0.850	0.900
Muy Bueno	Muy Alta	Muy Largo	0.725	0.775	0.875	0.950	1.000
Excelente	Extra Alta	Extra Largo	0.850	0.900	1.000	1.000	1.000

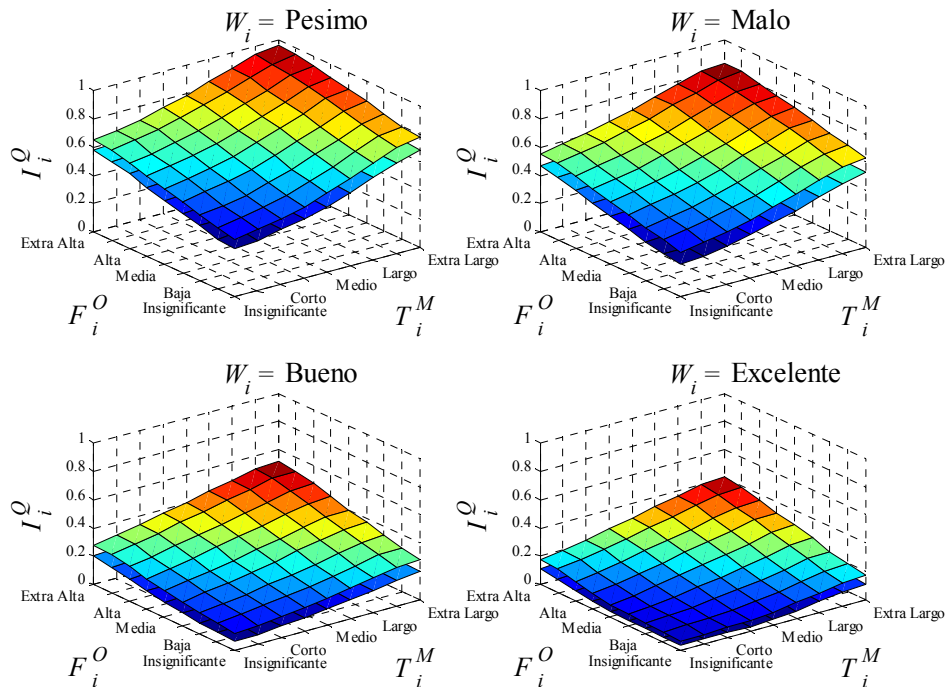


Fig. 5.9 Gráfica de I_i^Q en función de W_i , F_i^O y T_i^M (entradas cualitativas).

El efecto de utilizar expresiones lingüísticas como entradas es incrementar el dominio del intervalo de incertidumbre asociado a I_i^Q ($\Delta = I_i^Q_U - I_i^Q_L$). Este comportamiento se observa en las Tablas 5.7 y 5.8, donde se comparan los valores de I_i^Q obtenidos utilizando números crisp y sus expresiones lingüísticas correspondientes. El incremento en Δ es congruente con

que un número fuzzy tipo 2 es más “incierto” que un número crisp. Se observa que la diferencia en los resultados es pequeña, esto confirma la factibilidad de utilizar números fuzzy tipo 2 para modelar la incertidumbre asociada a datos cualitativos de las variables de entrada.

Tabla 5.7 Comparación de los valores de I_i^O obtenidos para entradas cuantitativas y cualitativas (W_i, T_i^M constantes y F_i^O variable).

W_i	F_i^O	T_i^M	I_{iL}^O	I_{iC}^O	I_{iU}^O	$\Delta = I_{iU}^O - I_{iL}^O$
0.375	0.000	0.375	0.252	0.293	0.333	0.081
	0.125		0.257	0.312	0.366	0.109
	0.250		0.291	0.344	0.397	0.106
	0.375		0.323	0.376	0.430	0.107
	0.500		0.352	0.420	0.487	0.135
	0.625		0.411	0.469	0.527	0.117
	0.750		0.449	0.512	0.575	0.126
	0.875		0.488	0.556	0.624	0.136
	1.000		0.528	0.580	0.631	0.103
Medio Malo	Insignificante	Medio Corto	0.239	0.295	0.350	0.111
	Muy Baja		0.248	0.313	0.378	0.131
	Baja		0.278	0.344	0.409	0.131
	Media Baja		0.308	0.378	0.447	0.139
	Media		0.343	0.412	0.480	0.137
	Media Alta		0.377	0.445	0.513	0.136
	Alta		0.412	0.480	0.548	0.135
	Muy Alta		0.442	0.512	0.582	0.140
	Extra Alta		0.473	0.531	0.589	0.116

Tabla 5.8 Comparación de los valores de I_i^O obtenidos para entradas cuantitativas y cualitativas (W_i, F_i^O constantes y T_i^M variable).

W_i	F_i^O	T_i^M	I_{iL}^O	I_{iC}^O	I_{iU}^O	$\Delta = I_{iU}^O - I_{iL}^O$
0.375	0.375	0.000	0.252	0.293	0.333	0.081
		0.125	0.257	0.312	0.366	0.109
		0.250	0.291	0.344	0.397	0.106
		0.375	0.323	0.376	0.430	0.107
		0.500	0.352	0.416	0.480	0.128
		0.625	0.403	0.456	0.508	0.105
		0.750	0.433	0.488	0.542	0.109
		0.875	0.465	0.522	0.579	0.114
		1.000	0.500	0.541	0.582	0.082
Medio Malo	Medio Baja	Insignificante	0.239	0.294	0.348	0.109
		Muy Baja	0.248	0.312	0.376	0.129
		Baja	0.278	0.343	0.407	0.129
		Media Baja	0.308	0.378	0.447	0.139
		Media	0.344	0.414	0.485	0.140
		Media Alta	0.383	0.456	0.530	0.147
		Alta	0.425	0.501	0.576	0.151
		Muy Alta	0.462	0.542	0.623	0.161
		Extra Alta	0.497	0.566	0.634	0.137

En la Fig. 5.10 y Fig. 5.11 se analiza el efecto de aumentar la incertidumbre de los números fuzzy tipo 2 utilizados para modelar las expresiones lingüísticas. Para ello se comparan los resultados obtenidos utilizando los parámetros de las Tablas 5.6, 5.9 y 5.10. Se observa que a medida que la incertidumbre de las entradas crece, también la incertidumbre de la salida (Δ) aumenta. En la Fig. 5.12 se muestra gráficamente como aumenta la incertidumbre de los números fuzzy tipo 2 utilizados en cada caso, como ejemplo se utiliza $W_i = \text{Medio Malo}$. Estos resultados son importantes porque demuestran que el T2-FLS realiza un mapeo de las incertidumbres del espacio de las variables de entrada (W_i, F_i^O y T_i^M) al espacio de la variable de salida (I_i^O), i.e., las incertidumbres “fluyen” a través del T2-FLS.

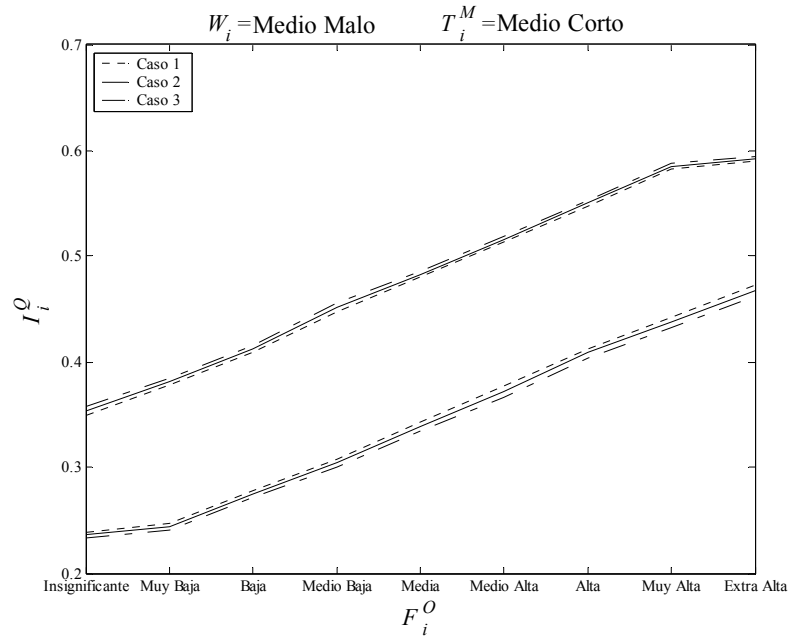


Fig. 5.10 Valores de I_i^O para $W_i = \text{Medio Malo}$, $T_i^M = \text{Medio Corto}$ y F_i^O variable. Las expresiones lingüísticas son modeladas mediante los números fuzzy tipo 2 de la Tabla 5.6 (Caso 1), Tabla 5.9 (Caso 2) y Tabla 5.10 (Caso 3).

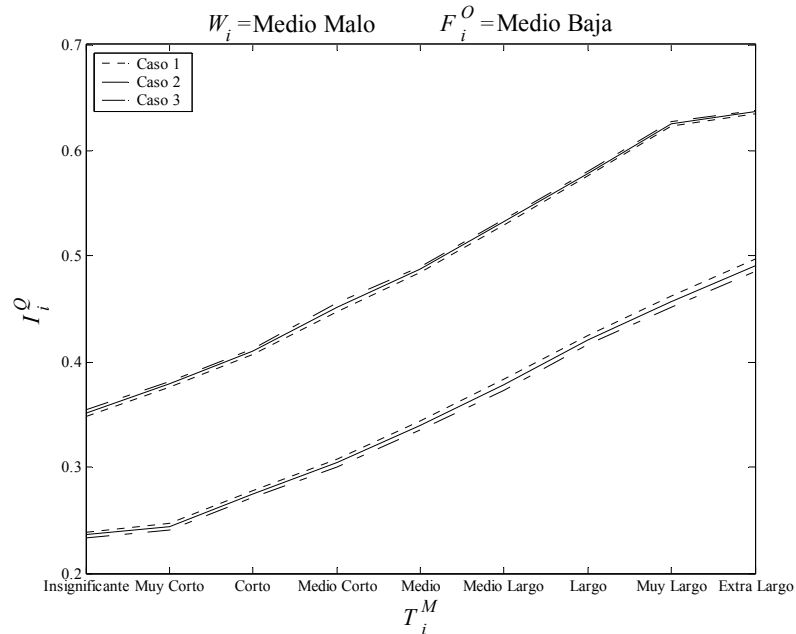


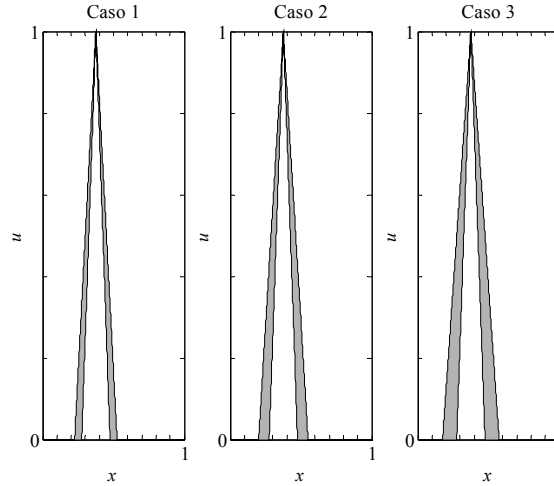
Fig. 5.11 Valores de I_i^O para $W_i = \text{Medio Malo}$, $F_i^O = \text{Medio Baja}$ y T_i^M variable. Las expresiones lingüísticas son modeladas mediante los números fuzzy tipo 2 de la Tabla 5.6 (Caso 1), Tabla 5.9 (Caso 2) y Tabla 5.10 (Caso 3).

Tabla 5.9 Parámetros de conjuntos fuzzy que modelan los datos de entrada cualitativos del T2-FLS utilizado para calcular I_i^O (Caso 2).

Términos Lingüísticos			Caso 2				
W_i	F_i^O	T_i^M	A_U	A_L	$B_L=B_U$	C_L	C_U
Pésimo	Insignificante	Insignificante	0.000	0.000	0.000	0.100	0.175
Muy Malo	Muy Baja	Muy Corto	-0.025	0.050	0.125	0.225	0.300
Malo	Baja	Corto	0.075	0.150	0.250	0.350	0.425
Medio Malo	Media Baja	Medio Corto	0.200	0.275	0.375	0.475	0.550
Regular	Media	Medio	0.325	0.400	0.500	0.600	0.675
Medio Bueno	Media Alta	Medio Largo	0.450	0.525	0.625	0.725	0.800
Bueno	Alta	Largo	0.575	0.650	0.750	0.850	0.925
Muy Bueno	Muy Alta	Muy Largo	0.700	0.775	0.875	0.950	1.025
Excelente	Extra Alta	Extra Largo	0.825	0.900	1.000	1.000	1.000

Tabla 5.10 Parámetros de conjuntos fuzzy que modelan los datos de entrada cualitativos del T2-FLS utilizado para calcular I_i^Q (Caso 3).

Términos Lingüísticos			Caso 3				
W_i	F_i^O	T_i^M	A_U	A_L	$B_L=B_U$	C_L	C_U
Pésimo	Insignificante	Insignificante	0.000	0.000	0.000	0.100	0.200
Muy Malo	Muy Baja	Muy Corto	-0.050	0.050	0.125	0.225	0.325
Malo	Baja	Corto	0.050	0.150	0.250	0.350	0.450
Medio Malo	Media Baja	Medio Corto	0.175	0.275	0.375	0.475	0.575
Regular	Media	Medio	0.300	0.400	0.500	0.600	0.700
Medio Bueno	Media Alta	Medio Largo	0.425	0.525	0.625	0.725	0.825
Bueno	Alta	Largo	0.550	0.650	0.750	0.850	0.950
Muy Bueno	Muy Alta	Muy Largo	0.675	0.775	0.875	0.950	1.050
Excelente	Extra Alta	Extra Largo	0.800	0.900	1.000	1.000	1.000

Fig. 5.12 Números fuzzy tipo 2 utilizados para modelar W_i = Medio Malo para los casos de la Fig. 5.10 y Fig. 5.11.

5.5 Cálculo de μC^+ .

A continuación se analiza el comportamiento de μc_i^+ en función de I_i^P , I_i^I e I_i^Q . El objetivo es observar la influencia de cada variable sobre la certeza de operación de cada d_i . Por simplicidad el análisis se realiza solamente cuando las variables de entrada son modeladas como números crisp. Sin embargo es necesario recordar que en el caso general todas las variables son intervalos tipo 1, como se explica en la sección 4.1.4. Los términos lingüísticos de la base de reglas del T2-FLS utilizado para calcular μc_i^+ , son modelados mediante los conjuntos fuzzy triangulares tipo 2 de la Tabla 5.11. Los consecuentes de esta base de reglas han sido seleccionados utilizando el criterio del autor, de tal forma que el orden de influencia (de mayor a menor) de las variables es I_i^P , I_i^I e I_i^Q . Esta decisión se basa en que I_i^P e I_i^I son obtenidos principalmente del análisis de datos de TR, i.e., de eventos observados. En cambio, de las variables utilizadas para calcular I_i^Q , solamente W_i es observada en TR, F_i^O y T_i^M son obtenidas a partir del análisis de datos estadísticos y/o conocimiento experto, por lo tanto son más subjetivas e inciertas. Se escoge I_i^P como la variable más influyente porque los datos utilizados para su cálculo son menos inciertos que los empleados para obtener I_i^I , la cual depende principalmente del valor estimado de Z_f . Como se indica en la sección 5.4, en una implementación práctica de la metodología, la base de reglas puede ser construida mediante el procedimiento presentado en la sección A.3.2. En la Fig. 5.13 se muestran las gráficas de μc_i^+ en función de I_i^P , I_i^I e I_i^Q . Cada gráfica ha sido calculada variando I_i^P e I_i^Q y manteniendo constante I_i^I , las superficies inferior y superior corresponden a $\mu c_i^+{}_L$ y $\mu c_i^+{}_U$ respectivamente, donde $\mu c_i^+ = [\mu c_i^+{}_L, \mu c_i^+{}_U]$. Se observa que μc_i^+ crece rápidamente cuando I_i^P e I_i^I aumentan, en cambio su crecimiento es más lento cuando I_i^Q aumenta, este resultado concuerda con la definición de la base de reglas.

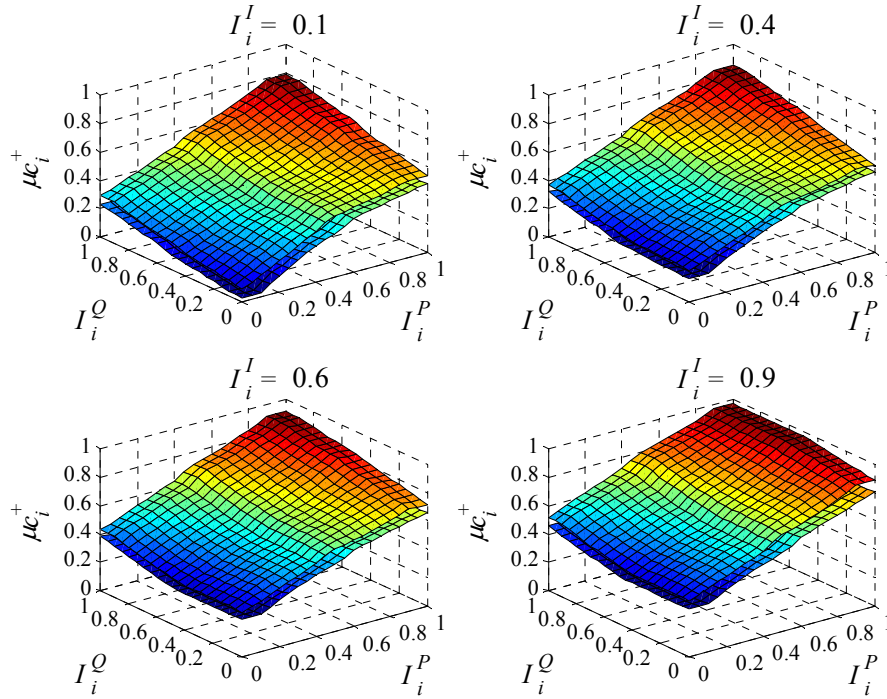
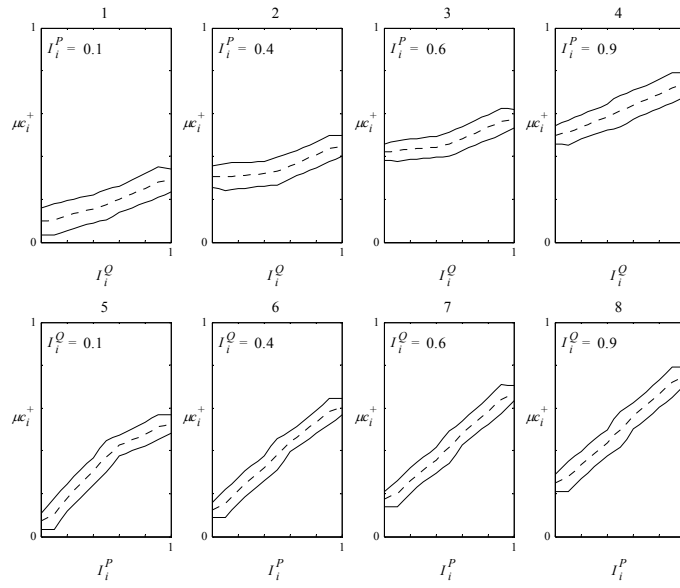
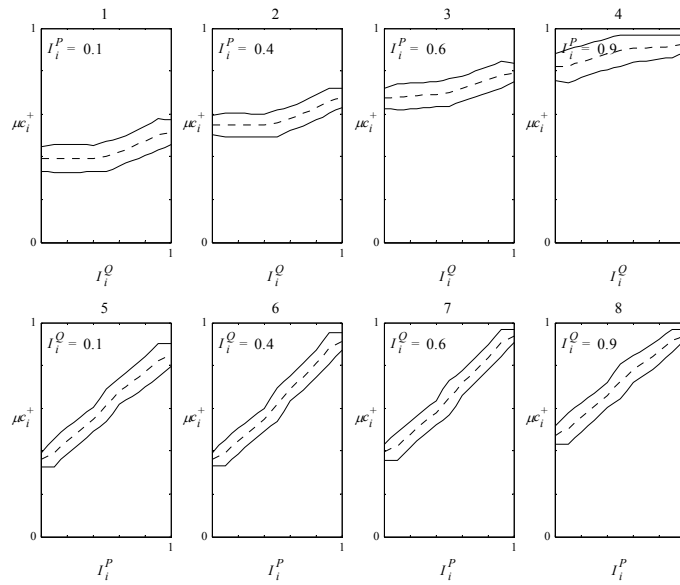


Fig. 5.13 Gráfica de $\mu_{c_i}^+$ en función de I_i^P , I_i^I e I_i^Q (entradas cuantitativas e I_i^I constante).

Tabla 5.11 Parámetros de conjuntos fuzzy tipo 2 que modelan base de reglas del T2-FLS utilizado para calcular $\mu_{c_i}^+$.

V.	Términos Lingüísticos	Conjuntos fuzzy triangulares tipo 2				
		A_U	A_L	$B_L = B_U$	C_L	C_U
I_i^P	Pequeño	0.000	0.000	0.000	0.500	0.600
	Mediano	0.000	0.100	0.500	0.900	1.000
	Grande	0.400	0.500	1.000	1.000	1.000
I_i^I	Pequeño	0.000	0.000	0.000	0.500	0.600
	Mediano	0.000	0.100	0.500	0.900	1.000
	Grande	0.400	0.500	1.000	1.000	1.000
I_i^Q	Pequeño	0.000	0.000	0.000	0.500	0.600
	Mediano	0.000	0.100	0.500	0.900	1.000
	Grande	0.400	0.500	1.000	1.000	1.000
$\mu_{c_i}^+$	Insignificante	0.000	0.000	0.000	0.100	0.150
	Muy Pequeño	0.000	0.050	0.125	0.225	0.275
	Pequeño	0.100	0.150	0.250	0.350	0.400
	Medio Pequeño	0.225	0.275	0.375	0.475	0.525
	Medio	0.350	0.400	0.500	0.600	0.650
	Medio Grande	0.475	0.525	0.625	0.725	0.775
	Grande	0.600	0.650	0.750	0.850	0.900
	Muy Grande	0.725	0.775	0.875	0.950	1.000
	Excesivo	0.850	0.900	1.000	1.000	1.000

En las Fig. 5.14.1-5.14.4 y Fig. 5.15.1-5.15.4 se muestran las gráficas de $\mu_{c_i}^+$ para I_i^Q variable, I_i^P e I_i^I constantes. En las Fig. 5.14.5-5.14.8 y Fig. 5.15.5-5.15.8 se muestran las gráficas de $\mu_{c_i}^+$ para I_i^P variable, I_i^I e I_i^Q constantes. En la Fig. 5.14 y Fig. 5.15 se observa que $\mu_{c_i}^+$ crece más rápido cuando I_i^P aumenta y que la influencia de I_i^Q es más perceptible cuando $I_i^Q > 0.5$. Estos comportamientos son consistentes con la definición de prioridades de la base de reglas y con el hecho que $I_i^Q < 0.5$ es resultado de combinaciones de factores (representados por W_i , F_i^O y T_i^M) que generalmente son de bajo riesgo para la red de MT. También se observa que la influencia de I_i^P es significativa cuando I_i^I es “Pequeño” (Fig. 5.14), sin embargo, es menos evidente cuando I_i^I es “Grande” (Fig. 5.15). Esto se debe a que I_i^I es la segunda variable más influyente, por lo tanto su contribución a la salida final se vuelve más importante a medida que su valor aumenta.

Fig. 5.14. Gráficas de μc_i^+ para $I_i^I = 0.1$ Fig. 5.15 Gráficas de μc_i^+ para $I_i^I = 0.9$

Para analizar la influencia de I_i^Q sobre la selección de los d_i candidatos, en la Fig. 5.16 se muestran las gráficas de μc_i^+ para I_i^P , I_i^I variables e I_i^Q constante. Se observa que la influencia de I_i^Q es más evidente en dos situaciones:

- Cuando los valores de I_i^P e I_i^I son “Medianos”: esta situación es muy incierta, es difícil y arriesgado tomar una decisión utilizando solamente los valores de I_i^P e I_i^I . En este caso es necesario tomar en cuenta los datos históricos de operación y el conocimiento experto (I_i^Q) para seleccionar los d_i candidatos, sin embargo, I_i^Q debe ser “Grande” para influir decisivamente en los resultados. Este comportamiento puede verificarse comparando las gráficas correspondientes a $I_i^Q = 0.1$ e $I_i^Q = 0.9$. Se observa que la región central de las superficies (μc_i^+ , μc_i^+) se desplaza verticalmente hacia arriba a medida que I_i^Q aumenta.

- Cuando los valores de I_i^P son “Grandes” y los valores de I_i^I son “Pequeños”: esta situación también es incierta, sin embargo I_i^P es la variable más influyente y “cierta” del modelo, por lo tanto en este caso es deseable que a medida que I_i^Q aumente, el efecto combinado de I_i^P e I_i^Q sea aumentar la certeza de operación ($\mu_{c_i}^+$). Sin embargo, como en el caso anterior, I_i^Q debe ser “Grande” para influir decisivamente en los resultados. Este fenómeno puede verificarse comparando las gráficas correspondientes a $I_i^Q = 0.1$ e $I_i^Q = 0.9$, se observa que la región cercana a $I_i^P = 1$ e $I_i^I = 0$ se desplaza verticalmente hacia arriba a medida que I_i^Q aumenta.

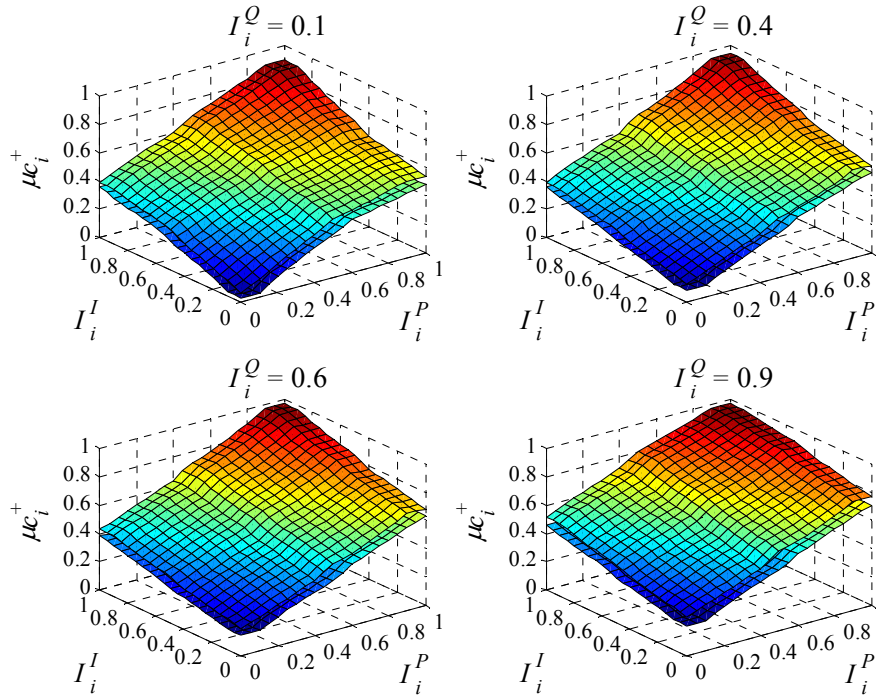


Fig. 5.16 Gráfica de $\mu_{c_i}^+$ en función de I_i^P , I_i^I e I_i^Q (entradas cuantitativas e I_i^Q constante).

La contribución de I_i^Q es más evidente en la Fig. 5.17, en la que se muestran las gráficas de las fronteras de decisión del modelo de TR. Las gráficas de $\mu_{c_i}^+{}_L$ y $\mu_{c_i}^+{}_U$ pueden ser obtenidas mediante la intersección de las superficies de la Fig. 5.16 con el plano $\mu_{c_i}^+ = 0.5$. La gráfica de $\mu_{c_i}^+{}_C$ puede ser obtenida mediante la defuzzificación de $\mu_{c_i}^+ = [\mu_{c_i}^+{}_L, \mu_{c_i}^+{}_U]$ y su intersección con el plano $\mu_{c_i}^+ = 0.5$. La región ubicada a la derecha de las gráficas contiene los valores de I_i^P , I_i^I e I_i^Q que satisfacen cualquiera de las condiciones de decisión representadas por (4.17)-(4.19). La región ubicada a la izquierda de las gráficas contiene los valores de I_i^P , I_i^I e I_i^Q que no satisfacen estas condiciones de decisión. La región ubicada entre las gráficas refleja el efecto de las incertidumbres de los datos de entrada y del modelo (e.g., el significado de los términos lingüísticos de la base de reglas), sobre la salida final. Se observa que mediante los T2-FLS es posible obtener una frontera de decisión “suave”, suficientemente flexible para permitir la incorporación del criterio del usuario en la selección de los d_i candidatos. Por ejemplo, una decisión conservadora, desde el punto de vista del usuario, sería escoger como frontera de decisión las curvas correspondientes a $\mu_{c_i}^+{}_L = 0.5$, porque menos valores satisfacen la condición de decisión. En cambio una decisión arriesgada sería escoger las curvas correspondientes a $\mu_{c_i}^+{}_U = 0.5$, porque más valores satisfacen la condición de decisión. Mediante este análisis es posible obtener una familia de curvas basándose en el grado de “riesgo” asumido por el usuario. Como se explicó en la sección 4.1.4, en este trabajo se utilizan las curvas correspondientes a $\mu_{c_i}^+{}_C = 0.5$, esta

representa una relación de compromiso desde el punto de vista del riesgo implícito en la decisión.

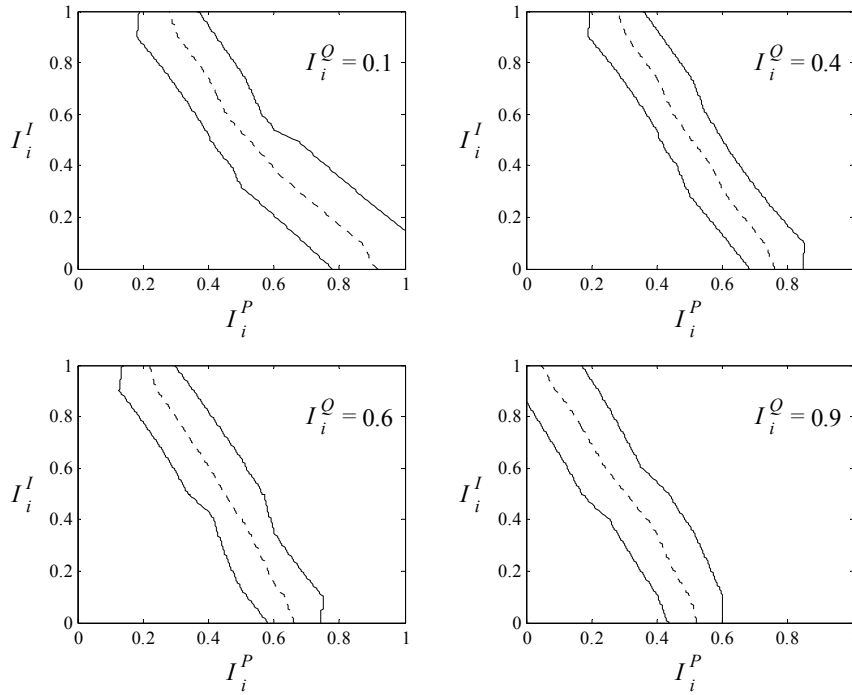


Fig. 5.17 Fronteras de decisión del modelo de TR.

Del análisis de la Fig. 5.17 se observa que hay dos situaciones en las que la contribución de I_i^Q no es significativa:

- Cuando los valores de I_i^P e I_i^I son “Grandes”: en este caso la contribución de I_i^Q es menos evidente, esto se debe a que en esta situación la selección de los d_i candidatos es menos incierta, entonces es menos necesaria la contribución de I_i^Q .
- Cuando los valores de I_i^P son “Pequeños” y los valores de I_i^I son “Grandes”: en este caso independientemente del valor de I_i^Q , no se satisfacen las condiciones de decisión (4.17) y (4.18). Solamente se satisface la condición de decisión (4.19) para valores de I_i^I e I_i^Q mayores que 0.9, esto se debe a que I_i^I es menos influyente y “cierta” que I_i^P , por lo tanto el efecto combinado de I_i^I e I_i^Q es menor que el causado por valores similares de I_i^P e I_i^Q .

Del análisis realizado se observa que el modelo de TR incorpora eficientemente, dentro de las limitaciones de los modelos basados en técnicas de inteligencia artificial, el conocimiento experto (e.g., el criterio de un operador experimentado) al proceso de selección de los d_i candidatos. En este sentido representa un aporte novedoso para la inferencia de la CO de la red de MT. En la siguiente sección se evalúa el desempeño del modelo de inferencia en varios casos prácticos, en los que se procesan los datos disponibles en TR y TRE con el objetivo de inferir dinámicamente la CO del distribuidor NACNOR.

5.6 Aplicación de la metodología.

En esta sección se infiere la CO del distribuidor NACNOR para los seis casos indicados en la Fig. 5.18. En el caso 1 se utilizan datos de TR y en los casos 2-6 se utilizan datos de TR y TRE. En todos los casos se asume que el tipo de falla identificado y los valores medidos de I_{sc} son reportados por los relevadores instalados en la SE AT/MT. Se asume que las llamadas telefónicas son procesadas por el CIS para descartar aquellas debidas a problemas comerciales y utilizar solamente las causadas por problemas operativos. En todos los casos P_i y Z_f son modelados mediante los conjuntos fuzzy de las Tablas 5.1 y 5.4. Los valores de W_i y T_i^M utilizados son los mismos para todos los d_i (W_i = “Regular”, T_i^M = “Mediano”) y los valores de F_i^O son los mostrados en la Tabla 5.12. Estos términos lingüísticos son modelados mediante los conjuntos fuzzy tipo 2 de la Tabla 5.6.

Tabla 5.12 Valores de F_i^O de los d_i del distribuidor de la Fig. 5.1.

d_i	F_i^O	d_i	F_i^O	d_i	F_i^O	d_i	F_i^O
F1301	0	F1325	Baja	F1352	Baja	F1340	0
R021	0	F1342	0	F1322	Muy Alta	F1785	Grande
F1312	0	F1333	Media	F1371	0	F1364	0
F1326	0	F1303	Baja	F1369	0	F1895	0
F883	Alta	F1332	Baja	F1304	Baja	F1327	Baja
F2402	Baja	F1384	0	F1367	0	F1320	Baja
F1355	0	F1368	Medio Baja	F1331	0	F1349	Baja
F1357	Baja	F1310	0	F1329	Baja	F1381	0
F1382	0	F1361	0	F1379	0	F1662	0
R032	Baja	F1273	Medio Baja	F2446	0	F1366	0
F1348	0	F1677	0	F1337	Medio Baja	F1664	0
F2403	0	F1759	Media	F1339	Medio Alta	F1862	Medio Baja
F1345	0	F1377	0	F1318	0	F1374	0

El objetivo de las simulaciones es verificar que el modelo de TR es capaz de inferir que dispositivo de protección realmente ha operado ($d_{i \text{ real}}$). Cuando no es posible obtener una respuesta definitiva, el objetivo es que el modelo de TR identifique a los $d_{i \text{ real}}$ como candidatos y posteriormente finalizar la inferencia utilizando el modelo de TRE. Los principales problemas a considerar son:

- No se conoce el valor verdadero del flujo de potencia activa de $d_{i \text{ real}}$ ($P_{i \text{ real}}$), solamente se conoce su valor calculado (P_i), el cual es una buena aproximación de $P_{i \text{ real}}$. Esto significa que ΔP no es exactamente igual a P_i . El modelo de TR debe ser capaz de identificar a $d_{i \text{ real}}$ como candidato, utilizando valores de ΔP cercanos pero no iguales a P_i . Estos valores están dentro del intervalo $[\Delta P_{\min}, \Delta P_{\max}]$. Así se verifica que el modelo obtiene buenos resultados considerando la incertidumbre asociada al valor de $P_{i \text{ real}}$.
- No se conoce el valor real de la impedancia de falla ($Z_{f \text{ real}}$), solamente se dispone de una aproximación “ruda” o “gruesa”, modelada por el número fuzzy $\tilde{Z}_f$. Este número fuzzy asigna diferentes grados de pertenencia a un intervalo de posibles impedancias de falla ($[Z_{f \min}, Z_{f \max}]$), se asume que $Z_{f \text{ real}}$ está dentro de este intervalo³¹. Utilizando $\tilde{Z}_f$ se calcula $\tilde{I}_k$ para varios puntos de la zona protegida por $d_{i \text{ real}}$, $\tilde{I}_k$ también es un número fuzzy que asigna diferentes grados de pertenencia a un intervalo de corrientes de falla posibles, se asume que I_{sc} está dentro de este

³¹ Esto significa que la aproximación es suficientemente buena para que $Z_{f \text{ real}}$ esté incluida dentro de $[Z_{f \min}, Z_{f \max}]$.

intervalo. El modelo de TR debe ser capaz de identificar a d_i *real* como candidato, utilizando valores de I_{sc} dentro del dominio de $\tilde{I}_k$. Así se verifica que el modelo obtiene buenos resultados considerando la incertidumbre acerca de $Z_{f \text{ real}}$.

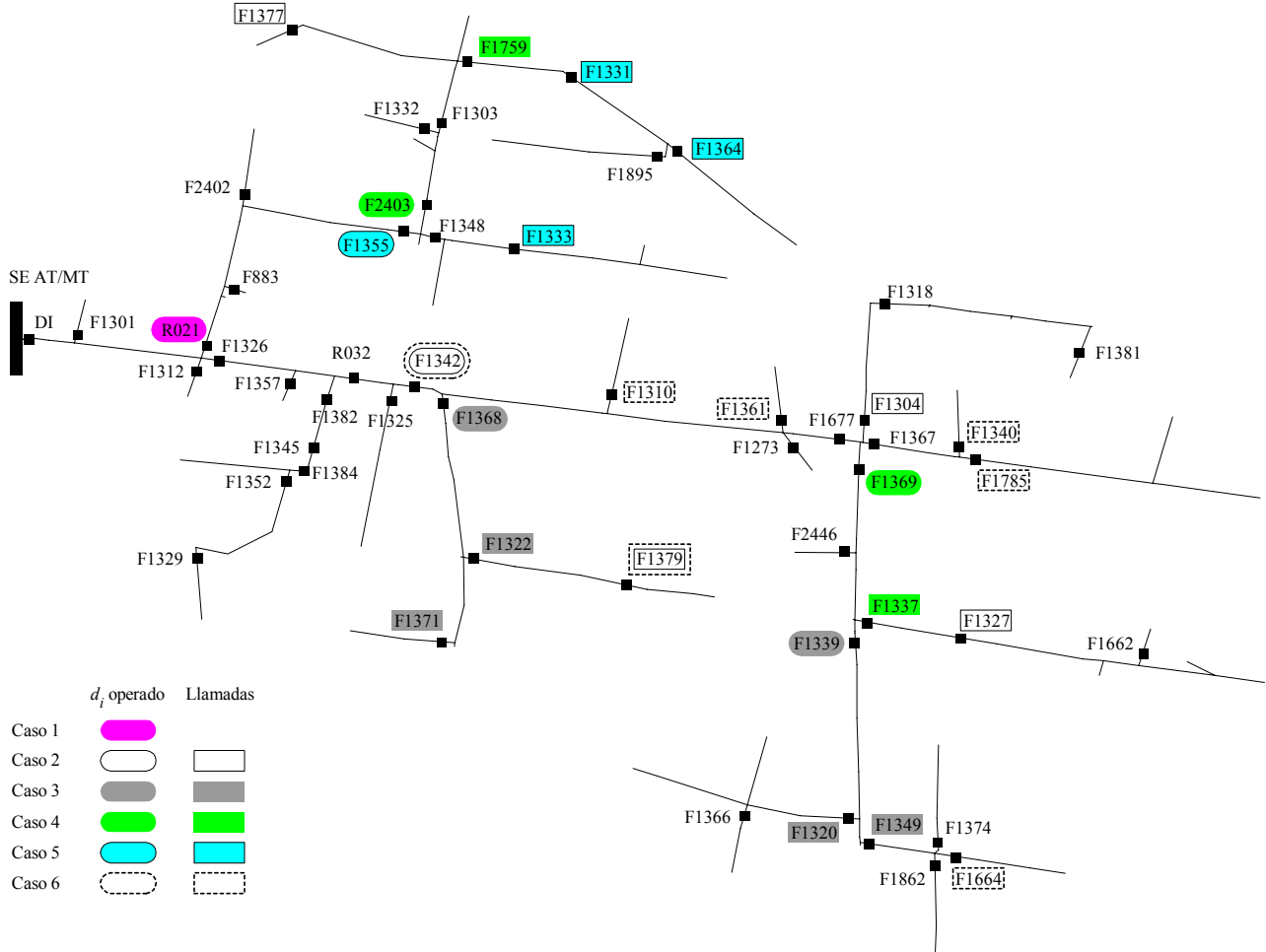


Fig. 5.18 Casos utilizados para analizar el desempeño de la metodología de inferencia dinámica de la CO.

5.6.1 Caso 1 – Operación de R021.

En este caso se simulan fallas monofásicas a tierra en los puntos n_1 - n_4 de la Fig. 5.1, los cuales son protegidos por el reconectador R021. Las simulaciones se han realizado para dos valores de $\Delta P_{3\phi}$ ($\Delta P_{3\phi \text{ min}} = 260 \text{ kW}$, $\Delta P_{3\phi \text{ max}} = 280 \text{ kW}$) y siete valores de $I_{sc1\phi}$ ($I_{sc1\phi \text{ min}} = 350 \text{ A}$, $I_{sc1\phi \text{ max}} = 650 \text{ A}$). Esto se hace con el objetivo de analizar el efecto de las incertidumbres asociadas a P_i y Z_f sobre los resultados finales. Como se muestra en la Tabla 5.13, en el intervalo $[I_{sc1\phi \text{ min}}, I_{sc1\phi \text{ max}}]$ están incluidos los valores de $I_{sc1\phi}$ correspondientes a fallas ubicadas en los puntos n_1 - n_4 y valores de Z_f comprendidos en el intervalo $[10\Omega, 20\Omega]$. Estos valores de Z_f representan el 25 por ciento del intervalo total utilizado comúnmente para la coordinación de protecciones en distribuidores de MT ($Z_f = [0\Omega, 40\Omega]$) [94].

Los resultados obtenidos por la metodología se muestran en la Tabla 5.14, se observa que en todas las simulaciones se logra identificar correctamente al dispositivo de protección que ha operado (R021) utilizando solamente los datos de TR. Este resultado es el esperado, esto se debe a que los valores de $\Delta P_{3\phi \text{ min}}$ son muy diferentes a los de los d_i restantes. Además, la

combinación $\Delta P_{3\phi}$ e $I_{sc1\phi}$ solamente puede ser causada por la operación de los reconectores R021 y R032, esto facilita la inferencia.

Tabla 5.13 Valores de $I_{sc1\phi}$ (crisp) correspondientes a fallas ubicadas en los puntos n_1 - n_4 (R021) y $Z_f = [0\Omega, 40\Omega]$.

n_k	$I_{sc1\phi} (A)$								
	$Z_f = 0\Omega$	$Z_f = 5\Omega$	$Z_f = 10\Omega$	$Z_f = 15\Omega$	$Z_f = 20\Omega$	$Z_f = 25\Omega$	$Z_f = 30\Omega$	$Z_f = 35\Omega$	$Z_f = 40\Omega$
n_1	2902.00	1130.80	687.70	500.88	398.72	334.45	290.33	258.17	233.70
n_2	2039.30	993.60	641.03	478.01	385.24	325.57	284.03	253.48	230.06
n_3	1728.20	923.85	614.98	464.80	377.31	320.30	280.28	250.66	227.87
n_4	1391.50	829.70	576.88	444.82	365.12	312.11	274.40	246.24	224.43

Tabla 5.14 Índices y certezas de operación para el caso 1.

$\Delta P_{3\phi}$ (kW)	$I_{sc1\phi}$ (A)	d_i	I_{iL}^P	I_{iU}^P	I_{iL}^I	I_{iU}^I	I_{iL}^O	I_{iU}^O	μc_i^{+L}	μc_i^{+C}	μc_i^{+U}	Términos Lingüísticos
260	350	R021	0.586	0.793	0.219	0.479	0.204	0.308	0.496	0.538	0.581	Mediano
		R032	0.000	0.090	0.012	0.341	0.246	0.373	0.134	0.177	0.220	Muy Pequeño
	400	R021	0.586	0.793	0.683	0.789	0.204	0.308	0.623	0.664	0.706	Medio Grande
		R032	0.000	0.090	0.471	0.647	0.246	0.373	0.233	0.287	0.342	Pequeño
	450	R021	0.586	0.793	0.968	0.979	0.204	0.308	0.700	0.740	0.780	Grande
		R032	0.000	0.090	0.815	0.877	0.246	0.373	0.314	0.362	0.411	Medio Pequeño
	500	R021	0.586	0.793	0.999	1.000	0.204	0.308	0.712	0.746	0.780	Grande
		R032	0.000	0.090	0.942	0.962	0.246	0.373	0.343	0.389	0.436	Medio Pequeño
	550	R021	0.586	0.793	0.791	0.860	0.204	0.308	0.648	0.693	0.739	Grande
		R032	0.000	0.090	0.738	0.819	0.246	0.373	0.297	0.343	0.388	Medio Pequeño
	600	R021	0.586	0.793	0.616	0.744	0.204	0.308	0.610	0.649	0.688	Medio Grande
		R032	0.000	0.090	0.553	0.702	0.246	0.373	0.258	0.307	0.356	Pequeño
280	350	R021	0.586	0.793	0.470	0.647	0.204	0.308	0.559	0.607	0.654	Medio Grande
		R032	0.000	0.090	0.406	0.604	0.246	0.373	0.211	0.267	0.323	Pequeño
	400	R021	0.677	0.838	0.219	0.479	0.204	0.308	0.519	0.561	0.603	Mediano
		R032	0.000	0.405	0.012	0.341	0.246	0.373	0.246	0.275	0.304	Pequeño
	450	R021	0.677	0.838	0.683	0.789	0.204	0.308	0.651	0.692	0.733	Grande
		R032	0.000	0.405	0.471	0.647	0.246	0.373	0.337	0.378	0.420	Medio Pequeño
	500	R021	0.677	0.838	0.968	0.979	0.204	0.308	0.734	0.773	0.812	Grande
		R032	0.000	0.405	0.815	0.877	0.246	0.373	0.413	0.452	0.490	Mediano
	550	R021	0.677	0.838	0.999	1.000	0.204	0.308	0.746	0.778	0.811	Grande
		R032	0.000	0.405	0.942	0.962	0.246	0.373	0.443	0.478	0.513	Mediano
	600	R021	0.677	0.838	0.791	0.860	0.204	0.308	0.677	0.722	0.767	Grande
		R032	0.000	0.405	0.728	0.819	0.246	0.373	0.397	0.433	0.469	Medio Pequeño
650	600	R021	0.677	0.838	0.616	0.744	0.204	0.308	0.636	0.675	0.715	Medio Grande
		R032	0.000	0.405	0.553	0.702	0.246	0.373	0.362	0.399	0.435	Medio Pequeño
650	650	R021	0.677	0.838	0.470	0.647	0.204	0.308	0.585	0.633	0.680	Medio Grande
		R032	0.000	0.405	0.406	0.604	0.246	0.373	0.315	0.358	0.402	Medio Pequeño

5.6.2 Caso 2 – Operación de F1342.

5.6.2.1 Modelo de TR.

En este caso se simulan fallas monofásicas a tierra en los puntos n_{10} - n_{14} de la Fig. 5.1, los cuales son protegidos por F1342. Las simulaciones se han realizado para dos valores de $\Delta P_{I\phi}$ ($\Delta P_{I\phi \min} = 83 \text{ kW}$, $\Delta P_{I\phi \max} = 93 \text{ kW}$) y siete valores de $I_{scI\phi}$ ($I_{scI\phi \min} = 350 \text{ A}$, $I_{scI\phi \max} = 650 \text{ A}$). Estos valores fueron seleccionados a partir de los datos mostrados en la Tabla 5.1 y Tabla 5.15 y utilizando los mismos criterios que en el caso 1. Este es el procedimiento de selección utilizado en todos los casos presentados en esta sección. Los resultados obtenidos por el modelo de TR se muestran en la Tabla 5.16, se observa que en todas las simulaciones la metodología selecciona como primer o segundo candidato para operación a F1342. Esto se debe a que los valores de $\Delta P_{I\phi}$ e $I_{scI\phi}$ de F1342 y F1355 son similares. La selección de dos dispositivos candidatos reduce el problema de inferir la CO del distribuidor a una dimensión más manejable, facilitando la toma de decisiones relacionadas con la gestión de interrupciones y la EE. Un punto importante es que en la selección de los d_i candidatos no se considera a R021 y R032 porque la combinación $\Delta P_{I\phi}$, $I_{scI\phi}$ los descarta automáticamente.

Tabla 5.15 Valores de $I_{scI\phi}$ (crisp) correspondientes a fallas ubicadas en los puntos n_{10} - n_{14} (F1342) y $Z_f = [0\Omega, 40\Omega]$.

n_k	$I_{scI\phi} \text{ (A)}$								
	$Z_f = 0\Omega$	$Z_f = 5\Omega$	$Z_f = 10\Omega$	$Z_f = 15\Omega$	$Z_f = 20\Omega$	$Z_f = 25\Omega$	$Z_f = 30\Omega$	$Z_f = 35\Omega$	$Z_f = 40\Omega$
n_{10}	1932.60	980.45	636.89	475.88	383.83	324.52	283.19	252.77	229.45
n_{11}	1479.90	860.53	589.94	451.61	369.13	314.69	276.15	247.48	225.33
n_{12}	1308.50	805.43	566.52	439.07	361.39	309.45	272.37	244.62	223.09
n_{13}	1155.80	745.93	538.80	423.54	351.56	302.69	267.45	240.88	220.15
n_{14}	918.80	642.40	486.64	393.02	331.75	288.85	257.26	233.06	213.97

Tabla 5.16 Índices y certezas de operación para el caso 2.

$\Delta P_{I\phi}$ (kW)	$I_{scI\phi}$ (A)	d_i	I_{iL}^P	I_{iU}^P	I_{iL}^I	I_{iU}^I	I_{iL}^O	I_{iU}^O	μ_{ci}^+L	μ_{ci}^+C	μ_{ci}^+U	Términos Lingüísticos
83	350	F1342	0.679	0.840	0.587	0.725	0.204	0.308	0.628	0.668	0.708	Medio Grande
		F1355	0.939	0.970	0.265	0.510	0.204	0.308	0.598	0.648	0.697	Medio Grande
	400	F1355	0.939	0.970	0.730	0.820	0.204	0.308	0.755	0.801	0.847	Grande
		F1342	0.679	0.840	0.958	0.972	0.204	0.308	0.731	0.772	0.813	Grande
	450	F1355	0.939	0.970	0.930	0.953	0.204	0.308	0.827	0.877	0.927	Muy Grande
		F1342	0.679	0.840	0.990	0.993	0.204	0.308	0.743	0.778	0.812	Grande
	500	F1355	0.939	0.970	0.656	0.771	0.204	0.308	0.733	0.777	0.821	Grande
		F1342	0.679	0.840	0.878	0.919	0.204	0.308	0.704	0.754	0.804	Grande
	550	F1355	0.939	0.970	0.436	0.624	0.204	0.308	0.651	0.705	0.758	Grande
		F1342	0.679	0.840	0.663	0.775	0.204	0.308	0.647	0.687	0.728	Medio Grande
	600	F1355	0.939	0.970	0.254	0.503	0.204	0.308	0.595	0.645	0.694	Medio Grande
		F1342	0.679	0.840	0.486	0.658	0.204	0.308	0.591	0.638	0.685	Medio Grande
	650	F1355	0.939	0.970	0.101	0.401	0.204	0.308	0.574	0.609	0.644	Medio Grande
		F1342	0.679	0.840	0.339	0.559	0.204	0.308	0.544	0.590	0.637	Medio Grande
93	350	F1342	0.757	0.878	0.587	0.725	0.204	0.308	0.648	0.691	0.735	Grande
		F1355	0.329	0.665	0.265	0.510	0.204	0.308	0.383	0.446	0.508	Mediano
	400	F1342	0.757	0.878	0.958	0.972	0.204	0.308	0.758	0.801	0.845	Grande
		F1355	0.329	0.665	0.730	0.820	0.204	0.308	0.508	0.568	0.628	Medio Grande
	450	F1342	0.757	0.878	0.990	0.993	0.204	0.308	0.770	0.807	0.845	Grande
		F1355	0.329	0.665	0.930	0.953	0.204	0.308	0.559	0.622	0.685	Medio Grande
	500	F1342	0.757	0.878	0.919	0.919	0.204	0.308	0.730	0.783	0.836	Grande
		F1355	0.329	0.665	0.656	0.771	0.204	0.308	0.495	0.552	0.610	Mediano
	550	F1342	0.757	0.878	0.663	0.775	0.204	0.308	0.668	0.711	0.755	Grande
		F1355	0.329	0.665	0.436	0.624	0.204	0.308	0.426	0.495	0.563	Mediano
	600	F1342	0.757	0.878	0.486	0.658	0.204	0.308	0.611	0.661	0.711	Medio Grande
		F1355	0.329	0.665	0.254	0.503	0.204	0.308	0.381	0.443	0.506	Mediano
	650	F1342	0.757	0.878	0.339	0.559	0.204	0.308	0.562	0.612	0.662	Medio Grande
		F1355	0.329	0.665	0.101	0.401	0.204	0.308	0.361	0.411	0.461	Medio Pequeño

Antes de continuar es importante analizar los intervalos de incertidumbre ($[\mu c_i^+{}_L, \mu c_i^+{}_U]$) de F1342 y F1355 y las condiciones de decisión (4.17)-(4.19), para obtener algunas conclusiones adicionales. En la Fig. 5.19 y Fig. 5.20 se muestran los intervalos de incertidumbre de F1342 y F1355 para los $\Delta P_{I\varphi}$ e $I_{scI\varphi}$ de la Tabla 5.16, estas gráficas pueden presentarse al operador de distribución mediante una interfaz gráfica de usuario (IGU).

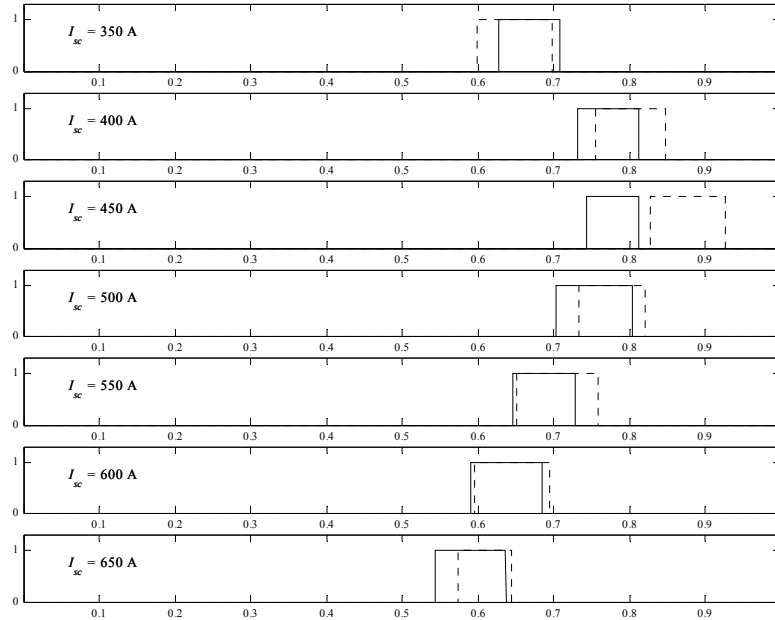


Fig. 5.19 Intervalos de incertidumbre de F1342 (línea sólida) y F1355 (línea punteada) para $\Delta P_{I\varphi} = 83$ kW.

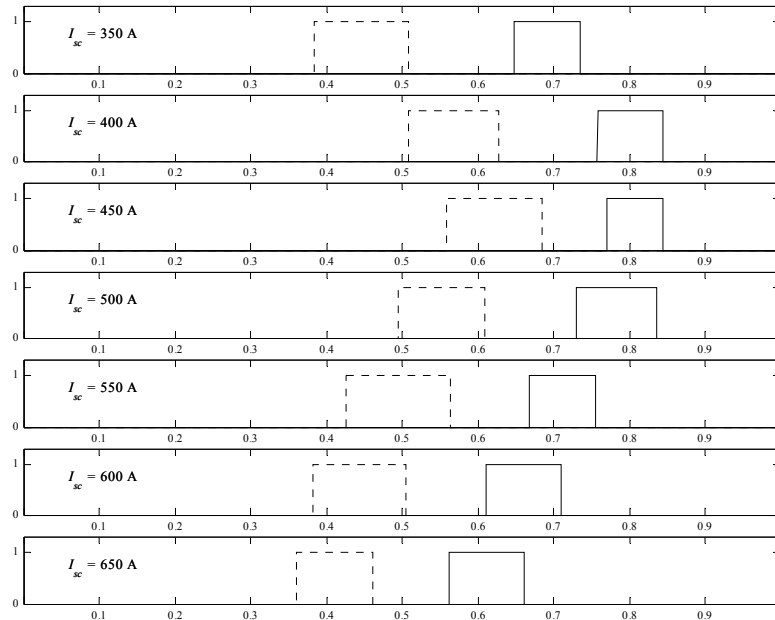


Fig. 5.20 Intervalos de incertidumbre de F1342 (línea sólida) y F1355 (línea punteada) para $\Delta P_{I\varphi} = 93$ kW.

En la Fig. 5.19 se observa que cuando $\Delta P_{I\varphi} = 83$ kW, F1342 y F1355 satisfacen todas las condiciones de decisión para todos los valores de $I_{scI\varphi}$. Los intervalos de incertidumbre de ambos dispositivos son muy similares y en la mayoría de los casos se traslapan. Por lo tanto utilizando solamente los resultados de TR no es posible identificar que d_i ha operado y es

necesario utilizar los datos de TRE para finalizar la inferencia de la CO. En la Fig. 5.20 se observa que cuando $\Delta P_{I\phi} = 93$ kW, F1342 también satisface todas las condiciones de decisión, en cambio F1355 no las satisface para ciertos valores de $I_{scI\phi}$:

- Para $I_{scI\phi} = 650$ A, F1355 no satisface ninguna condición decisión. Para $I_{scI\phi} = 350$ A, $I_{scI\phi} = 550$ A e $I_{scI\phi} = 600$ A, F1355 no satisface $\mu c_i^+{}_L > 0.5$ y $\mu c_i^+{}_C > 0.5$. Para estos valores se puede identificar directamente a F1342 como el dispositivo operado, utilizando solamente los resultados de TR.
- Para $I_{scI\phi} = 500$ A, F1355 no satisface $\mu c_i^+{}_L > 0.5$.

Solamente para $I_{scI\phi} = 400$ A e $I_{scI\phi} = 450$ A, F1355 satisface todas las condiciones de decisión, sin embargo para estos valores se observa que sus intervalos de incertidumbre están más cerca de 0.5 que los de F1342. El operador podría utilizar estos resultados de TR como ayuda adicional para tomar algunas decisiones operativas. Por ejemplo, podría concluir que la operación de F1355 es “más incierta” que la de F1342 y utilizar esta información para priorizar la inspección del distribuidor, mientras se reciben las llamadas telefónicas de los clientes. Cuando $I_{scI\phi} = 500$ A, el operador podría inclusive tomar una decisión más “arriesgada” y descartar a F1355 como dispositivo candidato, de esta forma podría identificar la CO del distribuidor utilizando solamente los datos de TR. Como se explicó anteriormente, este tipo de decisión flexible es una de las ventajas de los T2-FLS. Se observa que los términos lingüísticos calculados para todos los valores de $I_{scI\phi}$ concuerdan con las conclusiones obtenidas. Por ejemplo cuando $I_{scI\phi} = 500$ A, los términos lingüísticos calculados para la certeza de operación de F1342 y F1355 son “Grande” y “Mediano” respectivamente. Se observa que hay un término lingüístico de diferencia entre ambos dispositivos (“Medio Grande”), esto concuerda con los resultados numéricos y gráficos obtenidos. Los resultados lingüísticos facilitan la comprensión y transmisión rápida de la información y también sirven de referencia para la toma de decisiones operativas. Se observa que en el caso 2 las incertidumbres son mayores que en el caso 1. Como se explicó anteriormente, en el caso 2 se puede inferir la CO en TR para algunas combinaciones de $\Delta P_{I\phi}$ e $I_{scI\phi}$, sin embargo para el 50 por ciento de ellas ($\Delta P_{I\phi} = 83$ kW) es necesario utilizar los datos de TRE para finalizar la inferencia de la CO. Este resultado es el esperado porque a medida que los d_i involucrados están más lejos de la SE AT/MT, aumentan las incertidumbres en P_i , que es la variable más influyente del modelo de TR, estas incertidumbres se ven reflejadas en los valores de μc_i^+ . En la siguiente sección se analiza el desempeño del modelo de TRE para este caso.

5.6.2.2 Modelo de TRE.

En las Tablas 5.17-5.19 se muestran los resultados obtenidos por el modelo de TRE cuando $\Delta P_{I\phi} = 83$ kW e $I_{scI\phi} = 400$ A (Tabla 5.16). Para cada cálculo se asume que se han recibido llamadas telefónicas de las zonas indicadas en la Fig. 5.18 y que basándose en estas observaciones, el operador ha seleccionado los calificadores lingüísticos mostrados para indicar la certeza de presencia de cada manifestación. Aquí $\mathbf{D}_s$ es la s -ésima explicación y $P(\mathbf{D}_s)$ su plausibilidad. El estado operativo de cada d_i es representado por 1 (abierto) y 0 (cerrado), solamente se muestran los estados operativos de los d_i incluidos en las explicaciones, el estado operativo de los d_i restantes se asume cerrado.

- F1304: cierta.

Tabla 5.17 Explicaciones para llamadas telefónicas recibidas de la zona F1304.

d_i	Explicaciones			
	D_1	D_2	D_3	D_4
F1342	1	0	0	0
F1677	0	1	0	0
F1304	0	0	1	0
F1326	0	0	0	1
$P(D_s)$	0.772	0.351	0.321	0.244

- F1304: cierta, F1327: probable.

Tabla 5.18 Explicaciones para llamadas telefónicas recibidas de las zonas F1304 y F1327.

d_i	Explicaciones					
	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6
F1342	1	0	0	0	0	0
F1677	0	1	0	0	0	0
F1326	0	0	1	0	0	0
F1369	0	0	0	1	0	0
F1304	0	0	0	1	1	1
F1337	0	0	0	0	1	0
F1327	0	0	0	0	0	1
$P(D_s)$	0.825	0.420	0.300	0.211	0.194	0.174

- F1304: cierta, F1327: probable, F1379: casi cierta.

Tabla 5.19 Explicaciones para llamadas telefónicas recibidas de las zonas F1304, F1327 y F1379.

d_i	Explicaciones													
	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6	D_7	D_8	D_9	D_{10}	D_{11}	D_{12}	D_{13}	D_{14}
F1342	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F1326	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F1677	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F1369	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0
F1304	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
F1337	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0
F1327	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1
F1322	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0
F1368	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0
F1379	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	1
$P(D_s)$	0.919	0.420	0.346	0.339	0.322	0.231	0.227	0.220	0.216	0.215	0.207	0.204	0.203	0.191

En las Tablas 5.17-5.19 se observa que la metodología infiere dinámicamente la nueva CO utilizando los datos de TRE. Se observa que a medida que se reciben nuevas llamadas telefónicas, la plausibilidad de F1342 aumenta y los resultados se vuelven más concluyentes. Este es el comportamiento esperado porque a medida que aumenta el número de llamadas telefónicas recibidas de zonas ubicadas aguas abajo de F1342, existe mayor seguridad sobre su operación. Además, la certeza de operación de F1342 (μc_i^+) es “grande” y esta explicación contiene solamente un desorden, por lo tanto es una explicación simple, en el sentido sugerido por el principio de simplicidad. Es importante observar que en la Tablas 5.18 y 5.19 se muestran muchas explicaciones que contienen múltiples desórdenes, a pesar que solamente se ha registrado una falla, i.e., solamente se cuenta con un valor de $\Delta P_{I\phi}$ e $I_{scl\phi}$. Esto se ha hecho para obtener una perspectiva completa de todas las explicaciones e ilustrar como el criterio de plausibilidad penaliza las explicaciones complejas respecto a las simples. En este caso las explicaciones múltiples pueden ser descartadas porque solamente se ha detectado una falla. En la sección 5.6.3 se analiza el desempeño de la metodología de inferencia dinámica de la CO en presencia de fallas múltiples.

En los resultados de las Tablas 5.17-5.19 se utiliza el criterio de no-redundancia como criterio de simplicidad. En la Tabla 5.20 se muestran los resultados obtenidos por el modelo de TRE cuando se utiliza el criterio de no-redundancia modificado. Este criterio es menos exigente que el criterio original, por lo tanto la cantidad de explicaciones obtenidas es mayor. Sin embargo tiene la ventaja de considerar algunas explicaciones adicionales descartadas por el criterio original. Por ejemplo, D_3 no es considerado como explicación por el criterio de no-redundancia original porque no es cover de la manifestación F1327. En cambio sí es considerado por el criterio de no-redundancia modificado, sin embargo su plausibilidad es pequeña. Se observa que la solución final se mantiene, también en este caso la metodología logra identificar la CO del distribuidor.

- F1304: cierta, F1327: probable.

Tabla 5.20 Explicaciones para llamadas telefónicas recibidas de las zonas F1304 y F1327 (criterio modificado).

d_i	Explicaciones									
	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6	D_7	D_8	D_9	D_{10}
F1342	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F1677	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
F1304	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0
F1326	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
F1369	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0
F1337	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0
F1327	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
$P(D_s)$	0.825	0.420	0.321	0.30	0.211	0.194	0.174	0.100	0.067	0.028

Como se observa en la Tabla 5.15, cuando $\Delta P_{l\varphi} = 83$ kW e $I_{sc l\varphi} = 400$ A, el modelo de TR obtiene dos d_i candidatos, F1355 y F1342. Una situación en la que el criterio de no-redundancia modificado puede ser muy útil es por ejemplo cuando se reciben llamadas telefónicas de zonas ubicadas aguas abajo de F1355 y F1342. En este caso se sabe que solamente uno de los d_i candidatos ha operado porque únicamente se ha detectado un valor de $\Delta P_{l\varphi}$ e $I_{sc l\varphi}$. Por lo tanto alguna de las manifestaciones observadas debe ser resultado de una “falsa alarma” o de un problema en la red de BT. Esta incertidumbre es modelada convenientemente mediante la asignación de los calificadores lingüísticos adecuados para cada manifestación. Aquí vale la pena recordar que los calificadores lingüísticos son asignados por el operador basándose en toda la evidencia disponible, e.g., en la cantidad de llamadas telefónicas recibidas de la misma zona, en reportes de inspección de las cuadrillas, etc. En las Tablas 5.21 y 5.22 se muestran los resultados obtenidos por el modelo de TRE cuando se utiliza el criterio de no-redundancia modificado para analizar esta situación. En este caso se asume que el operador está poco seguro de la presencia de la manifestación F1377, entonces selecciona el calificador lingüístico “probable” para describir su certeza de presencia.

- F1304: cierta, F1377: probable.

Tabla 5.21 Explicaciones para llamadas telefónicas recibidas de las zonas F1304 y F1377 (criterio modificado).

d_i	Explicaciones											
	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6	D_7	D_8	D_9	D_{10}	D_{11}	D_{12}
F1342	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
F1355	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1
F2403	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F1303	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
F1377	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
F1677	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0
F1304	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0
F1326	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
$P(D_s)$	0.772	0.506	0.442	0.442	0.433	0.351	0.321	0.296	0.281	0.244	0.242	0.240

Tabla 5.22 Continuación de Tabla 5.21.

d_i	Explicaciones											
	D_{13}	D_{14}	D_{15}	D_{16}	D_{17}	D_{18}	D_{19}	D_{20}	D_{21}	D_{22}	D_{23}	D_{24}
F1342	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F1355	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F2403	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
F1303	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0
F1377	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1
F1677	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F1304	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0
F1326	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0
$P(D_s)$	0.232	0.231	0.223	0.217	0.216	0.207	0.179	0.178	0.169	0.113	0.111	0.094

Como se observa en las Tablas 5.21 y 5.22, el criterio de no-redundancia modificado logra identificar correctamente la CO. Los resultados confirman que el dispositivo F1342 ha operado y que las llamadas recibidas de la zona F1377 no son debidas a la operación de un dispositivo de protección de MT. En las Tablas 5.23 y 5.24 se muestran los resultados obtenidos cuando el operador escoge el calificador lingüístico “casi cierta”. Se observa que también en este caso, se logra identificar correctamente la CO, sin embargo, la plausibilidad de D_2 ha aumentado respecto a los resultados de la Tabla 5.21. Este es el comportamiento esperado porque el operador está más seguro de la presencia de la manifestación F1377, por lo tanto la plausibilidad del dispositivo F1355 debe aumentar.

- F1304: cierta, F1377: casi cierta.

Tabla 5.23 Explicaciones para llamadas telefónicas recibidas de las zonas F1304 y F1377 (criterio modificado).

d_i	Explicaciones											
	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6	D_7	D_8	D_9	D_{10}	D_{11}	D_{12}
F1342	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0
F1355	0	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0
F2403	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
F1303	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
F1377	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
F1677	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1
F1304	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0
F1326	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
$P(D_s)$	0.772	0.666	0.561	0.518	0.516	0.496	0.456	0.441	0.403	0.351	0.321	0.308

Tabla 5.24 Continuación de Tabla 5.23.

d_i	Explicaciones											
	D_{13}	D_{14}	D_{15}	D_{16}	D_{17}	D_{18}	D_{19}	D_{20}	D_{21}	D_{22}	D_{23}	D_{24}
F1342	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F1355	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F2403	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0
F1303	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0
F1377	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1
F1677	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
F1304	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
F1326	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0
$P(D_s)$	0.306	0.293	0.290	0.285	0.270	0.264	0.260	0.254	0.252	0.244	0.232	0.219

Si el operador selecciona el calificador lingüístico “cierta” para describir la certeza de presencia de la manifestación F1377, entonces el modelo asigna máxima plausibilidad a D_2 . Este resultado es el esperado porque en este caso el operador estaría seguro de la presencia de dos manifestaciones que no pueden ser causadas por la operación de solamente uno de los dos d_i candidatos. Sin embargo esta situación no puede presentarse porque se asume que el operador sabe que solamente un d_i ha operado, ya que solo se ha detectado un $\Delta P_{I\varphi}$ e $I_{scI\varphi}$. El criterio de no-redundancia modificado tiene la desventaja que el número de explicaciones calculadas es grande, por ello solamente se utiliza para situaciones de falla simple. En situaciones de fallas múltiples se utiliza el criterio de no-redundancia original.

5.6.3 Caso 3 – Operación de F1339 y F1368.

En el caso analizado en la sección anterior, primero se observa una variación de potencia activa (ΔP^I) y una corriente de falla (I_{sc}^I) y posteriormente se reciben las llamadas telefónicas correspondientes. En esta sección se analiza el caso en que primero ocurren ΔP^I e I_{sc}^I , luego se detectan ΔP^2 e I_{sc}^2 y posteriormente se reciben las llamadas telefónicas. Como se explicó en la sección 3.2.4 esta situación puede presentarse como resultado de una condición climática particularmente adversa, en la que el tiempo transcurrido entre una falla y otra puede ser muy corto. En este caso se simulan fallas monofásicas a tierra en las zonas protegidas por F1339 (n_{23} - n_{26}) y F1368 (n_{15} - n_{18}). No se reciben llamadas telefónicas en el intervalo de tiempo entre la primera y segunda falla. Los valores de $\Delta P_{I\phi}$ e $I_{scI\phi}$ fueron seleccionados a partir de los datos mostrados en las Tablas 5.1, 5.25 y 5.27. Los resultados obtenidos por el modelo de TR se muestran en las Tablas 5.26 y 5.28.

Tabla 5.25 Valores de $I_{scI\phi}$ (crisp) correspondientes a fallas ubicadas en los puntos n_{23} - n_{26} (F1339) y $Z_f = [0\Omega, 40\Omega]$.

n_k	$I_{scI\phi} (A)$								
	$Z_f = 0\Omega$	$Z_f = 5\Omega$	$Z_f = 10\Omega$	$Z_f = 15\Omega$	$Z_f = 20\Omega$	$Z_f = 25\Omega$	$Z_f = 30\Omega$	$Z_f = 35\Omega$	$Z_f = 40\Omega$
n_{23}	630.29	493.53	402.21	340.00	295.75	262.94	237.77	217.90	201.85
n_{24}	567.17	455.86	378.55	324.14	284.51	254.62	231.38	212.85	197.76
n_{25}	530.93	433.05	363.64	313.87	277.08	249.03	227.04	209.39	194.94
n_{26}	488.46	405.48	345.13	300.85	267.54	241.77	221.36	204.83	191.21

Tabla 5.26 Índices y certezas de operación para el caso 3 (F1339).

$\Delta P_{I\phi}$ (kW)	$I_{scI\phi}$ (A)	d_i	I_{iL}^P	I_{iU}^P	I_{iL}^I	I_{iU}^I	I_{iL}^O	I_{iU}^O	$\mu c_i^+ L$	$\mu c_i^+ C$	$\mu c_i^+ U$	Términos Lingüísticos
10	250	F1339	0.699	0.800	0.000	0.311	0.342	0.486	0.504	0.544	0.584	Mediano
		F1348	0.831	0.916	0.000	0.000	0.204	0.308	0.483	0.517	0.552	Mediano
		F1364	0.000	0.000	0.973	0.982	0.204	0.308	0.351	0.371	0.392	Medio Pequeño
		F1349	0.000	0.000	0.956	0.971	0.246	0.373	0.346	0.369	0.392	Medio Pequeño
	300	F1339	0.699	0.800	0.986	0.991	0.342	0.486	0.753	0.790	0.828	Grande
		F1348	0.831	0.916	0.000	0.150	0.204	0.308	0.496	0.539	0.583	Mediano
		F1331	0.332	0.666	0.289	0.526	0.204	0.308	0.389	0.452	0.516	Mediano
		F1304	0.312	0.541	0.370	0.580	0.246	0.373	0.379	0.441	0.503	Mediano
	350	F1339	0.699	0.800	0.883	0.922	0.342	0.486	0.717	0.770	0.823	Grande
		F1348	0.831	0.916	0.379	0.586	0.204	0.308	0.596	0.651	0.707	Medio Grande
		F1331	0.332	0.666	0.962	0.975	0.204	0.308	0.571	0.628	0.685	Medio Grande
		F1304	0.312	0.541	0.962	0.975	0.246	0.373	0.525	0.579	0.633	Medio Grande
	400	F1348	0.831	0.916	0.848	0.899	0.204	0.308	0.747	0.802	0.858	Grande
		F1339	0.699	0.800	0.394	0.596	0.342	0.486	0.574	0.630	0.687	Medio Grande
		F1331	0.332	0.666	0.578	0.719	0.204	0.308	0.477	0.535	0.594	Mediano
		F1304	0.312	0.541	0.721	0.814	0.246	0.373	0.471	0.527	0.582	Mediano
13	250	F1304	0.856	0.904	0.000	0.000	0.246	0.373	0.498	0.534	0.570	Mediano
		F1339	0.641	0.761	0.000	0.311	0.342	0.486	0.488	0.526	0.564	Mediano
		F1364	0.000	0.000	0.973	0.982	0.204	0.308	0.351	0.371	0.392	Medio Pequeño
		F1349	0.000	0.000	0.956	0.971	0.246	0.373	0.346	0.369	0.392	Medio Pequeño
	300	F1339	0.641	0.761	0.986	0.991	0.342	0.486	0.729	0.765	0.802	Grande
		F1304	0.856	0.904	0.370	0.580	0.246	0.373	0.608	0.665	0.721	Medio Grande
		F1331	0.369	0.685	0.289	0.526	0.204	0.308	0.407	0.470	0.532	Mediano
		F1320	0.000	0.000	0.972	0.982	0.246	0.373	0.351	0.371	0.392	Medio Pequeño
	350	F1304	0.856	0.904	0.962	0.975	0.246	0.373	0.805	0.853	0.901	Muy Grande
		F1339	0.641	0.761	0.883	0.922	0.342	0.486	0.693	0.745	0.797	Grande
		F1331	0.369	0.685	0.962	0.975	0.204	0.308	0.591	0.647	0.703	Medio Grande
		F1368	0.000	0.375	0.704	0.803	0.275	0.413	0.388	0.423	0.459	Medio Pequeño
	400	F1304	0.856	0.904	0.721	0.814	0.246	0.373	0.723	0.774	0.825	Grande
		F1339	0.641	0.761	0.394	0.596	0.342	0.486	0.555	0.610	0.664	Medio Grande
		F1331	0.369	0.685	0.578	0.719	0.204	0.308	0.495	0.553	0.610	Mediano
		F1368	0.000	0.375	0.948	0.965	0.275	0.413	0.439	0.474	0.508	Mediano

Tabla 5.27 Valores de $I_{sc1\varphi}$ (crisp) correspondientes a fallas ubicadas en los puntos n_{15} - n_{18} (F1368) y $Z_f = [0\Omega, 40\Omega]$.

n_k	$I_{sc1\varphi} (A)$								
	$Z_f = 0\Omega$	$Z_f = 5\Omega$	$Z_f = 10\Omega$	$Z_f = 15\Omega$	$Z_f = 20\Omega$	$Z_f = 25\Omega$	$Z_f = 30\Omega$	$Z_f = 35\Omega$	$Z_f = 40\Omega$
n_{15}	1806.60	947.51	624.16	469.33	379.88	321.88	281.31	251.36	228.36
n_{16}	1310.30	794.85	559.88	434.93	358.66	307.54	270.98	243.58	222.28
n_{17}	1044.40	692.58	511.25	407.28	340.99	295.33	262.06	236.78	216.93
n_{18}	847.41	604.01	464.96	379.55	322.70	282.42	252.49	229.40	211.08

Tabla 5.28 Índices y certezas de operación para el caso 3 (F1368).

$\Delta P_{1\varphi}$ (kW)	$I_{sc1\varphi}$ (A)	d_i	I_{iL}^P	I_{iU}^P	I_{iL}^I	I_{iU}^I	I_{iL}^O	I_{iU}^O	$\mu c_i^+ L$	$\mu c_i^+ C$	$\mu c_i^+ U$	Términos Lingüísticos
16	350	F1304	0.601	0.734	0.962	0.975	0.246	0.373	0.697	0.736	0.774	Grande
		F1368	0.615	0.807	0.704	0.803	0.275	0.413	0.649	0.688	0.726	Grande
		F1759	0.334	0.667	0.654	0.769	0.307	0.449	0.503	0.563	0.624	Medio Grande
	400	F1368	0.615	0.807	0.948	0.965	0.275	0.413	0.717	0.756	0.794	Grande
		F1304	0.601	0.734	0.721	0.814	0.246	0.373	0.632	0.672	0.712	Medio Grande
		F1759	0.334	0.667	0.914	0.943	0.307	0.449	0.562	0.630	0.699	Medio Grande
	450	F1368	0.615	0.807	0.966	0.977	0.275	0.413	0.723	0.759	0.794	Grande
		F1304	0.601	0.734	0.358	0.572	0.246	0.373	0.527	0.572	0.618	Medio Grande
		F1759	0.334	0.667	0.553	0.702	0.307	0.449	0.475	0.539	0.603	Mediano
	500	F1368	0.615	0.807	0.843	0.895	0.275	0.413	0.683	0.727	0.771	Grande
		F1304	0.601	0.734	0.070	0.380	0.246	0.373	0.480	0.510	0.540	Mediano
		F1759	0.334	0.667	0.267	0.511	0.307	0.449	0.395	0.461	0.527	Mediano
	550	F1368	0.615	0.807	0.627	0.751	0.275	0.413	0.633	0.669	0.706	Medio Grande
		F1304	0.601	0.734	0.000	0.222	0.246	0.373	0.454	0.487	0.519	Mediano
		F1759	0.334	0.667	0.034	0.356	0.307	0.449	0.364	0.417	0.471	Medio Pequeño
	600	F1368	0.615	0.807	0.450	0.633	0.275	0.413	0.575	0.620	0.665	Medio Grande
		F1304	0.601	0.734	0.000	0.090	0.246	0.373	0.426	0.463	0.500	Mediano
		F1759	0.334	0.667	0.000	0.226	0.307	0.449	0.341	0.399	0.456	Medio Pequeño
	650	F1368	0.615	0.807	0.302	0.534	0.275	0.413	0.531	0.574	0.618	Medio Grande
		F1304	0.601	0.734	0.000	0.000	0.246	0.373	0.426	0.453	0.480	Mediano
		F1759	0.334	0.667	0.000	0.114	0.307	0.449	0.313	0.377	0.442	Medio Pequeño
19	350	F1759	0.853	0.926	0.654	0.769	0.307	0.449	0.715	0.766	0.817	Grande
		F1368	0.520	0.760	0.704	0.803	0.275	0.413	0.598	0.649	0.700	Medio Grande
		F1304	0.057	0.371	0.962	0.975	0.246	0.373	0.448	0.481	0.514	Mediano
	400	F1759	0.853	0.926	0.914	0.943	0.307	0.449	0.797	0.854	0.911	Muy Grande
		F1368	0.520	0.760	0.948	0.965	0.275	0.413	0.660	0.713	0.765	Grande
		F1304	0.057	0.371	0.721	0.814	0.246	0.373	0.395	0.432	0.468	Medio Pequeño
	450	F1759	0.853	0.926	0.553	0.702	0.307	0.449	0.680	0.735	0.791	Grande
		F1368	0.520	0.760	0.966	0.977	0.275	0.413	0.666	0.715	0.764	Grande
		F1342	0.000	0.000	0.990	0.993	0.204	0.308	0.356	0.374	0.392	Medio Pequeño
	500	F1368	0.520	0.760	0.843	0.895	0.275	0.413	0.630	0.687	0.744	Medio Grande
		F1759	0.853	0.926	0.267	0.511	0.307	0.449	0.591	0.648	0.704	Medio Grande
		F883	0.000	0.000	0.985	0.990	0.381	0.522	0.359	0.384	0.410	Medio Pequeño
	550	F1368	0.520	0.760	0.627	0.751	0.275	0.413	0.582	0.631	0.680	Medio Grande
		F1759	0.853	0.926	0.034	0.356	0.307	0.449	0.557	0.601	0.645	Medio Grande
		F1312	0.000	0.000	0.872	0.915	0.204	0.308	0.326	0.355	0.383	Medio Pequeño
	600	F1368	0.853	0.926	0.000	0.226	0.307	0.449	0.537	0.583	0.630	Medio Grande
		F1759	0.520	0.760	0.450	0.633	0.275	0.413	0.525	0.582	0.640	Mediano
		F1312	0.000	0.000	0.698	0.799	0.204	0.308	0.291	0.317	0.342	Medio Pequeño
	650	F1759	0.853	0.926	0.000	0.114	0.307	0.449	0.512	0.564	0.615	Mediano
		F1368	0.520	0.760	0.302	0.534	0.275	0.413	0.484	0.540	0.596	Mediano
		F1312	0.000	0.000	0.553	0.702	0.204	0.308	0.257	0.287	0.317	Pequeño

Se observa que para la mayoría de los valores de $\Delta P_{1\varphi}$ e $I_{sc1\varphi}$ se obtienen dos d_i candidatos, con intervalos de incertidumbre similares. Por lo tanto es necesario utilizar los datos de TRE para finalizar la inferencia de la CO. Como ejemplo, en las Tablas 5.29-5.32 se muestran los resultados obtenidos cuando $\Delta P_{1\varphi}^I = 10$ kW, $I_{sc1\varphi}^I = 300$ A, $\Delta P_{1\varphi}^2 = 16$ kW, $I_{sc1\varphi}^2 = 350$ A. Se asume que se han recibido llamadas telefónicas de las zonas indicadas en la Fig. 5.18 y que el operador ha elegido los calificadores respectivos basándose en estos datos de TRE.

- F1320: casi cierta.

Tabla 5.29 Explicaciones para llamadas telefónicas recibidas de la zona F1320.

d_i	Explicaciones					
	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6
F1339	1	0	0	0	0	0
F1369	0	1	0	0	0	0
F1320	0	0	1	0	0	0
F1677	0	0	0	1	0	0
F1342	0	0	0	0	1	0
F1326	0	0	0	0	0	1
$P(D_s)$	0.553	0.286	0.260	0.226	0.207	0.101

- F1320: casi cierta, F1371: cierta.

Tabla 5.30 Explicaciones para llamadas telefónicas recibidas de las zonas F1320 y F1371.

d_i	Explicaciones									
	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6	D_7	D_8	D_9	D_{10}
F1368	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
F1339	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0
F1369	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0
F1320	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0
F1677	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0
F1371	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0
F1342	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
F1326	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
$P(D_s)$	0.620	0.487	0.474	0.457	0.453	0.442	0.319	0.306	0.290	0.230

- F1320: casi cierta, F1371: cierta, F1349: probable.

Tabla 5.31 Explicaciones para llamadas telefónicas recibidas de las zonas F1320, F1371 y F1349.

d_i	Explicaciones									
	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6	D_7	D_8	D_9	D_{10}
F1368	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0
F1339	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0
F1369	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0
F1320	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
F1677	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0
F1371	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1
F1342	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
F1349	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
F1326	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
$P(D_s)$	0.673	0.530	0.506	0.495	0.492	0.363	0.332	0.327	0.263	0.220

- F1320: casi cierta, F1371: cierta, F1349: probable, F1322: probable.

Tabla 5.32 Explicaciones para llamadas telefónicas recibidas de las zonas F1320, F1371, F1349 y F1322.

d_i	Explicaciones									
	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6	D_7	D_8	D_9	D_{10}
F1368	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0
F1339	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0
F1369	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0
F1342	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
F1677	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0
F1371	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1
F1322	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1
F1320	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
F1349	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
F1326	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0
$P(D_s)$	0.706	0.563	0.537	0.527	0.371	0.353	0.295	0.275	0.251	0.190

Se observa que la metodología infiere correctamente a $\mathbf{D}_1$ como solución del problema de la inferencia de la CO. La explicación $\mathbf{D}_2$ también tiene una plausibilidad importante porque los dispositivos F1339 y F1369 están ubicados en puntos muy cercanos y sus flujos de potencia y niveles de cortocircuito son similares. Los resultados son muy consistentes porque ninguno de los otros d_i candidatos calculados para $\Delta P_{I\varphi}^1, I_{sc}^1$ (F1348) y $\Delta P_{I\varphi}^2, I_{sc}^2$ (F1304 y F1759) es cover de las zonas de las cuales se han recibido las llamadas telefónicas (F1320, F1371, F1349 y F1322). En el siguiente caso se analiza el comportamiento del modelo de TRE cuando esta condición no se cumple.

5.6.4 Caso 4 – Operación de F2403 y F1369.

En este caso se simulan fallas monofásicas a tierra en las zonas protegidas por F1369 (n_{19} - n_{22}) y F2403 (n_6 - n_9). No se reciben llamadas telefónicas en el intervalo de tiempo entre la primera y segunda falla. Los valores de $\Delta P_{I\varphi}$ e $I_{scI\varphi}$ fueron seleccionados a partir de los datos mostrados en las Tablas 5.1, 5.33 y 5.35. Los resultados obtenidos por el modelo de TR se muestran en las Tablas 5.34 y 5.36. Se observa que para la mayoría de los $\Delta P_{I\varphi}$ e $I_{scI\varphi}$ seleccionados se obtienen dos d_i candidatos, con intervalos de incertidumbre similares. Por lo tanto también en este caso es necesario utilizar los datos de TRE para inferir la CO. Como ejemplo, en las Tablas 5.37-5.39 se muestran los resultados obtenidos cuando $\Delta P_{I\varphi}^1 = 30$ kW, $I_{sc}^1 = 350$ A, $\Delta P_{I\varphi}^2 = 57$ kW, $I_{sc}^2 = 450$ A. Aquí también se asume que se han recibido llamadas telefónicas de las zonas indicadas en la Fig. 5.18 y que el operador ha seleccionado los calificadores lingüísticos respectivos basándose en estos datos de TRE y en su criterio y experiencia.

Tabla 5.33 Valores de $I_{scI\varphi}$ (crisp) correspondientes a fallas ubicadas en los puntos n_{19} - n_{22} (F1369) y $Z_f = [0\Omega, 40\Omega]$.

n_k	$I_{scI\varphi} (A)$								
	$Z_f = 0\Omega$	$Z_f = 5\Omega$	$Z_f = 10\Omega$	$Z_f = 15\Omega$	$Z_f = 20\Omega$	$Z_f = 25\Omega$	$Z_f = 30\Omega$	$Z_f = 35\Omega$	$Z_f = 40\Omega$
n_{19}	808.01	589.73	458.43	375.93	320.41	280.82	251.28	228.45	210.30
n_{20}	710.61	537.92	428.60	357.06	307.53	271.53	244.28	223.00	205.94
n_{21}	676.34	518.81	417.20	349.67	302.42	267.79	241.45	220.78	204.15
n_{22}	630.72	493.76	402.34	340.08	295.80	262.99	237.81	217.93	201.87

Tabla 5.34 Índices y certezas de operación para el caso 4 (F1369).

$\Delta P_{I\varphi}$ (kW)	$I_{scI\varphi}$ (A)	d_i	I_{iL}^P	I_{iU}^P	I_{iL}^I	I_{iU}^I	I_{iL}^O	I_{iU}^O	$\mu c_i^+ L$	$\mu c_i^+ c$	$\mu c_i^+ U$	Términos Lingüísticos
30	300	F1369	0.721	0.814	0.443	0.629	0.204	0.308	0.580	0.631	0.682	Medio Grande
		F1339	0.000	0.000	0.986	0.991	0.342	0.486	0.355	0.379	0.404	Medio Pequeño
	350	F1369	0.721	0.814	0.996	0.998	0.204	0.308	0.750	0.786	0.822	Grande
		F1303	0.242	0.621	0.700	0.800	0.246	0.373	0.474	0.528	0.582	Mediano
	400	F1369	0.721	0.814	0.789	0.859	0.204	0.308	0.681	0.729	0.777	Grande
		F1303	0.242	0.621	0.974	0.983	0.246	0.373	0.540	0.589	0.638	Medio Grande
	450	F1369	0.721	0.814	0.428	0.618	0.204	0.308	0.575	0.626	0.677	Medio Grande
		F1303	0.242	0.621	0.682	0.788	0.246	0.373	0.470	0.524	0.577	Mediano
	500	F1369	0.721	0.814	0.142	0.428	0.204	0.308	0.512	0.550	0.588	Mediano
		F1303	0.242	0.621	0.401	0.601	0.246	0.373	0.388	0.452	0.516	Mediano
36	300	F1369	0.835	0.890	0.443	0.629	0.204	0.308	0.616	0.673	0.729	Medio Grande
		F1303	0.910	0.955	0.035	0.356	0.246	0.373	0.566	0.606	0.646	Medio Grande
	350	F1369	0.835	0.890	0.996	0.998	0.204	0.308	0.800	0.841	0.882	Muy Grande
		F1303	0.910	0.955	0.700	0.800	0.246	0.373	0.743	0.793	0.844	Grande
	400	F1303	0.910	0.955	0.974	0.983	0.246	0.373	0.841	0.887	0.934	Muy Grande
		F1369	0.835	0.890	0.789	0.859	0.204	0.308	0.725	0.779	0.833	Grande
	450	F1303	0.910	0.955	0.682	0.788	0.246	0.373	0.737	0.788	0.838	Grande
		F1369	0.835	0.890	0.428	0.618	0.204	0.308	0.611	0.668	0.725	Medio Grande
	500	F1303	0.910	0.955	0.401	0.601	0.246	0.373	0.638	0.698	0.757	Grande
		F1369	0.835	0.890	0.142	0.428	0.204	0.308	0.544	0.586	0.629	Medio Grande

Tabla 5.35 Valores de $I_{scI\phi}$ (crisp) correspondientes a fallas ubicadas en los puntos n_6 - n_9 (F2403) y $Z_f = [0\Omega, 40\Omega]$.

n_k	$I_{scI\phi} (A)$								
	$Z_f = 0\Omega$	$Z_f = 5\Omega$	$Z_f = 10\Omega$	$Z_f = 15\Omega$	$Z_f = 20\Omega$	$Z_f = 25\Omega$	$Z_f = 30\Omega$	$Z_f = 35\Omega$	$Z_f = 40\Omega$
n_6	1306.90	802.20	565.06	438.46	361.20	309.46	272.49	244.80	223.30
n_7	1208.30	767.90	549.84	430.17	356.03	305.95	269.96	242.89	221.81
n_8	1116.00	733.30	533.94	421.35	350.50	302.18	267.23	240.82	220.19
n_9	1099.00	726.63	530.81	419.60	349.39	301.42	266.68	240.41	219.87

Tabla 5.36 Índices y certezas de operación para el caso 4 (F2403).

$\Delta P_{I\phi}$ (kW)	$I_{scI\phi}$ (A)	d_i	I_{iL}^P	I_{iU}^P	I_{iL}^I	I_{iU}^I	I_{iL}^O	I_{iU}^O	$\mu c_i^+ L$	$\mu c_i^+ C$	$\mu c_i^+ U$	Términos Lingüísticos
57	350	F1677	0.801	0.900	0.734	0.823	0.204	0.308	0.700	0.749	0.797	Grande
		F2403	0.658	0.829	0.382	0.588	0.204	0.308	0.551	0.599	0.646	Medio Grande
	400	F1677	0.801	0.900	0.860	0.906	0.204	0.308	0.739	0.793	0.848	Grande
		F2403	0.658	0.829	0.850	0.900	0.204	0.308	0.689	0.736	0.784	Grande
	450	F2403	0.658	0.829	0.927	0.951	0.204	0.308	0.713	0.759	0.805	Grande
		F1677	0.801	0.900	0.501	0.667	0.204	0.308	0.627	0.679	0.731	Medio Grande
	500	F2403	0.658	0.829	0.654	0.769	0.204	0.308	0.639	0.679	0.718	Medio Grande
		F1677	0.801	0.900	0.217	0.478	0.204	0.308	0.547	0.593	0.640	Medio Grande
	550	F2403	0.658	0.829	0.433	0.622	0.204	0.308	0.569	0.616	0.664	Medio Grande
		F1677	0.801	0.900	0.000	0.324	0.204	0.308	0.518	0.555	0.591	Mediano
	600	F2403	0.658	0.829	0.252	0.501	0.204	0.308	0.519	0.563	0.607	Medio Grande
		F1677	0.801	0.900	0.000	0.195	0.204	0.308	0.498	0.538	0.578	Mediano
65	350	F2403	0.689	0.844	0.382	0.588	0.204	0.308	0.558	0.607	0.656	Medio Grande
		F1677	0.071	0.536	0.734	0.823	0.204	0.308	0.429	0.480	0.532	Mediano
	400	F2403	0.689	0.844	0.850	0.900	0.204	0.308	0.698	0.746	0.795	Grande
		F1677	0.071	0.536	0.860	0.906	0.204	0.308	0.454	0.511	0.568	Mediano
	450	F2403	0.689	0.844	0.927	0.951	0.204	0.308	0.723	0.770	0.817	Grande
		F1312	0.351	0.676	0.652	0.768	0.204	0.308	0.504	0.561	0.619	Mediano
	500	F2403	0.689	0.844	0.654	0.769	0.204	0.308	0.647	0.688	0.728	Grande
		F1312	0.351	0.676	0.918	0.946	0.204	0.308	0.566	0.632	0.697	Medio Grande
	550	F2403	0.689	0.844	0.433	0.622	0.204	0.308	0.576	0.625	0.674	Medio Grande
		F1312	0.351	0.676	0.872	0.915	0.204	0.308	0.552	0.619	0.686	Medio Grande
	600	F1312	0.351	0.676	0.698	0.799	0.204	0.308	0.513	0.571	0.630	Medio Grande
		F2403	0.689	0.844	0.252	0.501	0.204	0.308	0.526	0.570	0.615	Medio Grande

- F1759: casi cierta.

Tabla 5.37 Explicaciones para llamadas telefónicas recibidas de la zona F1759.

d_i	Explicaciones			
	D_1	D_2	D_3	D_4
F2403	1	0	0	0
F1303	0	1	0	0
F1355	0	0	1	0
F1759	0	0	0	1
$P(D_s)$	0.532	0.369	0.308	0.219

- F1759: casi cierta, F1337: cierta.

Tabla 5.38 Explicaciones para llamadas telefónicas recibidas de las zonas F1759 y F1337 (continua en Tabla 5.39).

d_i	Explicaciones									
	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6	D_7	D_8	D_9	D_{10}
F2403	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1
F1369	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0
F1677	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0
F1303	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0
F1355	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0
F1759	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0
F1342	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
F1337	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
$P(D_s)$	0.659	0.605	0.578	0.547	0.524	0.502	0.493	0.466	0.449	0.437

Tabla 5.39 Continuación de Tabla 5.38.

d_i	Explicaciones									
	D_{11}	D_{12}	D_{13}	D_{14}	D_{15}	D_{16}	D_{17}	D_{18}	D_{19}	D_{20}
F2403	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F1303	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0
F1355	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0
F1759	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
F1342	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0
F1337	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0
F1326	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1
$P(D_s)$	0.429	0.385	0.356	0.354	0.348	0.325	0.317	0.310	0.280	0.273

Al analizar los resultados de las Tablas 5.37-5.39 se observa que la metodología infiere correctamente a D_1 como solución del problema de la inferencia de la CO. Sin embargo, se observa que la plausibilidad de las explicaciones $D_2 - D_4$ también es significativa, esto se debe a que los dispositivos F1303 y F1677 también son covers de las zonas de las cuales se han recibido las llamadas telefónicas (F1759 y F1337)³². Además los dispositivos F1355 y F1677 están ubicados en puntos muy cercanos a los dispositivos F2403 y F1369, por lo tanto sus flujos de potencia y niveles de cortocircuito son similares. Estas características aumentan la plausibilidad de algunas de las explicaciones resultado de las combinaciones de los dispositivos F1369, F2403, F1303, F1677 y F1355.

Del análisis de las explicaciones $D_1 - D_4$ se puede concluir que en el peor de los casos la metodología logra identificar la región del distribuidor donde están ubicados los dispositivos de protección operados. Por ejemplo, si los resultados de TR y los reportes de interrupción son los mismos (zonas F1759 y F1337), pero los dispositivos operados son F1677 y F1303, entonces podría afirmarse que la metodología no infiere correctamente la CO porque no asigna la máxima plausibilidad a la explicación D_5 , sin embargo si identifica la región del distribuidor donde están ubicados los dispositivos de protección operados. Este resultado representa una valiosa ayuda para el operador del sistema, ya que le permite tomar las decisiones correctas y ordenar el desplazamiento de las cuadrillas de reparación a las zonas afectadas. De esta manera se reduce el tiempo de localización de fallas y restauración, lo cual contribuye a disminuir el impacto negativo de las interrupciones sobre la calidad de servicio del distribuidor.

5.6.5 Fallas de conductor abierto.

Una falla relativamente común en distribuidores de MT es la de conductor abierto, la cual generalmente ocurre en zonas donde la corriente de carga es alta y existen puntos de unión de conductores de igual o diferentes calibres (derivaciones). Este tipo de falla causa una variación de potencia activa pero no una corriente de falla, por lo tanto la ubicación de la zona afectada depende principalmente de I_i^P y en menor medida de I_i^Q , una situación similar también ocurre cuando un fusible opera incorrectamente como resultado del envejecimiento o del crecimiento imprevisto de la demanda. En esta sección se analiza el desempeño de la metodología ante fallas de conductor abierto, el procedimiento de cálculo es similar al presentado en las secciones anteriores. En el caso de las fallas de conductor abierto el objetivo no es identificar el d_i operado, ya que no es este el caso, sino identificar aproximadamente la zona donde se encuentra la falla.

³² Aquí es necesario recordar que F1303 es candidato para operación para $\Delta P_{I\varphi}^I, I_{sc}^I, I_{\varphi}$ (Tabla 5.34) y que F1677 es candidato para operación para $\Delta P_{I\varphi}^2, I_{sc}^2, I_{\varphi}$ (Tabla 5.36).

5.6.5.1 Caso 5 – Falla de conductor abierto en zona protegida por F1355.

A continuación se analiza una falla de conductor abierto en el punto n_5 de la Fig. 5.1, el cual es protegido por el dispositivo F1355. En la Tabla 5.40 se muestran los resultados obtenidos por el modelo de TR.

Tabla 5.40 Índices y certezas de operación para el caso 5 (F1355).

$\Delta P_{I\phi}$ (kW)	$I_{scI\phi}$ (A)	d_i	I_{iL}^P	I_{iU}^P	I_{iL}^I	I_{iU}^I	I_{iL}^O	I_{iU}^O	μc_i^+L	μc_i^+C	μc_i^+U	<i>Términos Lingüísticos</i>
75	0	F1355	0.573	0.787	0.000	0.000	0.204	0.308	0.415	0.447	0.480	Mediano
		F1382	0.503	0.751	0.000	0.000	0.204	0.308	0.380	0.423	0.466	Medio Pequeño
		F1342	0.228	0.614	0.000	0.000	0.204	0.308	0.261	0.304	0.346	Pequeño
		F1312	0.210	0.605	0.000	0.000	0.204	0.308	0.256	0.298	0.339	Pequeño

De los resultados de la Tabla 5.40 se observa que ningún d_i satisface las condiciones de decisión, esto se debe a que $I_{scI\phi} = 0$. Por lo tanto es recomendable esperar a recibir las llamadas telefónicas de los clientes afectados para confirmar que se ha producido una interrupción. Esta precaución es necesaria porque $\Delta P_{I\phi}$ puede ser resultado de la desconexión programada de una carga importante. Si el primer reporte de interrupción proviene de F1364 se obtienen los resultados de la Tabla 5.41.

- F1364: casi cierta.

Tabla 5.41 Explicaciones para llamadas telefónicas recibidas de las zonas F1364.

d_i	Explicaciones					
	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6
F1355	1	0	0	0	0	0
F2403	0	1	0	0	0	0
F1759	0	0	1	0	0	0
F1303	0	0	0	1	0	0
F1331	0	0	0	0	1	0
F1364	0	0	0	0	0	1
$P(D_s)$	0.313	0.157	0.075	0.066	0.060	0.060

Los resultados de la Tabla 5.41 muestran que la explicación D_1 es la de mayor plausibilidad, sin embargo todavía es bastante baja como para tomar una decisión confiable. A medida que se reciben llamadas telefónicas de otras zonas afectadas (F1333, F1331) y aumenta la certeza de presencia de la manifestación F1364 de “casi cierta” a “cierta”³³, se obtienen los resultados de las Tablas 5.42-5.44.

- F1364: casi cierta, F1333: probable.

Tabla 5.42 Explicaciones para llamadas telefónicas recibidas de las zonas F1364 y F1333.

d_i	Explicaciones										
	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6	D_7	D_8	D_9	D_{10}	D_{11}
F1355	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F2403	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
F1333	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	0
F1348	0	0	1	0	1	0	0	0	1	1	1
F1759	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
F1303	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0
F1331	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0
F1364	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
$P(D_s)$	0.405	0.094	0.091	0.054	0.050	0.049	0.046	0.046	0.046	0.043	0.043

³³ Como resultado de la recepción de nuevas llamadas telefónicas o de la inspección de la zona F1364.

- F1364: casi cierta, F1333: probable, F1331: casi cierta.

Tabla 5.43 Explicaciones para llamadas telefónicas recibidas de las zonas F1364, F1333 y F1331.

d_i	Explicaciones								
	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6	D_7	D_8	D_9
F1355	1	0	0	0	0	0	0	0	0
F2403	0	1	1	0	0	0	0	0	0
F1333	0	1	0	1	0	1	0	1	0
F1348	0	0	1	0	1	0	1	0	1
F1759	0	0	0	1	1	0	0	0	0
F1303	0	0	0	0	0	1	1	0	0
F1331	0	0	0	0	0	0	0	1	1
$P(D_s)$	0.591	0.161	0.158	0.089	0.085	0.080	0.076	0.074	0.071

- F1364: cierta, F1333: probable, F1331: casi cierta.

Tabla 5.44 Explicaciones para llamadas telefónicas recibidas de las zonas F1364, F1333 y F1331.

d_i	Explicaciones								
	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6	D_7	D_8	D_9
F1355	1	0	0	0	0	0	0	0	0
F2403	0	1	1	0	0	0	0	0	0
F1333	0	1	0	1	0	1	0	1	0
F1348	0	0	1	0	1	0	1	0	1
F1759	0	0	0	1	1	0	0	0	0
F1303	0	0	0	0	0	1	1	0	0
F1331	0	0	0	0	0	0	0	1	1
$P(D_s)$	0.671	0.189	0.186	0.104	0.100	0.093	0.089	0.086	0.083

Al analizar la Tabla 5.44 se observa que la plausibilidad de D_1 aumenta a medida que se reciben más llamadas telefónicas. Por lo tanto, de estos resultados se puede concluir que la metodología logra inferir correctamente la zona del distribuidor donde ha ocurrido la falla.

5.6.5.2 Caso 6 – Falla de conductor abierto en zona protegida por F1342.

A continuación se analiza una falla de conductor abierto en el punto n_{10} de la Fig. 5.1, el cual es protegido por el dispositivo F1342. En la Tabla 5.45 se muestran los resultados obtenidos por el modelo de TR.

Tabla 5.45 Índices y certezas de operación para el caso 6 (F1342).

$\Delta P_{l\phi}$ (kW)	$I_{sc l\phi}$ (A)	d_i	I_{iL}^P	I_{iU}^P	I_{iL}^I	I_{iU}^I	I_{iL}^O	I_{iU}^O	μc_i^{+L}	μc_i^{+C}	μc_i^{+U}	Términos Lingüísticos
80	0	F1355	0.878	0.939	0.000	0.000	0.204	0.308	0.497	0.534	0.571	Mediano
		F1342	0.510	0.755	0.000	0.000	0.204	0.308	0.383	0.425	0.468	Medio Pequeño
		F1382	0.000	0.401	0.000	0.000	0.204	0.308	0.186	0.213	0.239	Pequeño
		F1312	0.000	0.245	0.000	0.000	0.204	0.308	0.142	0.173	0.203	Muy Pequeño

De los resultados de la Tabla 5.45 se observa que la operación de F1355 es la alternativa de solución de mayor plausibilidad. Sin embargo como $I_{sc l\phi} = 0$, también en este caso es recomendable esperar a recibir los reportes de los usuarios para confirmar que se ha producido una interrupción. Si se reciben llamadas telefónicas de F1785, F1664 y F1361 se obtienen los resultados de las Tablas 5.46-5.48.

- F1785: casi cierta.

Tabla 5.46 Explicaciones para llamadas telefónicas recibidas de las zonas F1785.

d_i	Explicaciones				
	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5
F1342	1	0	0	0	0
F1785	0	1	0	0	0
F1326	0	0	1	0	0
F1677	0	0	0	1	0
F1367	0	0	0	0	1
$P(D_s)$	0.298	0.087	0.060	0.060	0.060

- F1785: casi cierta, F1664: casi cierta.

Tabla 5.47 Explicaciones para llamadas telefónicas recibidas de las zonas F1785 y F1664.

d_i	Explicaciones										
	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6	D_7	D_8	D_9	D_{10}	D_{11}
F1342	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F1677	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F1326	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
F1339	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0
F1785	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0
F1349	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0
F1369	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0
F1664	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
F1367	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
$P(D_s)$	0.507	0.116	0.116	0.084	0.076	0.073	0.073	0.070	0.063	0.060	0.060

- F1785: casi cierta, F1664: casi cierta, F1361: casi cierta.

Tabla 5.48 Explicaciones para llamadas telefónicas recibidas de las zonas F1785, F1664 y F1361.

d_i	Explicaciones										
	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6	D_7	D_8	D_9	D_{10}	D_{11}
F1342	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F1326	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F1361	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
F1677	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
F1339	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0
F1785	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0
F1349	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0
F1369	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0
F1664	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
F1367	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
$P(D_s)$	0.654	0.169	0.088	0.076	0.071	0.069	0.069	0.067	0.062	0.600	0.600

Al analizar la Tabla 5.48 se observa que la plausibilidad de D_1 aumenta a medida que se reciben nuevos reportes de interrupción, de estos resultados se puede concluir que la metodología logra inferir correctamente la zona del distribuidor donde ha ocurrido la falla. Estos resultados son similares a los obtenidos en la sección anterior, la identificación se realiza rápidamente debido a que n_5 y n_{10} están ubicados cerca de los dispositivos F1355 y F1342 respectivamente. Esta cercanía implica que los valores de $\Delta P_{I\varphi}$ causados por las fallas de conductor abierto en n_5 y n_{10} son muy similares a los que se detectarían como resultado de la operación de F1355 y F1342.

A continuación se analiza una falla de conductor abierto en el punto n_{12} de la Fig. 5.1, como n_{12} está ubicado después de una derivación importante, la diferencia entre $\Delta P_{I\varphi}$ y P_i es mayor en este caso que en el caso anterior. Como consecuencia el valor del I_i^P correspondiente a F1342 es mucho menor y se necesitan más reportes de interrupción para identificar la zona donde está ubicada la falla. El modelo de TR obtiene los resultados de la Tabla 5.49.

Tabla 5.49 Índices y certezas de operación para el caso 6 (F1342).

$\Delta P_{I\varphi}$ (kW)	$I_{scI\varphi}$ (A)	d_i	I_{iL}^P	I_{iU}^P	I_{iL}^I	I_{iU}^I	I_{iL}^O	I_{iU}^O	μc_i^+L	μc_i^+C	μc_i^+U	<i>Términos Lingüísticos</i>
70	0	F1312	0.929	0.965	0.000	0.000	0.204	0.308	0.513	0.547	0.581	Mediano
		F1382	0.797	0.899	0.000	0.000	0.204	0.308	0.474	0.507	0.539	Mediano
		F2403	0.280	0.640	0.000	0.000	0.204	0.308	0.279	0.322	0.366	Medio Pequeño
		F1355	0.268	0.634	0.000	0.000	0.204	0.308	0.274	0.318	0.361	Medio Pequeño
		F1342	0.000	0.473	0.000	0.000	0.204	0.308	0.201	0.236	0.271	Pequeño
		F1677	0.000	0.307	0.000	0.000	0.204	0.308	0.162	0.190	0.219	Pequeño

De los resultados de la Tabla 5.49 se observa que la operación de F1312 es la alternativa de solución de mayor plausibilidad, sin embargo como $I_{scI\varphi} = 0$, también en este caso es recomendable esperar a recibir los reportes de los usuarios para confirmar que se ha producido una interrupción. Un punto interesante es que la certeza de operación de F1342 ha disminuido respecto al valor mostrado en la Tabla 5.45, este es el comportamiento esperado porque I_i^P también ha disminuido. En las Tablas 5.50-5.53 se observa como aumenta la plausibilidad de F1342 a medida que se reciben nuevos reportes de interrupción.

- F1785: cierta.

Tabla 5.50 Explicaciones para llamadas telefónicas recibidas de la zona F1785.

d_i	Explicaciones				
	D₁	D₂	D₃	D₄	D₅
F1342	1	0	0	0	0
F1677	0	1	0	0	0
F1785	0	0	1	0	0
F1326	0	0	0	1	0
F1367	0	0	0	0	1
P (D_s)	0.236	0.190	0.124	0.086	0.086

- F1785: cierta, F1379: casi cierta.

Tabla 5.51 Explicaciones para llamadas telefónicas recibidas de la zona F1785 y F1379.

d_i	Explicaciones										
	D₁	D₂	D₃	D₄	D₅	D₆	D₇	D₈	D₉	D₁₀	D₁₁
F1342	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F1677	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0
F1322	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0
F1326	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
F1368	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0
F1379	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
F1785	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0
F1368	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
F1379	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
F1367	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
P (D_s)	0.362	0.142	0.140	0.130	0.125	0.109	0.097	0.092	0.090	0.078	0.073

- F1785: cierta, F1379: casi cierta, F1310: casi cierta.

Tabla 5.52 Explicaciones para llamadas telefónicas recibidas de la zona F1785, F1379 y F1310.

d_i	Explicaciones										
	D₁	D₂	D₃	D₄	D₅	D₆	D₇	D₈	D₉	D₁₀	D₁₁
F1342	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F1326	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F1310	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
F1677	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0
F1322	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
F1368	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0
F1785	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0
F1379	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1
F1367	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
P (D_s)	0.468	0.192	0.115	0.107	0.103	0.093	0.085	0.081	0.080	0.072	0.068

- F1785: cierta, F1379: casi cierta, F1310: casi cierta, F1340: cierta.

Tabla 5.53 Explicaciones para llamadas telefónicas recibidas de la zona F1785, F1379, F1310 y F1340.

d_i	Explicaciones										
	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6	D_7	D_8	D_9	D_{10}	D_{11}
F1342	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F1326	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F1310	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
F1677	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0
F1322	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
F1368	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0
F1379	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1
F1340	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
F1367	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0
F1785	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
$P(D_i)$	0.593	0.261	0.166	0.158	0.155	0.106	0.098	0.095	0.091	0.085	0.082

Al analizar la Tabla 5.53 se observa que en este caso también la plausibilidad de D_1 aumenta a medida que se reciben nuevos reportes de interrupción. Sin embargo, son necesarias más manifestaciones que en el caso anterior para que la plausibilidad de la solución sea suficientemente “grande” para inferir en que zona está ubicada la falla.

5.6.6 Resultados utilizando conjuntos fuzzy gaussianos tipo 2.

De acuerdo a la literatura, la selección del tipo de conjunto fuzzy a utilizar (triangular, gaussiano, etc.) depende de la naturaleza de la incertidumbre a modelar y del criterio del usuario [102]. En este trabajo se han utilizado conjuntos fuzzy triangulares porque la construcción de sus funciones de pertenencia es muy intuitiva y directa. Además, facilitan la comprensión del significado de las funciones de pertenencia fuzzy y la naturaleza lingüística de las incertidumbres modeladas³⁴. Como se explicó en la sección 4.1.1 también se pueden utilizar conjuntos fuzzy gaussianos tipo 2 de intervalo para calcular I^P , I^I , I^Q y μC^+ . Estos conjuntos pueden ser de media (m) incierta o de desviación estándar (σ) incierta. En esta sección se hace una comparación de los resultados obtenidos utilizando estos últimos, con los resultados obtenidos utilizando conjuntos fuzzy triangulares tipo 2 de intervalo. Como es de esperar los resultados obtenidos en ambos casos no son idénticos, sin embargo las diferencias no son significativas, debido a que las funciones de pertenencia de ambos tipos de conjuntos son muy similares, como se comprueba al comparar la Fig. 4.2 y la Fig. 5.21.

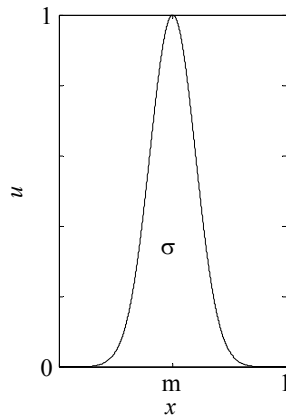


Fig. 5.21.1

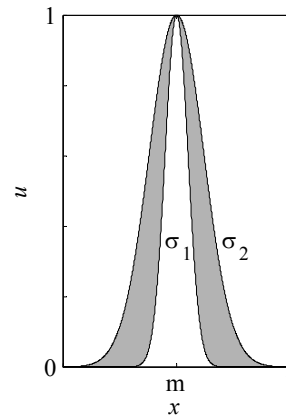


Fig. 5.21.2

Conjunto fuzzy gaussiano tipo 1 y conjunto fuzzy gaussiano tipo 2 de intervalo con σ incierta.

³⁴ En este sentido la función de pertenencia gaussiana podría ser interpretada de forma errónea, por ejemplo como una función de densidad de probabilidad normal.

En el anexo E (Tablas E.4-E.8) se presenta los parámetros de los conjuntos fuzzy gaussianos utilizados para modelar P_i , Z_f y los términos lingüísticos de las variables de entrada y base de reglas de los T2-FLS. En la Tabla 5.54 se muestran los resultados obtenidos por el modelo de TR basado en conjuntos fuzzy gaussianos, estos resultados corresponden al caso 2, el cual fue analizado en la sección 5.6.2 utilizando el modelo de TR basado en conjuntos fuzzy triangulares.

Tabla 5.54 Índices y certezas de operación para el caso 2 (F1342) cuando se utilizan funciones de pertenencia gaussianas.

$\Delta P_{I\phi}$ (kW)	$I_{scI\phi}$ (A)	d_i	I_{iL}^P	I_{iU}^P	I_{iL}^I	I_{iU}^I	I_{iL}^O	I_{iU}^O	μc_{iL}^+	μc_{iC}^+	μc_{iU}^+	Términos Lingüísticos
83	350	F1342	0.725	0.923	0.546	0.804	0.208	0.314	0.637	0.690	0.744	Grande
		F1355	0.988	0.997	0.147	0.501	0.208	0.314	0.589	0.634	0.679	Medio Grande
	400	F1355	0.988	0.997	0.772	0.911	0.208	0.314	0.777	0.827	0.877	Muy Grande
		F1342	0.725	0.923	0.994	0.998	0.208	0.314	0.745	0.795	0.846	Grande
	450	F1355	0.988	0.997	0.983	0.994	0.208	0.314	0.840	0.882	0.924	Muy Grande
		F1342	0.725	0.923	0.999	1.000	0.208	0.314	0.746	0.796	0.846	Grande
	500	F1355	0.988	0.997	0.657	0.860	0.208	0.314	0.741	0.790	0.838	Grande
		F1342	0.725	0.923	0.949	0.981	0.208	0.314	0.737	0.790	0.842	Grande
	550	F1342	0.725	0.923	0.668	0.865	0.208	0.314	0.664	0.718	0.772	Grande
		F1355	0.988	0.997	0.323	0.666	0.208	0.314	0.632	0.697	0.762	Grande
	600	F1342	0.725	0.923	0.391	0.713	0.208	0.314	0.594	0.657	0.721	Medio Grande
		F1355	0.988	0.997	0.139	0.491	0.208	0.314	0.588	0.632	0.677	Medio Grande
	650	F1355	0.988	0.997	0.057	0.356	0.208	0.314	0.570	0.611	0.652	Medio Grande
		F1342	0.725	0.923	0.211	0.571	0.208	0.314	0.534	0.589	0.644	Medio Grande
93	350	F1342	0.831	0.955	0.546	0.804	0.208	0.314	0.668	0.724	0.780	Grande
		F1355	0.245	0.704	0.147	0.501	0.208	0.314	0.335	0.411	0.487	Medio Pequeño
	400	F1342	0.831	0.955	0.994	0.998	0.208	0.314	0.786	0.837	0.888	Muy Grande
		F1355	0.245	0.704	0.772	0.911	0.208	0.314	0.483	0.565	0.647	Medio Grande
	450	F1342	0.831	0.955	0.999	1.000	0.208	0.314	0.787	0.838	0.888	Muy Grande
		F1355	0.245	0.704	0.983	0.994	0.208	0.314	0.524	0.602	0.681	Medio Grande
	500	F1342	0.831	0.955	0.949	0.981	0.208	0.314	0.778	0.831	0.884	Muy Grande
		F1355	0.245	0.704	0.657	0.860	0.208	0.314	0.459	0.539	0.619	Mediano
	550	F1342	0.831	0.955	0.668	0.865	0.208	0.314	0.699	0.755	0.811	Grande
		F1355	0.245	0.704	0.323	0.666	0.208	0.314	0.365	0.465	0.565	Mediano
	600	F1342	0.831	0.955	0.391	0.713	0.208	0.314	0.623	0.689	0.755	Grande
		F1355	0.245	0.704	0.139	0.491	0.208	0.314	0.334	0.409	0.484	Medio Pequeño
	650	F1342	0.831	0.955	0.211	0.571	0.208	0.314	0.562	0.620	0.677	Medio Grande
		F1355	0.245	0.704	0.057	0.356	0.208	0.314	0.315	0.389	0.462	Medio Pequeño

Al comparar los resultados de las Tablas 5.16 y 5.54 se observa que las diferencias numéricas son pequeñas. Las diferencias más notables se observan en algunos términos lingüísticos (e.g., para $\Delta P_{I\phi} = 83$ kW e $I_{scI\phi} = 350$ A), sin embargo para la mayoría de valores de $I_{scI\phi}$ los términos lingüísticos son iguales. En la Fig. 5.22 y Fig. 5.23 se presentan las gráficas de los intervalos de incertidumbre calculados utilizando ambos modelos para $\Delta P_{I\phi} = 83$ kW. Se observa que el modelo basado en conjuntos fuzzy gaussianos obtiene certezas de operación ligeramente mayores que las calculadas por el modelo basado en conjuntos fuzzy triangulares. Esto se debe a que la función de pertenencia gaussiana decrece de forma más lenta respecto m, que la función de pertenencia triangular respecto a B. Por lo tanto, para valores cercanos a $m = B$, las FPS (I_i^P , I_i^I) de los conjuntos fuzzy gaussianos serán mayores que las de los conjuntos fuzzy triangulares, este incremento influye directamente sobre el valor de la certeza de operación, esto también puede verificarse comparando las Tablas 5.16 y 5.54. Este efecto, en cambio no se observa en los valores de I_i^O , los cuales son prácticamente iguales para ambos modelos, esto se debe a que su valor depende fundamentalmente de los términos lingüísticos utilizados por el T2-FLS, no de la FPS.

En las Tablas E.9-E.15 se muestran los resultados obtenidos cuando se utiliza el modelo de TR basado en conjuntos fuzzy gaussianos, para analizar los demás casos estudiados en este capítulo y en las Fig. E.2-E.5 se muestran las hipersuperficies correspondientes. Estas gráficas son equivalentes a las mostradas en la Fig. 5.6, Fig. 5.9, Fig. 5.13 y Fig.5.16 para el modelo basado en conjuntos fuzzy triangulares.

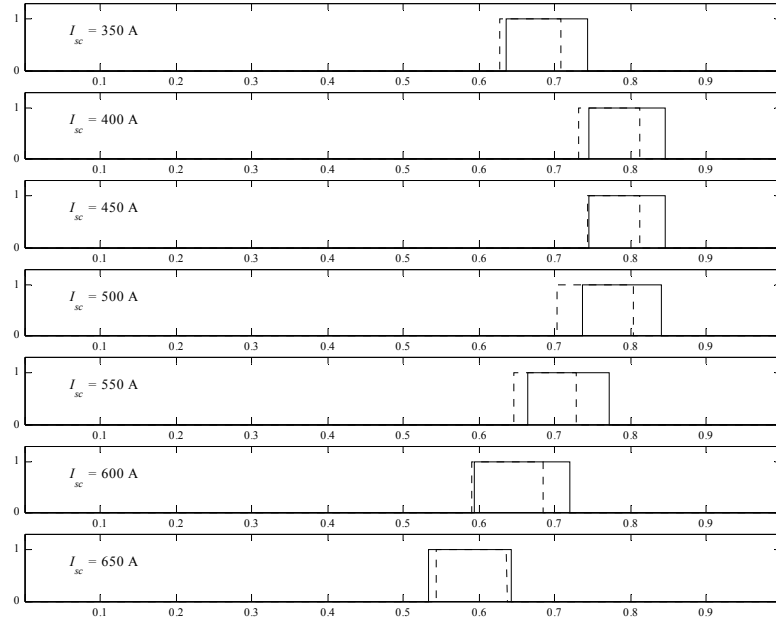


Fig. 5.22 Intervalos de incertidumbre de F1342 para $\Delta P_{I\phi} = 83$ kW (Tablas 5.16 y 5.54), calculados utilizando los modelos de TR basados en conjuntos fuzzy triangulares (línea punteada) y gaussianos (línea sólida).

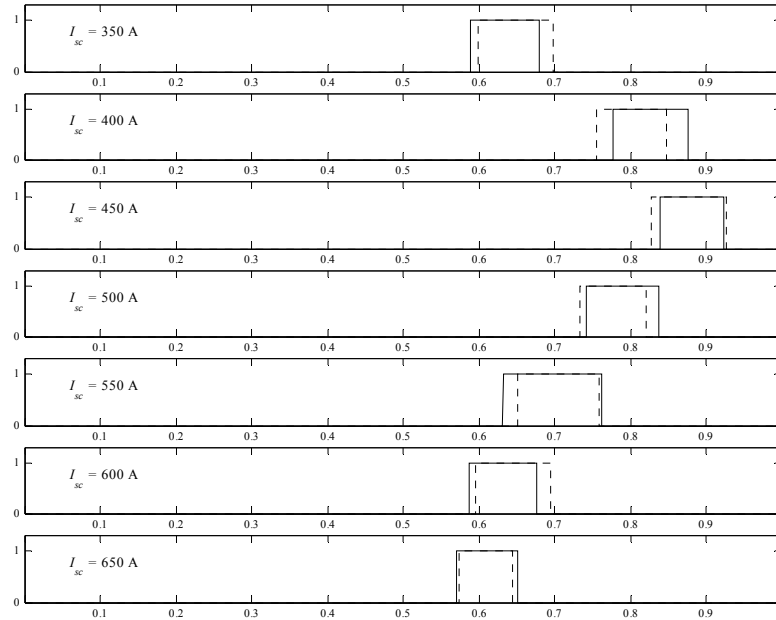


Fig. 5.23 Intervalos de incertidumbre de F1355 para $\Delta P_{I\phi} = 83$ kW (Tablas 5.16 y 5.54), calculados utilizando los modelos de TR basados en conjuntos fuzzy triangulares (línea punteada) y gaussianos (línea sólida).

5.7 Tiempos de ejecución del programa de cálculo.

A continuación se presentan los tiempos de ejecución del programa desarrollado en este trabajo. Los cálculos han sido realizados en un ordenador con procesador AMD Athlon™ de 2.0 GHz. Como se explicó en la sección 4.3.2 el programa de cálculo consta de dos partes (CO_{TR} y CO_{TRE}), las cuales consisten de cuatro y un módulo respectivamente. *El tiempo de cálculo de CO_{TR} solamente depende del número total de dispositivos de protección del distribuidor analizado, por lo tanto se mantiene constante para todos los casos estudiados en la sección 5.6.* Para evaluar el desempeño de CO_{TR} se utiliza el caso presentado en la Tabla 5.49, los tiempos de ejecución y porcentajes del tiempo total correspondientes a cada módulo se muestran en la Tabla 5.55. Se observa que aproximadamente el 65 por ciento del tiempo total de cómputo es consumido por los T2-FLS utilizados para calcular I^Q y μC^+ . Sin embargo el desempeño del algoritmo es aceptable para una aplicación en TR, sobre todo si se toma en cuenta que los distribuidores de MT reales generalmente tienen menos dispositivos de protección que los del distribuidor de la Fig. 5.1.

Tabla 5.55 Tiempos de cálculo y porcentajes del tiempo total de cada módulo de CO_{TR} .

Módulo	1	2	3	4	CO_{TR}
Descripción	Cálculo de I^P	Cálculo de I^I	Cálculo de I^Q	Cálculo de μC^+	
Tiempo de cálculo (s)	0.851	1.642	2.564	2.404	7.461
Porcentaje del total (%)	11.4	22	34.4	32.2	100

El tiempo de cálculo de CO_{TRE} además de depender del número de dispositivos de protección, también depende del número de manifestaciones observadas y de la ubicación de las mismas. Como se explica en la sección 4.2.1, el espacio de búsqueda de la solución crece con w , donde w es el número de dispositivos de protección ubicados aguas arriba de la zona de la cual se han recibido llamadas telefónicas. Por lo tanto, es predecible que el tiempo de cálculo sea mayor cuando varias llamadas telefónicas provienen de zonas alejadas de la SE AT/MT que cuando proceden de zonas cercanas. Para evaluar el desempeño de CO_{TRE} se utilizan los casos presentados en las Tablas 5.17-5.22, 5.29-5.32, 5.37-5.39, 5.41-5.43, 5.46-5.48 y 5.50-5.53. Los tiempos necesarios para calcular estos casos se muestran en la Tabla 5.56. Se observa que el tiempo de cálculo es mayor para los casos en que varias llamadas telefónicas provienen de zonas alejadas de la SE AT/MT (e.g., Tablas 5.19, 5.32 y 5.48). Sin embargo, se puede concluir que aún en estos casos el algoritmo CO_{TRE} es muy eficiente y satisface los requerimientos de velocidad de cálculo necesarios para una aplicación en línea.

Tabla 5.56 Tiempos de cálculo de CO_{TRE} .

Tabla	Tiempo de cálculo (s)	Tabla	Tiempo de cálculo (s)	Tabla	Tiempo de cálculo (s)
5.17	0.04	5.31	0.28	5.46	0.05
5.18	0.08	5.32	0.53	5.47	0.26
5.19	0.54	5.37	0.04	5.48	0.52
5.20	0.12	5.38-39	0.26	5.50	0.05
5.21-22	0.17	5.41	0.06	5.51	0.15
5.29	0.06	5.42	0.14	5.52	0.25
5.30	0.14	5.43	0.13	5.53	0.53

Se observa que los tiempos de cálculo son satisfactorios para la implementación práctica de la metodología en el ambiente de los DMS / OMS modernos. Su desempeño dependería en buena medida del nivel de integración de los sistemas de información de la distribuidora y de la eficiencia de sus sistemas de comunicación. Sin embargo, estas restricciones ya han sido superadas satisfactoriamente por la mayoría de distribuidoras modernas.

CAPÍTULO 6

6 Conclusiones.

El objetivo principal de este trabajo es el desarrollo de una metodología de inferencia de la CO de redes de distribución de MT que son operadas de forma radial, mediante la integración de los datos suministrados por los sistemas de información de las distribuidoras y el conocimiento experto de los operadores del SDEE. Para lograr este objetivo se ha diseñado una metodología con una arquitectura modular, que utiliza un grupo de conceptos originales y herramientas matemáticas novedosas para la inferencia de la CO en forma dinámica. Como resultado de la investigación se han logrado aportes interesantes al estado del arte respecto a la gestión de las interrupciones y la EE de SDEE con bajo nivel de supervisión y control en TR. Los resultados obtenidos son muy satisfactorios y demuestran la potencialidad de la metodología desarrollada. Los algoritmos y herramientas utilizadas logran una integración y modelación eficiente de los datos cuantitativos y cualitativos de TR y TRE y el conocimiento experto disponibles en los SDEE. En este sentido, este trabajo es también una contribución para facilitar la utilización sistemática de estas fuentes de información en futuras aplicaciones. A fin de brindar una perspectiva general de esta investigación, inicialmente se presenta un breve resumen del trabajo, luego se explican las conclusiones particulares sobre los puntos más importantes, se presentan los principales aportes y finalmente los futuros desarrollos identificados durante la investigación.

6.1 Resumen del trabajo.

Como resultado de la liberalización de los mercados eléctricos, las distribuidoras se enfrentan a un ambiente altamente exigente, en el que uno de sus principales objetivos es el cumplimiento de las regulaciones de CSE, específicamente las relacionadas con la frecuencia y duración de las interrupciones. Este interés está motivado por la necesidad de reducir las pérdidas económicas asociadas a la violación de los niveles de calidad permitidos y por la importancia de la satisfacción del cliente en las actuales estructuras de mercado. Para cumplir con estas crecientes exigencias, las distribuidoras están moviéndose hacia la implementación e integración de sistemas de información que permitan mejorar la eficiencia de todos sus procesos (AM/FM GIS, CIS, SCADA, DMS, OMS). En el caso específico de los procesos operativos, la infraestructura asociada a los sistemas de información permite la ejecución de estrategias más eficientes de operación y control del SDEE, lo cual ha impulsado un progresivo interés en la gestión de interrupciones (localización de fallas y restauración) y la EE del SDEE. El punto de partida para la implementación de estas funciones de los modernos DMS / OMS es la inferencia de la CO de la red de MT.

A pesar que los niveles de supervisión y control de los SDEE actuales son mejores que los existentes hace 20 años, todavía no es económicamente factible su monitoreo de forma masiva, al menos en el caso Latinoamericano. Esta restricción, aunada con la extensión, complejidad, susceptibilidad y naturaleza dinámica de los SDEE, dificulta la solución del problema de la inferencia de la CO. Tradicionalmente, la inferencia de la CO se ha realizado utilizando exclusivamente datos de TR (e.g., datos suministrados por el SCADA) o datos de TRE (e.g., llamadas telefónicas de los clientes). El primer método tiene como desventaja los escasos datos disponibles, debido a la todavía incipiente penetración del SCADA, lo cual se traduce en incertidumbres importantes (e.g., las asociadas con los valores de las demandas nodales). El segundo método tiene como principales inconvenientes la lentitud del proceso y las incertidumbres presentes en los datos, lo cual aumenta el tiempo de inferencia a niveles

incompatibles con las regulaciones de CSE vigentes. El método más adecuado para la solución del problema de la inferencia de la CO es la integración de los datos suministrados por todas las fuentes de información disponibles. Este punto también es reconocido por la literatura, sin embargo las propuestas presentadas bajo este esquema, asumen niveles de supervisión aún no disponibles en la mayoría de los SDEE o no consideran las incertidumbres presentes en los datos utilizados. *En este trabajo se ha desarrollado una metodología de inferencia dinámica de la CO que supera estas limitaciones mediante el procesamiento e integración de los datos suministrados por los sistemas de información de la distribuidora y la incorporación sistemática del conocimiento experto en el proceso de inferencia.* El conocimiento experto juega un papel fundamental en numerosos problemas de ingeniería y en el caso específico de los SDEE, su importancia es demostrada diariamente en la solución exitosa de problemas operativos complejos.

La metodología consta de dos partes, a las que se ha denominado inferencia en TR y TRE, respectivamente. En la primera parte se obtiene una solución inicial mediante la integración de todos los datos cuantitativos y cualitativos disponibles en TR y el conocimiento experto de los operadores del SDEE. Esto se logra gracias a la utilización de los Sistemas de Lógica Fuzzy Tipo 2 (T2-FLS), cuya flexibilidad y robustez facilita la modelación de las incertidumbres presentes en los datos y las propias del conocimiento experto, transmitido en forma de reglas y expresiones lingüísticas. Las incertidumbres presentes en los datos de TR han sido consideradas de forma eficiente y sencilla gracias a la utilización de la teoría de números fuzzy tipo 2 y a la introducción del concepto de CFF. Se logra reducir el número de alternativas de solución significativamente, permitiendo la toma de decisiones operativas confiables. La segunda parte consiste en la utilización de los datos de TRE (llamadas telefónicas de los clientes) para mejorar progresivamente la solución inicial, a medida que se dispone de más datos. Para ello se utiliza una metodología basada en un modelo relacional fuzzy de diagnóstico e inferencia abductiva fuzzy, con la cual es posible vincular las etapas de TR y TRE, considerar las incertidumbres presentes en los datos de TRE y extender la misma para la inferencia de la CO en presencia de fallas múltiples.

Los resultados obtenidos por la metodología desarrollada en este trabajo son muy satisfactorios, demostrándose que es posible obtener muy buenas soluciones utilizando datos inciertos y conocimiento experto. En este sentido es factible afirmar que dentro de las limitaciones de los modelos basados en técnicas de inteligencia artificial, se logra simular la intuición y capacidad de razonamiento en condiciones inciertas, propias de los expertos.

6.2 Conclusiones particulares.

6.2.1 Gestión de Interrupciones.

Con relación a la gestión de interrupciones, en este trabajo se ha desarrollado una metodología flexible y de arquitectura modular, capaz de integrar todos los datos cuantitativos y cualitativos disponibles en cada instante (TR y TRE), obtener soluciones de forma continua en el tiempo y mejorar la certeza de los resultados dinámicamente. De esta forma se puede calcular una solución inicial de TR, que puede ser utilizada para tomar algunas decisiones operativas que no requieren de gran precisión. Luego esta solución puede ser mejorada progresivamente, a medida que se reciben los datos de TRE. Esto representa un aporte importante respecto a las propuestas existentes en la literatura, en las que

generalmente se enfrenta el problema de la gestión de interrupciones desde la perspectiva de TR o TRE exclusivamente, desaprovechando la oportunidad de mejorar los resultados dinámicamente y la sinergia de ambos tipos de datos. Con relación a la solución de TR, no se pretende obtener la certeza de operación exacta de los dispositivos de protección, sino obtener buenas aproximaciones, que faciliten la toma de decisiones. La metodología no propone soluciones únicas, que en un sistema real podrían parecer idealizadas³⁵ y que podrían provocar la toma de decisiones operativas erróneas. Por el contrario se utiliza una modelación en la que en cada etapa se consideran todas las alternativas factibles, ordenadas de acuerdo a su certeza. Esta es en realidad la forma en que se toman las decisiones en la operación diaria de los SDEE, se evalúan las alternativas y se escoge la mejor. En este sentido, la intención es que el operador esté informado de todas las alternativas factibles, a fin de tomar la mejor decisión.

6.2.2 Utilización del conocimiento experto.

Con relación a la utilización del conocimiento experto, la modelación propuesta en este trabajo, la cual está basada en los conceptos de computación con palabras y computación perceptiva es un aporte novedoso y significativo, porque facilita la utilización del conocimiento cualitativo, inherentemente impreciso, cuyo potencial generalmente es desaprovechado en muchas aplicaciones. Esto es importante porque en muchas ocasiones una palabra o expresión lingüística puede ser más útil que un número exacto, ya que transmite el verdadero significado de la información y un número exacto la simplifica (e.g., al describir el clima). Además, las expresiones lingüísticas son muy utilizadas diariamente y en muchas ocasiones son los únicos datos disponibles. Por lo tanto, contar con un método que explote su potencial y que modele sus incertidumbres, representa un aporte muy valioso, particularmente para el área de los SDEE.

El objetivo de la utilización de los T2-FLS es facilitar la integración de todos los datos disponibles (cuantitativos y cualitativos) y la modelación de sus incertidumbres, a fin de obtener buenas soluciones que faciliten la labor del operador. La base de reglas de los T2-FLS representa el conocimiento de los expertos de forma novedosa, sistemática y efectiva, como lo demuestra el T2-FLS explicado en la sección 4.1.3, el cual modela la influencia conjunta del clima, la historia de operación de la red y el mantenimiento, sobre la inferencia de la CO. Los T2-FLS permiten modelar el consenso de los expertos, en este sentido es aceptable afirmar que a través de los T2-FLS se obtiene una evaluación del estado operativo de la red de MT, la cual es resultado del consenso de un grupo de especialistas. Mientras más expertos se entrevisten para construir la base de reglas, mejor serán la modelación de la situación real y la evaluación. Este es un aporte importante porque es bien conocido que el conocimiento experto, transmitido frecuentemente mediante reglas, es exitosamente utilizado en la operación diaria de la red. Los T2-FLS son extremadamente útiles en esta situación, para la cual resulta difícil una modelación utilizando técnicas matemáticas tradicionales. En el caso del modelo de diagnóstico basado en ecuaciones relacionales e inferencia abductiva fuzzy se puede afirmar que provee un marco de referencia matemático adecuado para considerar la intuición y experiencia del operador. Los resultados obtenidos utilizando este modelo demuestran la factibilidad de obtener buenas soluciones utilizando datos inciertos y conocimiento experto.

³⁵ Tomando en cuenta el ambiente altamente incierto de los SDEE latinoamericanos

6.2.3 Operación y control del SDEE.

Con relación a la operación y control del SDEE, en este trabajo se estudia detalladamente el problema de la inferencia de la CO y su relación con la EE de SDEE, específicamente para el caso de los SDEE latinoamericanos, caracterizados por su bajo nivel de supervisión y control en TR. Esta relación no ha sido considerada en el estado del arte, en el que la mayoría de las propuestas se concentran principalmente en la estimación del estado eléctrico y generalmente se asume que la CO es conocida con precisión o no se proponen métodos para su inferencia, lo cual limita su aplicación en muchos SDEE reales. Otras propuestas presentan estrategias de inferencia de la CO que no son aplicables a SDEE con las características de supervisión y control del caso latinoamericano.

En este trabajo se propone una metodología flexible de inferencia de la CO, cuya arquitectura modular permite su utilización como punto de partida para la EE del SDEE, independientemente de si esta es generalizada o convencional. En el caso de la EE generalizada, la metodología desarrollada logra identificar un pequeño número de dispositivos de protección candidatos, i.e., cuyo estado operativo es dudoso, utilizando solamente los datos de TR. Estos resultados, además de servir para la gestión de interrupciones, pueden ser utilizados por un algoritmo de EE generalizada, si es factible su implementación. De esta forma se evitan los problemas de observabilidad y esfuerzo computacional derivados de la introducción de demasiadas variables de estado adicionales, para modelar el estado operativo de los dispositivos sospechosos. También se evitan los problemas de convergencia que pueden ocurrir en los algoritmos de EE generalizada de dos etapas, cuando la primera etapa se ejecuta en presencia de errores topológicos. En el caso de la EE convencional, se pueden utilizar los resultados de TRE para realizar la EE del SDEE basándose en una CO conocida con precisión. Un punto muy importante es que la metodología desarrollada es independiente del tipo de algoritmo de EE (probabilístico, fuzzy o determinístico) que se utilice para calcular el estado eléctrico de la red de MT. Esto demuestra su flexibilidad y potencialidad para aplicaciones prácticas.

6.2.4 Metodología de cálculo.

Con relación a la metodología de cálculo, este trabajo es la primera aplicación de la teoría de conjuntos fuzzy tipo 2 y T2-FLS para la solución de problemas operativos en SDEE. Los resultados obtenidos demuestran la flexibilidad y potencialidad de esta teoría matemática. En este sentido, se considera que esta investigación puede servir como punto de partida para futuras aplicaciones en SSEE, en las que la modelación del conocimiento experto y la utilización de datos cualitativos juegan un papel importante. Además, es posible mejorar muchas aplicaciones existentes que utilizan la teoría de conjuntos fuzzy tipo 1 y T1-FLS como marco de referencia matemático. En su lugar se pueden utilizar conjuntos fuzzy tipo 2 y T2-FLS y de esta manera se evitan algunas simplificaciones implícitas en los modelos fuzzy tipo 1. Por ejemplo, una aplicación que utilice T1-FLS puede ser mejorada sustancialmente si se utilizan T2-FLS, porque la salida de un T2-FLS es en realidad la unión de las salidas individuales de muchísimos T1-FLS incrustados. Los T2-FLS son más complejos que los T1-FLS, sin embargo si hay un beneficio en considerar las incertidumbres dentro del marco de referencia de los T2-FLS debe haber una relación de compromiso entre el mejoramiento del desempeño y la complejidad adicional. Esta relación de compromiso desempeño-complejidad es común a todas las situaciones de diseño [102].

Una de las principales ventajas de la metodología es su arquitectura modular, esta es una ventaja importante porque facilita su actualización y mejoramiento continuo. Por ejemplo, en el caso de la inferencia de la CO en TR, es posible incorporar variables adicionales a cada T2-FLS para mejorar la certeza de los resultados. El principal inconveniente en este caso es el crecimiento de la base de reglas, sin embargo, este problema puede ser solucionado mediante la utilización de las nuevas técnicas de reducción de reglas propuestas en la literatura, e.g., el método de Combs [180] y el método SVD [181]. En este sentido, no existe mayor inconveniente en adicionar variables al modelo de TR (e.g., temperatura), que pueden ser importantes en algunos SDEE.

Este es el primer trabajo en que se propone una metodología de cálculo de CFF tipo 1 y tipo 2 [1], la metodología está basada en la aplicación del principio de extensión fuzzy, el método vertex [181] y el teorema de representación [156], el cual facilita la derivación de resultados teóricos cuando se utilizan conjuntos fuzzy tipo 2. Los únicos antecedentes en este tema son [30], donde las funciones de pertenencia fuzzy tipo 1 de las corrientes de falla son definidas basándose en conocimiento experto exclusivamente y [3] donde se presenta una metodología basada en aritmética fuzzy tipo 1, la cual también fue desarrollada en el marco de este trabajo. La metodología propuesta (CFF) permite calcular las corrientes de falla del distribuidor utilizando variables inciertas, así es posible considerar la incertidumbre asociada a la impedancia de falla y a otras variables conocidas solamente de forma aproximada. Un punto importante es que los cálculos involucrados son menos complejos que los necesarios por ejemplo para el cálculo de corrientes de falla probabilísticas [182].

6.2.5 Aplicabilidad de la metodología.

Con relación a la aplicabilidad, la metodología puede ser implementada en SDEE reales, gracias a la novedosa modelación de las principales incertidumbres asociadas a los datos de TR y TRE y al aprovechamiento de la tolerancia por la imprecisión propia del problema. La modelación matemática propuesta facilita la aplicación, ya que no se requieren extensos estudios para obtener los datos necesarios para la implementación inicial. Por el contrario, la metodología es suficientemente flexible para adaptarse a la realidad de los SDEE, particularmente los latinoamericanos, en los que generalmente se dispone de pocos datos cuantitativos. Por ejemplo, en el caso de la inferencia en TR solamente se necesita de un grupo de expertos para definir las bases de reglas y entradas de los T2-FLS y las incertidumbres relativas de los distribuidores. Para definir las impedancias de falla basta utilizar valores aproximados. Todas las variables pueden ajustarse posteriormente a medida que se disponga de datos más precisos, algunos de los cuales pueden ser obtenidos por la misma metodología, una vez implementada (e.g., la frecuencia de operación de los dispositivos de protección). En el caso de la inferencia en TRE, el modelo de diagnóstico basado en ecuaciones relacionales e inferencia abductiva fuzzy tiene la ventaja de incorporar de forma sencilla la evidencia disponible en cada instante, en lugar de suponer que se cuenta con los datos necesarios para calcular las probabilidades previas de los modos de falla. Esta modelación además de ser más adecuada, facilita la implementación ya que no se requiere de datos estadísticos difíciles de obtener. La metodología explota la tolerancia por la imprecisión propia del problema de la inferencia de la CO, en el que basta conocer aproximadamente algunas variables para obtener buenas soluciones. De esta forma se evita la modelación rigurosa y poco flexible de las propuestas tradicionales, logrando un balance entre la complejidad del modelo y la precisión de los resultados.

El impacto de la implementación de la metodología en el ambiente de los DMS / OMS es muy importante, en vista que proporciona el punto de partida para la ejecución de la gestión de interrupciones y la EE del SDEE. También suministra los datos necesarios para el mantenimiento de una base de datos actualizada de la cronología de operación de la red, la cual es fundamental para el cálculo de los índices de CSE y confiabilidad y para la planificación del SDEE, e.g., para la programación del mantenimiento.

Los tiempos de cálculo de la metodología son satisfactorios para su aplicación en centros de control de SDEE reales³⁶. El tiempo de cálculo es una variable importante para la inferencia de la CO en TR, en este sentido el desempeño de los T2-FLS es aceptable. Sin embargo, por ser una herramienta matemática joven (las primeras publicaciones datan de 1998) su evolución es continua y la reducción de la carga computacional es uno de los principales temas de investigación, donde se han logrado progresos notables en los últimos dos años [158], [183]. En el caso de la inferencia en TRE, el procedimiento de cálculo basado en la reducción de la matriz de causalidad y la aplicación de la PCST obtiene todas las explicaciones de las manifestaciones observadas de forma muy eficiente. Esto permite mantener informado al operador de todas las soluciones plausibles en cada instante.

6.3 Aportes principales.

- Desarrollo de una metodología de inferencia de la CO de la red de distribución de MT, de arquitectura modular, capaz de integrar los datos cuantitativos y cualitativos de TR y TRE suministrados por los sistemas de información de la distribuidora y por los expertos, modelar sus incertidumbres, obtener soluciones de forma continua en el tiempo y mejorar la certeza de sus resultados dinámicamente.
- Desarrollo de T2-FLS para calcular los índices y certezas de operación necesarios para la inferencia de la CO en TR. De esta forma se considera la influencia conjunta del clima, los datos históricos de operación, el mantenimiento y los datos de TR suministrados por el SCADA, en el proceso de inferencia de la CO.
- Modelación sistemática del conocimiento experto y datos cualitativos suministrados por los operadores del SDEE e incorporación de los mismos al proceso de inferencia de la CO.
- Desarrollo de una metodología de cálculo de CFF tipo 1 y tipo 2, basada en la aplicación del principio de extensión fuzzy, el método vertex y el teorema de representación. Esta metodología permite calcular los valores posibles de las corrientes de falla de los distribuidores utilizando variables inciertas, i.e., variables cuyos valores son conocidos solamente de forma aproximada.
- Propuesta de una estrategia para la EE de SDEE utilizando como punto de partida la metodología de inferencia de la CO desarrollada en este trabajo. La metodología puede ser utilizada en una EE generalizada o convencional y es independiente del algoritmo de EE utilizado para calcular el estado eléctrico del SDEE.

³⁶ El programa de cálculo fue desarrollado en Matlab®, el tiempo de cálculo es de aprox. 8 seg. para el modelo de TR y 1 seg. para el modelo de TRE, para un distribuidor real con 55 dispositivos de protección y dependiendo del número de manifestaciones observadas. Estos tiempos de cálculo son válidos para un ordenador con procesador Athlon AMD de 2.0 GHz.

6.4 Futuros trabajos.

Como continuación de esta investigación se propone en primer lugar desarrollar un EE generalizado que utilice la metodología de inferencia de la CO en TR como etapa inicial para la selección de los dispositivos cuyo estado operativo es dudoso, los cuales posteriormente pueden ser modelados mediante la introducción de variables de estado y restricciones adicionales. Se propone la EE generalizada porque la tendencia a futuro es una mayor supervisión y control de los SDEE. Esto como resultado de los avances tecnológicos y de la reducción de los costos implícitos, así como del creciente interés en la generación distribuida (GD), cuya integración implica la disponibilidad de recursos de supervisión hasta ahora inexistentes en la red de MT. Se vislumbra que todos estos factores impulsarán la evolución de la red de MT hacia una red similar a la de AT, desde la perspectiva de la supervisión y control (e incluso de la operación). Por lo tanto se espera que en el mediano plazo sea posible lograr la observabilidad de regiones cada vez mayores de los distribuidores de MT. En este sentido es más adecuado apuntar hacia una EE generalizada. En segundo lugar se propone estudiar la influencia de la GD en el proceso de inferencia dinámica de la CO y de la EE de redes de distribución de MT. Este punto es importante por las modificaciones necesarias en los esquemas de protección y prácticas operativas existentes, para permitir la integración de la GD. Aunque en los SDEE latinoamericanos este fenómeno es aún incipiente, es un tema que es necesario estudiar en el mediano plazo. Finalmente se propone estudiar las aplicaciones de las CFF en la coordinación de protecciones y planificación de SDEE, e.g., investigar la coordinación para un rango continuo de corrientes de falla, en lugar de solamente hacerlo para corrientes de falla mínima y máxima.

CAPÍTULO 7

7 Referencias

7.1 Gestión de interrupciones.

- [1] J. Romero Agüero, A. Vargas, "Inference of operative configuration of medium voltage distribution networks using fuzzy logic techniques – Part I: Real-time model, in press in *IEEE Trans Power Systems*.
- [2] J. Romero Agüero, A. Vargas, "Inference of operative configuration of medium voltage distribution networks using fuzzy logic techniques – Part II: Extended real-time model, in press in *IEEE Trans Power Systems*.
- [3] J. Romero Agüero, D. Hirschmann, A. Vargas, "Inference of the operative configuration of medium voltage distribution networks", in *Proc. IEEE 2003 Bologna Power Tech Conference*, Vol. 3, pp. 562-569, Jun. 2003.
- [4] J. Romero Agüero, A. Vargas, "Using type-2 fuzzy logic systems to infer the operative configuration of distribution networks", accepted for publication in *Proc. 2005 PES General Meeting*, Jun. 2005.
- [5] Y. Liu, N.N. Schulz, "Integrated fuzzy filter for distribution outage information", *Electric Power Systems Research*, Vol. 63, No.3, pp. 177-184, Oct. 2002.
- [6] J. Burke, "Using outage data to improve reliability", *IEEE Computer Applications in Power*, Vol. 13, No. 2, pp. 824-829, Apr. 2000.
- [7] The Distribution Working Group of the IEEE Power System Planning and Implementation Committee, "Planning for effective distribution", *IEEE Power and Energy Magazine*, Vol. 1, No.5, pp. 54-62, Sep.-Oct. 2003.
- [8] R. Rodriguez, "Restauración de carga en redes de distribución de media tensión considerando la calidad del servicio", Ph.D. dissertation, Instituto de Energía Eléctrica, Universidad Nacional de San Juan, Argentina, Mar. 2001.
- [9] Y. Liu, N.N. Schulz, "Knowledge-based system for distribution system outage locating using comprehensive information", *IEEE Trans. Power Systems*, Vol. 17, No. 2, pp. 451-456, May 2002.
- [10] K. Sridharan and N.N. Schulz, "Outage management through AMR systems using an intelligent data filter," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 16, pp. 669-675, Oct. 2001.
- [11] M.S. Moore, S. Monemi, J. Wang, J. Marble, S. Jones, "Diagnostics and Integration in Electric Utilities", in *Proc. IEEE 2000 Rural Electric Power Conference*, May 2000, pp. C2-1-C2-10.
- [12] W.G. Scott, "Automating the restoration of distribution services in major emergencies", *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 5, No. 2, pp. 1034-1039, Apr. 1990.
- [13] Y.Y. Hsu, F.C. Lu, Y. Chien, J.P. Liu, J.T. Lin, H.S. Yu, R.T. Kuo, "An expert system for locating distribution system faults", *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 6, No. 1, pp. 366-372, Jan. 1991.
- [14] C.N. Lu, M.T. Tsay, Y.J. Hwang, Y.C. Lin, "An artificial neural network based trouble call analysis", *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 9, No. 3, pp. 1663-1668, Jul. 1994.
- [15] Z.L. Gaing, C.N. Lu, Y.T. Lin, "Object-oriented design of trouble call analysis system on personal computer", *IEE Proc. Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 142, No. 2, pp. 167-172, Mar. 1995.
- [16] E.P. Laverty, N.N. Schulz, "An improved algorithm to aid in post-storm restoration", *IEEE Trans. Power Systems*, Vol. 14, No. 2, pp. 446-450, 1999.
- [17] Z. Sumic, R. Vidyanand, "Fuzzy set theory based outage determination", in *Proc. of 1996 International Conference on Intelligent Systems Applications to Power Systems (ISAP'96)*, pp. 204-208, Orlando, USA, Jan.-Feb. 1996.
- [18] P.D. Rodrigo, A. Pahwa, J.E. Boyer, "Location of outages in distribution systems based on statistical hypothesis testing", *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 11, No. 1, pp. 546-551, Jan. 1996.
- [19] M.T. Say, W.M. Lin, A.J. Hwang, "A reliability model based trouble call analysis involving old secondary circuits", in *Proc. of 1998 International Conference on Power System Technology (POWERCON'98)*, Vol. 1, pp. 270-274, Aug. 1998.

- [20] C.S. Chang, F.S. Wen, "Tabu search based approach to trouble call analysis", *IEE Proc. Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 145, No. 6, pp. 731-738, Nov. 1998.
- [21] Final Report of the CIRED Working Group WG03, Fault Management, "Fault management in electrical distribution systems", CIRED 1999.
- [22] P. Jarventausta, P. Verho, J. Partanen, "Using fuzzy sets to model the uncertainty in the fault location process of distribution networks", *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 9, No. 2, pp. 954-960, Apr. 1994.
- [23] R. Balakrishnan, A. Pahwa, "A computer assisted intelligent storm outage evaluator for power distribution systems", *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 5, No. 3, pp. 1591-1597, Jul. 1990.
- [24] G.C. Lampley, "Fault detection and location on electrical distribution system case study", in *Proc. 2002 IEEE Rural Electric Power Conference*, pp.B11-B15, May 2002.
- [25] C.-L. Su, S.-A. Yin, Y.-C. Chang, "Computer simulations of an integrated distribution information system", in *Proc. 2002 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, Vol. 1, pp. 690-694, Jan. 2002.
- [26] R. Rosés, D. Castro, "Estimación de la localización de protecciones accionadas en sistemas de distribución con sistema de telemedida limitado", in *Proc. International Congress on Electrical Distribution, CIDEL Argentina 2002*, Paper No. 2.2.13, Dic. 2002
- [27] J. Zhu, D.L. Lubkeman, A.A. Girgis, "Automated fault location and diagnosis on electric power distribution feeders", *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 12, No. 2, pp. 801-809, Apr. 1997.
- [28] G.E. Hager, R.N. Medicine Bear, A.S. Baum, "Automated distribution fault locating system", *IEEE Trans. Industry Applications*, Vol. 32, No. 3, pp. 704-708, May-Jun 1996.
- [29] E.M. Martinez, E.F. Richards, "An expert system to assist distribution dispatchers in the location of system outages", in *Proc. of 35th Rural Electric Power Conference*, pp. A2/1-A2/5, Apr. 1991.
- [30] W.-H.E. Liu, W. Zhong, "A fuzzy set method for fault location identification in power distribution systems", in *Proc. of 35th Conference on Decision and Control*, Vol. 2, pp. 2208-2212, Dec. 1996.
- [31] Y. Liu, N.N. Schulz, "Distribution system outage restoration analysis using a wireless AMR system", in *Proc. IEEE 2002 Power Engineering Society Winter Meeting*, Vol. 2, pp. 871-875.
- [32] K. Sridharan, N.N. Schulz, "Outage management through AMR systems using an intelligent data filter", *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 16, No. 4, pp. 669-675, Oct. 2001.
- [33] R.A. Fisher, A.S. Laakonen, N.N. Schulz, "A general polling algorithm using a wireless AMR system for restoration confirmation", *IEEE Trans. Power Systems*, Vol. 16, No. 2, pp. 312-316, May. 2001.

7.2 Identificación de errores topológicos en EE de STEE.

- [34] D.G. Colomé, A. Vargas, "Estimación del estado de operación de sistemas de distribución en mercados eléctricos competitivos. Estado del arte", in *Proc. International Congress on Electrical Distribution, CIDEL, Argentina 2002*, Paper No. 2.5.24, Dic. 2002.
- [35] A. Vargas, "Aplicaciones de tiempo real para el cálculo de estados eléctricos y optimización de redes de distribución", Ph.D. dissertation, Instituto de Energía Eléctrica, Universidad Nacional de San Juan, Argentina, Sep. 2001.
- [36] J.J. Grainger, W.D. Stevenson Jr., *Power System Analysis*, McGraw-Hill, USA, 1994.
- [37] A.J. Wood, B.F. Wollenberg, *Power Generation, Operation, and Control*, John Wiley and Sons, Inc., USA, 1996.
- [38] A. Gómez Expósito et.al., *Análisis y Operación de Sistemas de Energía Eléctrica*, McGraw-Hill, España, 2002.
- [39] M. Prais, A. Bose, "A topology processor that tracks network modifications over time", *IEEE Trans. Power Systems*, Vol. 3, No. 3, pp. 992-998, Aug. 1988.
- [40] K.A. Clements, P.W. Davis, "Detection of topology errors in electric power systems", *IEEE Trans. Power Systems*, Vol. 3, No. 4, pp. 1748-1753, Nov. 1988.
- [41] F.F. Wu, W.-H.E. Liu, "Detection of topology errors by state estimation", *IEEE Trans. Power Systems*, Vol. 4, No. 1, pp. 176-183, Feb. 1989.
- [42] A.S. Costa, J.A. Leao, "Identification of topology errors in power system state estimation", *IEEE Trans. Power Systems*, Vol. 8, No. 4, pp. 1531-1538, Nov. 1993.

- [43] L. Mili, G. Steeno, F. Dobraca, D. French, "A robust estimation method for topology error identification", *IEEE Trans. Power Systems*, Vol. 14, No. 4, pp. 1469-1476, Nov. 1999.
- [44] N. Singh, H. Glavitsch, "Detection and identification of topological errors in online power system analysis", *IEEE Trans. Power Systems*, Vol. 6, No. 1, pp. 324-331, Feb. 1991.
- [45] N. Singh, F. Oesch, "Practical experience with rule-based on-line topology error detection", *IEEE Trans. Power Systems*, Vol. 9, No. 2, pp. 841-847, May 1994.
- [46] C.N. Lu, J.H. Teng, B.S. Chang, "Power system network topology error detection", *IEE Proc. Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 141, No. 6, pp. 623-629, Nov. 1994.
- [47] D.M.V. Kumar, S.C. Srivastava, "Topology processing and static state estimation using artificial neural networks", *IEE Proc. Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 143, No. 1, pp. 99-105, Jan. 1996.
- [48] T. Tian, M. Zhu, B. Zhang, "An artificial neural network-based expert system for network topological error identification", in *Proc. IEEE International Conference on Neural Networks*, Vol. 2, pp. 882-886, Nov. 1995.
- [49] A. Monticelli, "Modeling circuit breakers in weighted least squares state estimation", *IEEE Trans. Power Systems*, Vol. 8, No. 3, pp. 1143-1149, Aug. 1993.
- [50] A. Abur, H. Kim, M.K. Çelik, "Identifying the unknown circuit breaker statuses in power networks", *IEEE Trans. Power Systems*, Vol. 10, No. 4, pp. 2029-2037, Nov. 1995.
- [51] O. Alsac, N. Vempati, B. Stott, A. Monticelli, "Generalized state estimation", *IEEE Trans. Power Systems*, Vol. 13, No. 3, pp. 1069-1075, Aug. 1998.
- [52] A. Gómez Expósito, A. de la Villa Jaén, "Reduced substation models for generalized state estimation", *IEEE Trans. Power Systems*, Vol. 16, No. 4, pp. 839-846, Nov. 2001.
- [53] A. de la Villa Jaén, A. Gómez Expósito, "Modeling unknown circuit breakers in generalized state estimators", in *Proc. IEEE 2001 Porto Power Tech Conference*, Vol. 3, Sep. 2001.
- [54] J.C. Pereira, J.T. Saraiva, V. Miranda, A.S. Costa, E.M. Lourenço, K.A. Clements, "Comparison of approaches to identify topology errors in the scope of state estimation studies", in *Proc. IEEE 2001 Porto Power Tech Conference*, Vol. 3, Sep. 2001.
- [55] A.S. Costa, F. Vieira, "Topology error identification through orthogonal estimation methods and hypothesis testing", in *Proc. IEEE 2001 Porto Power Tech Conference*, Vol. 3, Sep. 2001.
- [56] S. Zhong, A. Abur, "Implementation of a modified state estimator for topology error identification", in *Proc. IEEE 2003 Power Engineering Society General Meeting*, Vol. 2, pp. 765-770, Jul. 2003.
- [57] E.M. Lourenço, A.S. Costa, K.A. Clements, "Bayesian-based hypothesis testing for topology error identification in generalized state estimation", *IEEE Trans. Power Systems*, Vol. 19, No. 2, pp. 1206-1215, May 2004.
- [58] K.A. Clements, A.S. Costa, "Topology error identification using normalized lagrange multipliers", *IEEE Trans. Power Systems*, Vol. 13, No. 2, pp. 347-353, May 1998.
- [59] H. Singh, F.L. Alvarado, "Network topology determination using least absolute value state estimation", *IEEE Trans. Power Systems*, Vol. 10, No. 3, pp. 1159-1165, Aug. 1995.
- [60] J.C.S. Souza, A.M. L. da Silva, A.P.A. da Silva, "Data debugging for real-time power system monitoring based on pattern analysis", *IEEE Trans. Power Systems*, Vol. 11, No. 3, pp. 1592-1599, Aug. 1996.
- [61] J.C.S. Souza, A.M. L. da Silva, A.P.A. da Silva, "Online topology determination and bad data suppression in power system operation using artificial neural networks", *IEEE Trans. Power Systems*, Vol. 13, No. 3, pp. 796-803, Aug. 1996.
- [62] M.B. Do Coutto Filho, A.M.L. da Silva, J.M.C.C. Cantera, R.A. da Silva, "Information debugging for real-time power systems monitoring", *IEE Proc. Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 136, No. 3, pp. 145-152, May 1989.

7.3 EE de SDEE.

- [63] Y. He, D.C. Yu, Y. Deng, J. Lei, "An efficient topology processor for distribution systems", in *Proc. IEEE 2001 Power Engineering Society Winter Meeting*, Vol. 2, pp. 824-829, Jan. 2001.

- [64] I. Roytelman, S.M. Shahidehpour, "State estimation for electric power distribution systems in quasi-real time conditions", *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 8, No. 4, pp. 2009-2015, Oct. 1993.
- [65] M.E. Baran, A.W. Kelley, "State estimation for real-time monitoring of distribution systems", *IEEE Trans. Power Systems*, Vol. 9, No.3, pp. 1601-1609, Aug. 1994.
- [66] W.-M. Lin, J.-H. Teng, "Distribution fast decoupled state estimation by measurement pairing", *IEE Proc. Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 143, No.1, pp. 43-48, Jan. 1996.
- [67] K. Li, "State estimation for power distribution system and measurement impacts", *IEEE Trans. Power Systems*, Vol. 11, No. 2, pp. 911-916, May 1996.
- [68] A.K. Ghosh, D.L. Lubkeman, M.J. Downey, R.H. Jones, "Distribution circuit state estimation using a probabilistic approach", *IEEE Trans. Power Systems*, Vol. 12, No. 1, pp. 45-51, Feb. 1997.
- [69] M.E. Baran, "Challenges in state estimation on distribution systems", in *Proc. IEEE 2001 Power Engineering Society Summer Meeting*, Vol. 1, pp. 429-433, Jul. 2001.
- [70] A.T. Saric, R.M. Ciric, "Integrated fuzzy state estimation and load flow analysis in distribution networks", *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 18, No. 2, pp. 571-578, Apr. 2003.
- [71] J. Pereira, V. Miranda, J.T. Saraiva, "A Comprehensive State Estimation Approach for EMS/DMS Applications", in *Proc. of IEEE Budapest Power Tech Conference*, paper BPT99-358-16, Aug. 1999.
- [72] J. Pereira, J.T. Saraiva, V. Miranda, "Some Practical Issues in the Migration of State Estimation Modules from EMS to DMS Systems", in *Proc. of 6th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems*, Vol.2, Sep. 2000.
- [73] J. Pereira, V. Miranda, J.T. Saraiva, "Fuzzy Control of State Estimation Robustness", in *Proc. of 14th Power Systems Computation Conference*, Jun, 2002.
- [74] J.M.C. Pereira, "A state estimation approach for distribution networks considering uncertainties and switching", Ph.D. dissertation, Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Portugal, Jul. 2001.
- [75] C.N. Lu, J.H. Teng, W.-H.E. Liu, "Distribution system state estimation", *IEEE Trans. Power Systems*, Vol. 10, No. 1, pp. 229-240, Feb. 1995.
- [76] Y. Deng, Y. He, B. Zhang, "A branch-estimation-based state estimation method for radial distribution systems", *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 17, No. 4, pp. 1057-1062, Oct. 2002.
- [77] W.-M. Lin, "State estimation for distribution systems with zero-injection constraints", *IEEE Trans. Power Systems*, Vol. 11, No. 1, pp. 518-524, Feb. 1996.
- [78] M.E. Baran, A.W. Kelley, "A branch-current-based state estimation method for distribution systems", *IEEE Trans. Power Systems*, Vol. 10, No. 1, pp. 483-491, Feb. 1995.
- [79] A.P. S. Meliopoulos, F. Zhang, "Multiphase power flow and state estimation for power distribution systems", *IEEE Trans. Power Systems*, Vol. 11, No. 2, pp. 939-946, May 1996.
- [80] S. Naka, T. Genji, T. Yura, Y. Fukuyama, "A hybrid particle swarm optimization for distribution state estimation", *IEEE Trans. Power Systems*, Vol. 18, No. 1, pp. 60-68, Feb. 2003.
- [81] F. Zhang, C.S. Cheng, "A modified Newton method for radial distribution system power flow analysis", *IEEE Trans. Power Systems*, Vol. 12, No. 1, pp. 389-397, Feb. 1997.
- [82] J.-H. Teng, "Handling current-magnitude measurement in transmission and distribution system state estimator", *IEE Proc. Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 147, No. 4, pp. 202-206, Jul. 2000.
- [83] W.-M. Lin, J.-H. Teng, S.-J. Chen, "A highly efficient algorithm in treating current measurements for the branch-current-based distribution state estimation", *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 16, No. 3, pp. 433-439, Jul. 2001.
- [84] J.-H. Teng, "Using voltage measurements to improve the results of branch-current-based state estimators for distribution systems", *IEE Proc. on Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 149, No. 6, pp. 667-672, Nov. 2002.
- [85] H. Wang, N.N. Schulz, "A revised branch current-based distribution system state estimation algorithm and meter placement impact", *IEEE Trans. Power Systems*, Vol. 19, No. 1, pp. 207-213, Feb. 2004.

7.4 Inferencia de la CO en TR.

- [86] T. Gönen, *Electric Power Distribution System Engineering*, McGraw-Hill, USA, 1986.
- [87] J.J. Burke, *Power Distribution Engineering. Fundamentals and Applications*, Marcel Dekker Inc., USA, 1994.
- [88] E. Lakervi, E.J. Holmes, *Electricity Distribution Network Design*, Peter Peregrinus, Ltd., on behalf of the Institution of Electrical Engineers, UK, 1995.
- [89] H. Scott, "Utility AMR deployment numbers up significantly", *Utility Automation*, Vol. 7, No. 4, pp. 13-16, Jul./Aug. 2002.
- [90] R. Billinton, R.N. Allan, *Reliability Evaluation of Power Systems*, Plenum Press, USA, 1996.
- [91] R. Billinton, J.E. Billinton, "Distribution system reliability indices", *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 4, No. 1, pp. 561-568, Jan. 1988.
- [92] C.A. Warren, R. Ammon, G. Welch, "A survey of distribution reliability measurement practices in the U.S.", *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 14, No.1, pp. 250-257, Jan. 1999.
- [93] *Electrical Distribution-System Protection*, 3rd Edition, Cooper Power Systems, 1990.
- [94] J. Dagenhart, "The 40- Ω ground fault phenomenon", *IEEE Trans. Industry Applications*, Vol. 36, No. 1, pp. 30-32, Jan./Feb. 2000.
- [95] B.M. Aucoin, R.H. Jones, "High impedance fault detection implementation issues", *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 11, No. 1, pp. 139-148, Jan. 1996.
- [96] C.L. Benner, B.D. Russell, "Practical high impedance fault detection on distribution feeders", *IEEE Trans. Industry Applications*, Vol. 33, No. 3, pp. 635-640, May/Jun. 1997.
- [97] D.C.T. Wai, X. Yibin, "A novel Technique for high impedance fault identification", *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 13, No. 3, pp. 738-744, Jul. 1998.
- [98] F.G. Jota, P.R.S. Jota, "High-impedance fault identification using a fuzzy reasoning system", *IEE Proc. on Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 145, No. 6, pp. 656-662, Nov. 1998.
- [99] E.C. Senger, W. Kaiser, J.C. Santos, P.M.S. Burt, C.V.S. Malagodi, "Broken conductors protection system using carrier communication", *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 15, No. 2, pp. 525-530, Apr. 2000.
- [100] Y. Sheng, S.M. Rovnyak, "Decision tree-based methodology for high impedance fault detection", *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 19, No. 2, pp. 533-536, Apr. 2004.
- [101] Working Group on Distribution Protection, "Distribution Line Protection Practices, Industry Results, IEEE Power System Relaying Committee Report", *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 10, No. 1, pp. 176-186, Jan. 1995.
- [102] J.M. Mendel, *Uncertain Rule-Based Fuzzy Logic Systems, Introduction and New Directions*, Prentice Hall PTR, USA, 2001.
- [103] S. Kearney, "How outage management systems can improve customer service", in *Proc. 1998 IEEE 8th International Conference on Transmission and Distribution Construction, Operation and Live-Line Maintenance, ESMO'98*, pp. 172-178, Apr. 1998.
- [104] M.K. Celik, "Integration of advanced applications for distribution automation", in *Proc. 1999 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, Vol. 1, pp. 366-369, Jan.-Feb. 1999.
- [105] R. Horn, P. Johnson, "Outage management applications and methods panel session: outage management techniques and experience", in *Proc. IEEE 1999 Power Engineering Society Winter Meeting*, Vol. 2, pp. 866-869, Jan.-Feb. 1999.
- [106] J. Rosa, J. Carrasco, L. Cunha, N. Mendes, F. Bastiao, A. Rodríguez, "Modern control centres for distribution networks", in *Proc. IEEE 2001 Porto Power Tech Conference*, Sep. 2001.
- [107] J.F. Antunes, C. Neto, L.M. Paredes, "Quality of service in EDP distribution-preparing the present, challenging the future", in *Proc. IEEE 2001 Porto Power Tech Conference*, Sep. 2001.
- [108] T.D. Nielsen, "Improving outage restoration efforts using rule-based prediction and advanced analysis", in *Proc. 2002 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, Vol. 2, pp. 833-837, Jan. 2002.
- [109] Y. Liu, N.N. Schulz, "Integrated outage information filter for the distribution system using intelligent method", in *Proc. 2000 IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, Vol. 4, pp. 2344-2349, Jul. 2000.
- [110] T.J. Ross, *Fuzzy Logic with Engineering Applications*, 1st Ed., McGraw-Hill, Inc., USA, 1995.

- [111] L.H. Tsoukalas, R.E. Urigh, *Fuzzy and Neural Approaches in Engineering*, John Wiley and Sons, Inc., USA, 1997.
- [112] A. Kaufmann, M.M. Gupta, *Introduction to Fuzzy Arithmetic. Theory and Application*, Van Nostrand Reinhold Company Inc., 1985.
- [113] J.M. Mendel, "An architecture for making judgments using computing with word", *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, Vol. 12, No. 3, pp. 325-335, 2002.
- [114] J.M. Mendel, "The perceptual computer: an architecture for computing with words", in *Proc. International Conference on Fuzzy Systems*, Vol. 1, pp. 35-38, Dec. 2001.

7.5 Inferencia de la CO en TRE.

- [115] D. Dubois, H. Prade, Fuzzy relation equations and causal reasoning, *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 75, pp. 119-134, Oct. 1995.
- [116] D. Cayrac, D. Dubois, H. Prade, "Handling uncertainty with possibility theory and fuzzy sets in a satellite fault diagnosis application", *IEEE Trans. on Fuzzy Systems*, Vol. 4, No. 3, pp. 251-269, Aug. 1996.
- [117] D. Dubois, M. Grabisch, O. de Mouzon, H. Prade, "A possibilistic framework for single-fault causal diagnosis under uncertainty", *International Journal of General Systems*, Vol. 30, No. 2, pp. 167-192, 2001.
- [118] D. Dubois, H. Prade, "A fuzzy relation-based extension to Reggia's relational model for diagnosis handling uncertain and incomplete information", in *Proc. 9th Conference on Uncertainty Artificial Intelligence*, pp. 106-113, Jul. 1993.
- [119] F.S. Wen, C.S. Chang, "Tabu search approach to alarm processing in power systems", *IEE Proc. Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 144, No. 1, pp. 31-38, Jan. 1998.
- [120] I. Dabbaghchi, R.J. Gursky, "An abductive expert system for interpretation of real-time data", *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 8, No. 3, pp. 1061-1069, Jul. 1993.
- [121] F.S. Wen, C.S. Chang, "A new method for diagnostic problem solving based on a fuzzy abductive inference model and the tabu search approach", *Artificial Intelligence in Engineering*, Vol. 13, No. 1, pp. 83-90, Jan. 1999.
- [122] Y. Miyata, T. Furuhashi, Y. Uchikawa, "A study on fuzzy abductive inference", in *Proc. of 1995 IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, Vol. 1, pp. 337-342, Mar. 1995.
- [123] Y. Miyata, T. Furuhashi, Y. Uchikawa, "A proposal of abductive inference with degrees of manifestations", *International Journal of Intelligent Systems*, Vol. 13, No. 6, pp. 467-482, 1998.
- [124] Y. Miyata, T. Furuhashi, Y. Uchikawa, "A proposal of abductive inference using fuzzy logic", in *Proc. of 4th International Conference on Soft Computing*, pp. 863-866, 1996.
- [125] X.Z. Wang, M.L. Lu, C. McGreavy, "Learning dynamic fault models based on a fuzzy set covering method", *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 21, No. 6, pp. 621-630, Feb. 1997.
- [126] J.A. Reggia, D.S. Nau, P.Y. Wang, "A formal model of diagnostic inference I. Problem formulation and decomposition", *Information Sciences*, Vol. 37, pp. 227-256.
- [127] J.A. Reggia, D.S. Nau, P.Y. Wang, "A formal model of diagnostic inference II. Algorithmic solution and application", *Information Sciences*, Vol. 37, pp. 257-285.
- [128] Y. Peng, J.A. Reggia, "Plausibility of diagnostic hypotheses: The nature of simplicity", in *Proc. 1986 National Conference on Artificial Intelligence (AAAI'86)*, pp. 140-145, Aug. 1986.
- [129] Y. Peng, J.A. Reggia, "A connectionist model for diagnostic problem solving", *IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics*, Vol. 19, No. 2, pp. 285-298, Mar./Apr. 1989.
- [130] Y. Peng, J.A. Reggia, *Abductive Inference Models for Diagnostic Problem-Solving*, Springer-Verlag, USA, 1990.
- [131] J. Wainer, A. de Melo Rezende, "A temporal extension to the parsimonious covering theory", *Artificial Intelligence in Medicine*, Vol. 10, No. 3, pp. 235-255, Jul. 1997.
- [132] M.A.C.C. Matos, M.T. Ponce de Leao, "Electric distribution systems planning with fuzzy loads", *International Transactions in Operational Research*, Vol. 2, No. 3, pp. 287-296, Jul. 1995.

- [133] V. Miranda, J. Pereira, J.T. Saraiva, "Load allocation with a fuzzy state estimator", *IEEE Trans. Power Systems*, Vol. 15, No. 2, pp. 529-534, May 2000.
- [134] V. Miranda, M.A.C.C. Matos, "Distribution system planning with fuzzy models and techniques", in *Proc. of 10th International Conference on Electricity Distribution CIRED 1989*, Vol. 6, pp. 472-476, May. 1989.
- [135] V. Miranda, M.A.C.C. Matos, J.T. Saraiva, "Fuzzy load flow-new algorithms incorporating uncertain generation and load representation", in *Proc. 10th Power Systems Computer Conference (PSCC)*, pp. 621-627, Aug. 1990.
- [136] R.-F. Chang, F.-C. Leou, C.-N. Lu, "Distribution transformer load modelling using load research data", *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 17, No. 2, pp. 655-661, Apr 2002.
- [137] J.-M. Ling, C.-E. Lin, C.-L. Huang, "Investigation of fuzzy real power flow modelling with probabilistic-heuristic based information", *Electric Power Systems Research*, Vol. 32, No. 3, pp. 175-186, Mar. 1995.
- [138] R.-N.P. Singh, W.H. Bailey, "Fuzzy logic applications to multisensor-multitarget correlation", *IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 33, No. 3, pp. 752-769, Jul. 1997.
- [139] M.R. Civanlar, H.J. Trusell, "Constructing membership functions using statistical data", *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 18, No. 1, pp.1-13, Jan. 1986.
- [140] A.K. Ghosh, D.L. Lubkeman, R.H. Jones, "Load modelling for distribution circuit state estimation", *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 12, No. 2, pp. 999-1005, Apr. 1997.
- [141] V. Miranda, P. Calisto, "A fuzzy inference system to voltage/VAR control in DMS – Distribution Management System", in *Proc. 14th Power Systems Computer Conference*, Session 03, Paper 1, June 2002.
- [142] H.-J. Zimmermann, "Fuzzy Set Theory and its Applications", Kluwer Academic Publishers, USA, 1996.
- [143] M.Y. Park, M. Lefley, B. Ramsay, I. Moyes, "An abductive fuzzy knowledge based system for fault diagnosis in a power system", in *Proc. International Conference on Power System Technology (POWERCON'2000)*, Vol. 1, pp. 345-350, Dec. 2000.
- [144] Q. Liang, N.N. Karnik, J.M. Mendel, "Connection admission control in ATM networks using survey-based type-2 fuzzy logic system", *IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics-Part C: Applications and Reviews*, Vol. 30, No. 3, pp. 329-339, Aug. 2000.
- [145] D.A. Castro, "Estimación de la localización de protecciones accionadas en sistemas de distribución con sistemas de teledatada limitado", Tesis de Grado, Carrera de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de San Juan, Argentina, 2001.

7.6 Anexos.

- [146] N.N. Karnik, J.M. Mendel, Q. Liang, "Type-2 fuzzy logic systems", *IEEE Trans. Fuzzy Systems*, Vol. 7, No. 6, pp.643-658, Dec.1999.
- [147] Q. Liang, J.M. Mendel, "Interval type-2 fuzzy logic systems: theory and design", *IEEE Trans. on Fuzzy Systems*, Vol.8, No.5, pp.535-550, Oct.2000.
- [148] H.A. Hagra, "A hierarchical type-2 fuzzy logic control architecture for autonomous mobile robots", *IEEE Trans. Fuzzy Systems*, Vol. 12, No. 4, pp. 524-539, Aug. 2004.
- [149] N.N. Karnik, J.M. Mendel, "Type-2 fuzzy logic systems: type reduction", in *Proc. IEEE International Conference of Systems, Man and Cybernetics*, Vol. 2, pp. 2046-2051, Oct. 1998.
- [150] N.N. Karnik, J.M. Mendel, "Centroid of a type-2 fuzzy set", *Information Sciences*, Vol. 132, No. 1-4, pp. 195-220, Feb. 2001.
- [151] J.M. Mendel, "Fuzzy sets for words: a new beginning", in *Proc. IEEE International Conference of Fuzzy Systems*, Vol. 1, pp. 37-42, May 2003.
- [152] Q. Liang, J.M. Mendel, "An introduction to type-2 TSK fuzzy logic systems", in *Proc. IEEE International Conference of Fuzzy Systems*, Vol. 3, pp. 1534-1599, Aug. 1999.
- [153] D. Dubois, H. Prade, *Fuzzy Sets and Systems*, Academic Press, Inc., USA, 1980.

- [154] T. Ozen, J.M. Garibaldi, "Investigating adaptation in type-2 fuzzy logic systems applied to umbilical acid base assessment", in *Proc. of the 2003 European Symposium on Intelligent Technologies (EUNITE 2003)*, pp. 289-294, Jul. 2003.
- [155] S. Musikasawan, T. Ozen, J.M. Garibaldi, "An Investigation into the effect of number of model parameters on performance in type-1 and type-2 fuzzy logic systems", in *Proc. of Information Processing and Management of Uncertainty in Knowledge Based Systems (IPMU 2004)*, Jul. 2004.
- [156] J.M. Mendel, R.I. John, "Type-2 fuzzy sets made simple", *IEEE Trans. Fuzzy Systems*, Vol. 10, No. 2, Apr. 2002, pp. 117-127.
- [157] S. Coupland, R. John, "An approach to type-2 fuzzy arithmetic", in *Proc. UK Workshop on Computational Intelligence*, pp. 107-114, Sep. 2003.
- [158] J.M. Mendel, "On a 50% savings in the computation of the centroid of a symmetrical interval type-2 fuzzy set", *Information Sciences, In Press, Corrected Proof*.
- [159] P. Järventausta, P. Verho, M. Kärelampi, J. Partanen, "AI methods for fault location in MV networks", *Engineering Intelligent Systems*, Vol. 5, No. 4, pp. 265-271, Dec. 1997.
- [160] M. Lehtonen, S. Hänninen, T. Laine, M. Seppänen, E. Antila, E. Markkila, "An automatic fault management model for distribution networks", in *Proc. International Conference on Energy Management and Power Delivery (EMPD)*, Vol. 2, pp. 645-649, Mar. 1998.
- [161] B.-G. Jin, D.-S. Lee, S.-J. Lee, M.-S. Choi, S.-H. Kang, "Intelligent fault location and diagnosis system on radial distribution systems", in *Proc. 14th Power System Computation Conference (PSCC)*, Session 08, Paper 4, Jun. 2002.
- [162] S.-J. Lee, M.-S. Choi, S.-H. Kang, B.-G. Jin, D.-S. Lee, B.-S. Ahn, N.-S. Yoon, H.-Y. Kim, S.-B. Wee, "An intelligent and efficient fault location and diagnosis scheme for radial distribution systems", *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 19, No. 2, pp. 524-532, Apr. 2004.
- [163] T.-H. Chen, M.-S. Chen, W.-J. Lee, P. Kotas, P.V. Olinda, "Distribution system short circuit analysis – a rigid approach", *IEEE Trans. Power Systems*, Vol. 7, No. 1, pp. 444-450, Feb. 1992.
- [164] X. Zhang, F. Soudi, D. Shirmohammadi, C.S. Cheng, "A distribution short circuit analysis approach using hybrid compensation method", *IEEE Trans. Power Systems*, Vol. 10, No. 4, pp. 2053-2059, Nov. 1995.
- [165] A. Tan, W.-H.E. Liu, D. Shirmohammadi, "Transformer and load modelling in short circuit analysis for distribution systems", *IEEE Trans. Power Systems*, Vol. 12, No. 3, pp. 1315-1322, Aug. 1997.
- [166] R. Roeper, *Short-circuit currents in three-phase systems*, 2.Ed., Siemens Aktiengesellschaft - John Wiley and Sons, Ltd., Germany, 1985.
- [167] C.H. Edwards Jr., D.E. Penney, "Cálculo con geometría analítica", 4. Ed., Pearson - Prentice Hall Hispanoamérica S.A., México, 1996.
- [168] M. Kärelampi, P. Verho, P. Jarventausta, J. Partanen, "Forecasting the short-term loads of MV-feeders and distribution substations – a DMS function", in *Proc. 12th Power Systems Computation Conference (PSCC)*, Vol. 2, pp. 757-763, Aug. 1996.
- [169] A. Seppälä, "The estimation and simulation of electricity customer hourly load distribution", in *Proc. 12th Power Systems Computation Conference (PSCC)*, Vol. 1, pp. 238-244, Aug. 1996.
- [170] A. Seppälä, "Load research and load estimation in electricity distribution", Ph.D. dissertation, Helsinki University of Technology, Espoo, Finland, Nov. 1996.
- [171] R.M. Pringles, D.G., Colomé, "Pseudomediciones de carga en subestaciones MT/BT de distribuidores radiales para su uso en la estimación de estado de sistemas de distribución", in *Proc. 5th Latin American Congress: Electricity, Generation and Transmission*, Nov. 2003.
- [172] R.M. Pringles "Generación de pseudomediciones de carga en subestaciones MT/BT de distribuidores radiales", Tesis de Grado, Carrera de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de San Juan, Argentina, 2003.
- [173] H. Wang, N.N. Schulz, "A load modelling algorithm for distribution state estimation", in *Proc. IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*, Vol. 1, pp. 102-106, Oct. - Nov. 2002.
- [174] H.-C. Kuo, Y.-Y. Hsu, "Distribution system load estimation and service restoration using a fuzzy set approach", *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 8, No. 4, pp. 1950-1957, Oct. 1993.

- [175] D.M. Falcao, H.O. Henriques, "Load estimation in radial distribution systems using neural networks and fuzzy set techniques", in *Proc. 2001 IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, Vol. 2, pp. 1002-1006, Jul. 2001.
- [176] S.A. Villalba, C.A. Bel, "Hybrid demand model for load estimation and short term load forecasting in distribution electric systems", *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 15, No. 2, pp. 764-769, Apr. 2000.
- [177] Y.C. Lee, M. Etezadi-Amoli, "An improved modeling technique for distribution feeders with incomplete information", *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 8, No. 4, Oct. 1993.
- [178] Y. Peng, J.A. Reggia, "Plausibility of diagnostic hypothesis. The nature of simplicity", in *Proc. National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-86)*, pp. 140-145, Aug. 1986.
- [179] Y. Peng, J.A. Reggia, "A connectionist model for diagnostic problem solving", *IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics*, Vol. 19, No. 2, pp. 285-298, Mar./Apr. 1989.
- [180] W.E. Combs, J.A. Andrews, "Combinatorial rule explosion eliminated by a fuzzy rule configuration", *IEEE Trans. Fuzzy Systems*, Vol. 6, No. 1, pp. 1-11, Feb. 1998.
- [181] T.J. Ross, *Fuzzy Logic with Engineering Applications*, 2nd Ed., McGraw-Hill, Inc., USA, 2004.
- [182] G.J. Anders, *Probability Concepts in Electric Power Systems*, John Wiley & Sons, USA, 1990.
- [183] H. Wu, J.M. Mendel, "Uncertainty bounds and their use in the design of interval type-2 fuzzy logic systems", *IEEE Trans. Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 10, No. 5, pp. 622-639, Oct. 2002.

ANEXO A

A Aplicaciones de la teoría de conjuntos y sistemas de lógica fuzzy.

Este anexo está dividido en tres secciones. En la primera sección se hace una introducción de la teoría de conjuntos fuzzy tipo 2. En la segunda sección se explican los sistemas de lógica fuzzy tipo 2 (T2-FLS)³⁷. Finalmente, en la tercera sección se explica la modelación de incertidumbres en el marco de referencia de los T2-FLS y se presenta una metodología para la construcción de sus funciones de pertenencia y base de reglas. Se presenta un caso ejemplo en el que se analizan los resultados de dos encuestas realizadas a alumnos de postgrado de la Universidad Nacional de San Juan, Argentina.

A.1 Conjuntos fuzzy tipo 2.

Un conjunto crisp A en un universo de discurso X , puede ser descrito matemáticamente mediante la introducción de una función de pertenencia cero-uno para A (A.1), que identifica la condición o condiciones para las cuales los elementos $x \in A$:

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

Un conjunto fuzzy tipo 1 A es una generalización de un conjunto crisp. Es definido en un universo de discurso X y es caracterizado por una función de pertenencia $\mu_A(x)$ que toma valores en el intervalo $[0,1]$. La función de pertenencia provee una medida del grado de similitud de un elemento en X respecto a A . El conjunto fuzzy tipo 1 A puede ser descrito matemáticamente como un conjunto de pares ordenados de un elemento genérico $x \in X$ y el grado de su función de pertenencia, $\mu_A(x)$:

$$A = \{(x, \mu_A(x)) | x \in X\} \quad (\text{A.2})$$

Cuando X es continuo, A es comúnmente descrito mediante (A.3), donde el símbolo integral no denota integración, sino la colección de todos los puntos $x \in X$ con función de pertenencia asociada $\mu_A(x)$.

$$A = \int_{x \in X} \frac{\mu_A(x)}{x} \quad (\text{A.3})$$

Cuando X es discreto, A es comúnmente descrito mediante (A.4), donde el símbolo sumatoria no denota suma aritmética, sino la colección de todos los puntos $x \in X$ con función de pertenencia asociada $\mu_A(x)$, por lo tanto describe la operación teórica de unión. El símbolo de división en (A.3) y (A.4) asocia los elementos en X para los cuales $\mu_A(x) > 0$.

$$A = \sum_{x \in X} \frac{\mu_A(x)}{x} \quad (\text{A.4})$$

³⁷ Una descripción completa de los fundamentos matemáticos, metodologías de cálculo y aplicaciones de los conjuntos y sistemas de lógica fuzzy tipo 2 es presentada en [99].

Al analizar la transición de los conjuntos crisp a los conjuntos fuzzy tipo 1 se observa que cuando no es posible determinar el grado de pertenencia de un elemento en un conjunto, como 0 o 1, se utilizan conjuntos fuzzy tipo 1. Similarmente, cuando las circunstancias son tan inciertas (desde el punto de vista fuzzy) que se tienen problemas para determinar el grado de pertenencia como un número crisp en el intervalo $[0,1]$, se utilizan conjuntos fuzzy tipo 2, un concepto introducido por el Prof. Lofti Zadeh en 1975. Esto no significa que se necesitan condiciones extraordinariamente inciertas para utilizar conjuntos fuzzy tipo 2. Por ejemplo, cuando una medición es incierta se tiene problemas para determinar su valor exacto, por lo tanto en este caso tiene sentido utilizar conjuntos fuzzy tipo 1 en lugar de conjuntos crisp. Pero entonces, aún utilizando conjuntos fuzzy tipo 1, se especifica su función de pertenencia exactamente, lo cual parece ser contra intuitivo. Si no se puede determinar el valor exacto de una cantidad incierta, ¿cómo se puede determinar el valor exacto de su función de pertenencia?. Por supuesto, este criticismo también aplica a los conjuntos fuzzy tipo 2, porque a pesar que la función de pertenencia de un conjunto fuzzy tipo 2 también es fuzzy, es especificada exactamente, lo cual de nuevo parece ser contra intuitivo. Siguiendo este razonamiento, idealmente sería necesario utilizar conjuntos fuzzy tipo ∞ para representar completamente la incertidumbre. Por supuesto, esto no es realizable en la práctica, por lo tanto es necesario utilizar conjuntos fuzzy de tipo finito [102]. En este sentido en este trabajo se utilizan conjuntos fuzzy tipo 2.

A.1.1 Función de pertenencia secundaria (FPS) y huella de incertidumbre (FOU).

Un conjunto fuzzy tipo 2 $\tilde{A}$ es un conjunto cuya función de pertenencia $\mu_{\tilde{A}}(x)$ para cada valor de x es un conjunto fuzzy tipo 1 al que se denomina función de pertenencia secundaria (FPS). El conjunto fuzzy tipo 2 $\tilde{A}$ puede ser descrito mediante (A.5) y (A.6).

$$\tilde{A} = \int_{x \in X} \frac{\mu_{\tilde{A}}(x)}{x} \quad (\text{A.5})$$

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \int_{u \in J_x} \frac{f_x(u)}{u}, \quad J_x \subseteq [0,1] \quad (\text{A.6})$$

Aquí J_x es denominada *pertenencia primaria* y $f_x(u)$ *grado de pertenencia secundario*. En la Fig. A.1 se muestra una vista en dos dimensiones de un conjunto fuzzy tipo 2, a la zona sombreada se le denomina *huella de incertidumbre* (FOU), la FOU es la unión de todos los grados de pertenencia primarios J_x (A.7).

$$FOU(\tilde{A}) = \bigcup_{x \in X} J_x \quad (\text{A.7})$$

Aquí es necesario introducir las funciones de pertenencia superior e inferior, las cuales son dos funciones de pertenencia tipo 1 asociadas a los límites superior e inferior de la FOU de un conjunto fuzzy tipo 2. Estas funciones son descritas mediante (A.8)-(A.9).

$$\bar{\mu}_{\tilde{A}}(x) = \overline{FOU(\tilde{A})} = \bigcup_{x \in X} \bar{J}_x \quad \forall x \in X \quad (\text{A.8})$$

$$\underline{\mu}_{\tilde{A}}(x) = \underline{FOU(\tilde{A})} = \bigcup_{x \in X} \underline{J}_x \quad \forall x \in X \quad (\text{A.9})$$

Utilizando estas definiciones se puede expresar la FPS (A.6) alternativamente como:

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \int_{u \in [\underline{\mu}_{\tilde{A}}(x), \bar{\mu}_{\tilde{A}}(x)]} \frac{f_x(u)}{u}, \quad J_x \subseteq [0,1] \quad (\text{A.10})$$

En la Fig. A.2 se muestra la FPS del conjunto fuzzy tipo 2 de la Fig. A.1, para $x = x_I$.

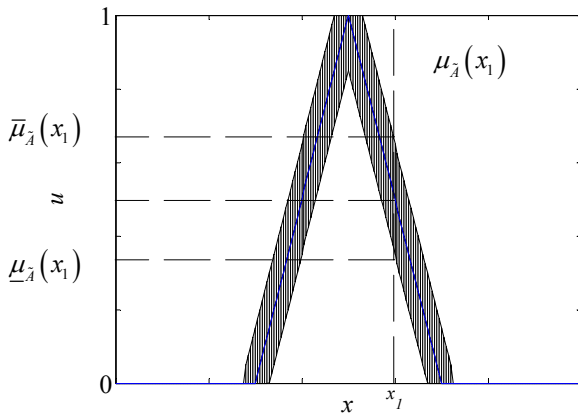


Fig. A.1 FOU de un conjunto fuzzy tipo 2.

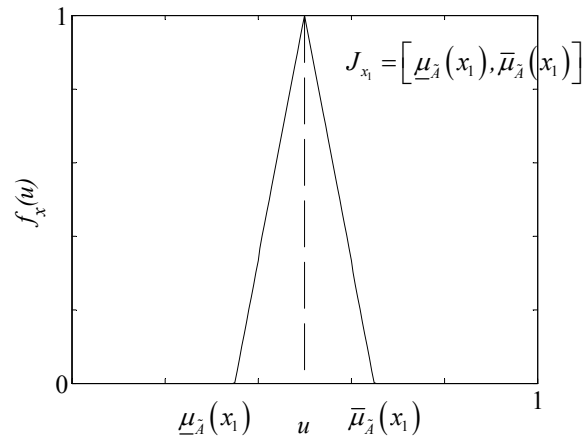


Fig. A.2 FPS para $x = x_I$.

La FPS pueden adoptar diferentes formas: triangular, gaussiana, de intervalo, etc. Al utilizar conjuntos fuzzy tipo 2 es necesario definir la forma y parámetros de la FPS para cada valor de x . La propuesta más conveniente desde el punto de vista del esfuerzo computacional y complejidad de los cálculos es la utilización de conjuntos fuzzy tipo 2 con FPS de intervalo, para los cuales:

$$f_x(u) = 1, \quad \forall u \in J_x \subseteq [0,1] \quad (\text{A.11})$$

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \int_{u \in J_x} \frac{1}{u}, \quad J_x \subseteq [0,1] \quad (\text{A.12})$$

De (A.11)-(A.12) se observa que la FPS de estos conjuntos para cada valor de x es un intervalo, estas funciones reflejan una incertidumbre uniforme en J_x para cada valor de x , i.e. ($f_x(u) = 1$). En la Fig. A.3 se muestra una vista en dos dimensiones de un conjunto fuzzy tipo 2 con FOU triangular y FPS de intervalo³⁸, la FPS para $x = x_I$ se muestra en la Fig. A.4.

³⁸ En adelante se utilizan los términos “conjunto fuzzy triangular tipo 2 de intervalo” o “conjunto fuzzy triangular tipo 2”.

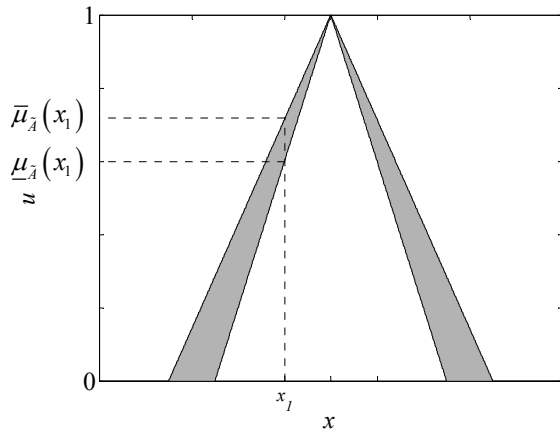
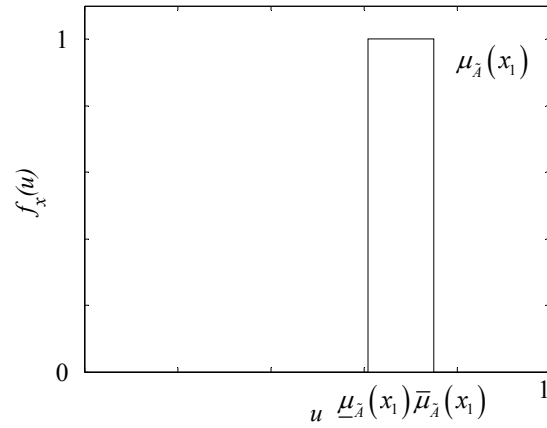
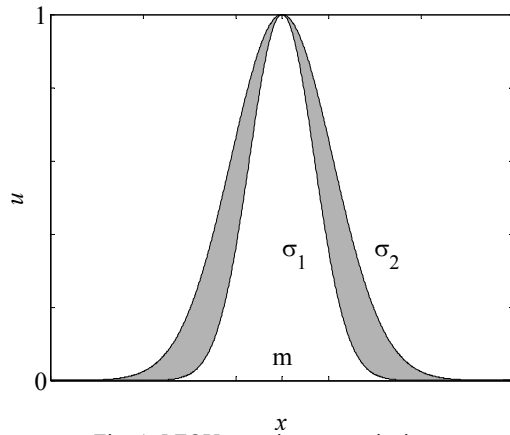


Fig. A.3 FOU triangular y FPS de intervalo.

Fig. A.4 FPS para $x = x_l$.

Otro conjunto fuzzy tipo 2 muy utilizado, es el mostrado en la Fig. A.5 el cual tiene FOU gaussiana con desviación estándar incierta ($\sigma = [\sigma_1, \sigma_2]$) y FPS de intervalo³⁹.

Fig. A.5 FOU gaussiana con σ incierta.

En este trabajo se utilizan T2-FLS en los que las variables lingüísticas de las entradas y base de reglas son modeladas utilizando los conjuntos fuzzy tipo 2 de la Fig. A.3 y Fig. A.5. Es importante observar que para definir las funciones de pertenencia de estos conjuntos solamente es necesario especificar los parámetros de su FOU, ya que $f_x(u) = 1, \forall J_x \subseteq [0,1]$. En la sección A.3 se presenta una metodología para calcular estos parámetros.

A.1.2 Join y meet de conjuntos fuzzy tipo 2 de intervalo.

Antes de continuar es necesario definir dos operaciones de conjuntos fuzzy tipo 2 muy importantes para el cálculo de T2-FLS, estas operaciones son conocidas por sus nombres en inglés, *join* y *meet* y son representadas mediante los símbolos $\sqcup$ y $\sqcap$ respectivamente. Sean dos conjuntos fuzzy tipo 2 $\tilde{A}$ y $\tilde{B}$, definidos mediante (A.13) y (A.14), donde u y w son variables utilizadas para diferenciar entre las diferentes FPS:

³⁹ En adelante se utilizan los términos “conjunto fuzzy gaussiano tipo 2 de intervalo con σ incierta” o “conjunto fuzzy gaussiano tipo 2”.

$$\tilde{A} = \int_{x \in X} \mu_{\tilde{A}}(x)/x = \int_{x \in X} \left[\int_{u \in J_x^u} \frac{f_x(u)}{u} \right] / x, \quad J_x^u \subseteq [0,1] \quad (\text{A.13})$$

$$\tilde{B} = \int_{x \in X} \mu_{\tilde{B}}(x)/x = \int_{x \in X} \left[\int_{w \in J_x^w} \frac{g_x(w)}{w} \right] / x, \quad J_x^w \subseteq [0,1] \quad (\text{A.14})$$

Las operaciones *join* y *meet* se definen mediante (A.15) y (A.16) [102], estas operaciones representan la unión e intersección de los conjuntos fuzzy tipo 2 $\tilde{A}$ y $\tilde{B}$, respectivamente⁴⁰.

$$\mu_{\tilde{A} \cup \tilde{B}}(x) = \mu_{\tilde{A}}(x) \sqcup \mu_{\tilde{B}}(x) = \int_{u \in J_x^u} \int_{w \in J_x^w} \frac{f_x(u) \star g_x(w)}{u \vee w}, \quad x \in X \quad (\text{A.15})$$

$$\mu_{\tilde{A} \cap \tilde{B}}(x) = \mu_{\tilde{A}}(x) \sqcap \mu_{\tilde{B}}(x) = \int_{u \in J_x^u} \int_{w \in J_x^w} \frac{f_x(u) \star g_x(w)}{u \wedge w}, \quad x \in X \quad (\text{A.16})$$

A.2 T2-FLS.

Los T2-FLS fueron propuestos por Karnik, Mendel y Liang en 1999 y 2000 [146], [147]. Por razones de espacio y simplicidad, en este anexo solamente se presenta una introducción de sus principales conceptos y ecuaciones matemáticas, para un análisis detallado se sugiere consultar [102], [146], [147]. Antes de explicar los T2-FLS es necesario hacer una breve descripción de los sistemas de lógica fuzzy tipo 1 tradicionales (T1-FLS), los cuales también son conocidos en la literatura como sistemas de inferencia fuzzy, sistemas expertos fuzzy y sistemas de control fuzzy [110], [111], [142]. En un T1-FLS las entradas y las variables lingüísticas de los antecedentes y consecuente de las reglas son modeladas mediante conjuntos fuzzy tipo 1. Los componentes de un T1-FLS se muestran en la Fig. A.6.

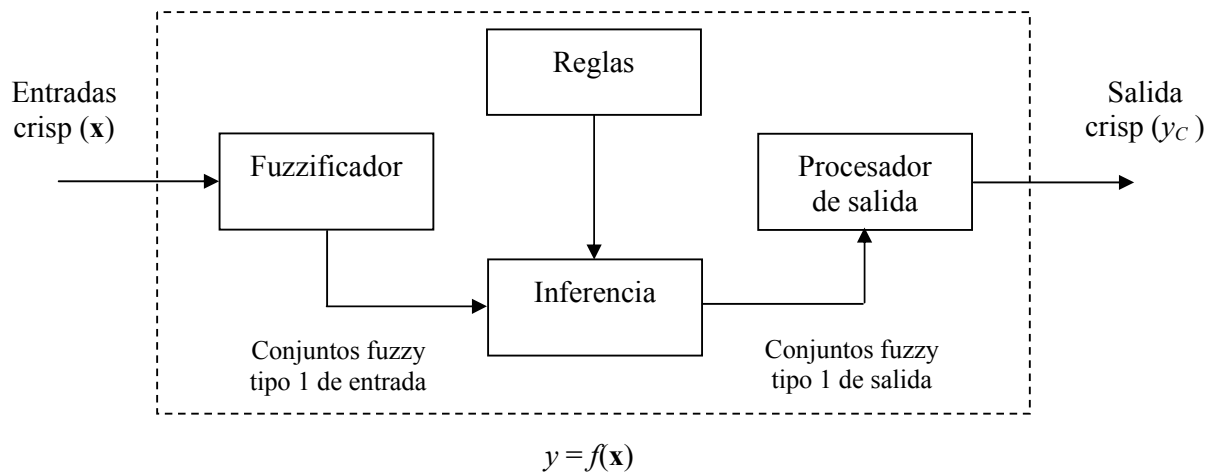


Fig. A.6 Componentes de un T1-FLS.

⁴⁰ Aquí el símbolo $\star$ representa una t-norma general (mínimo o producto), el símbolo $\vee$ representa la t-conorma máximo y el símbolo $\wedge$ representa la t-norma producto.

En los T2-FLS [102], [146] las entradas y las variables lingüísticas de los antecedentes y consecuente de las reglas son modeladas mediante conjuntos fuzzy tipo 2. Los componentes de un T2-FLS se muestran en la Fig. A.7. En este diagrama se observa que la principal diferencia respecto al T1-FLS es que el procesador de salida está compuesto por dos bloques, reductor de tipo y defuzzificador. Los cálculos implícitos en los T2-FLS son complejos e intensivos desde el punto de vista computacional. En este sentido, la propuesta más conveniente son los T2-FLS que utilizan conjuntos fuzzy tipo 2 de intervalo, a los cuales se les denomina T2-FLS de intervalo [102], [147]. En los T2-FLS de intervalo, la salida del reductor de tipo es un intervalo tipo 1 como el mostrado en la Fig. 4.9. A continuación se explican las funciones de los componentes del T2-FLS.

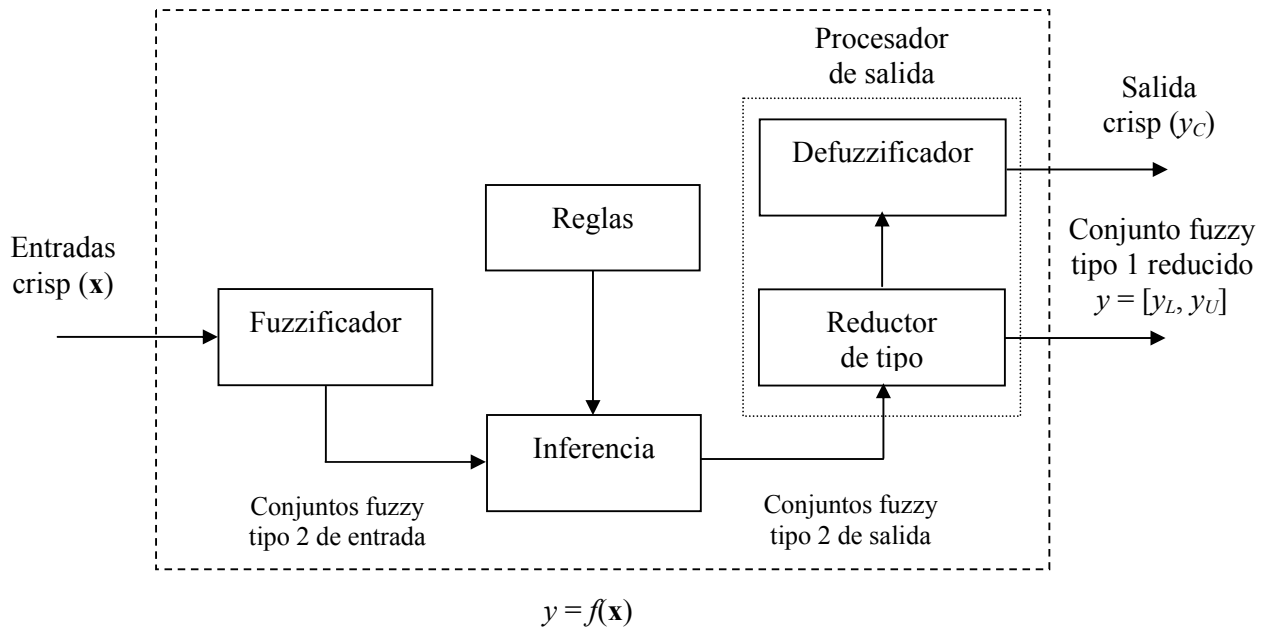


Fig. A.7 Componentes de un T2-FLS.

A.2.1 Reglas.

En un T1-FLS, generalmente se utilizan reglas SI-ENTONCES de la siguiente forma:

$$R^l: \text{SI } x_1 \text{ es } F_1 \text{ Y } x_2 \text{ es } F_2 \text{ Y... Y } x_p \text{ es } F_p \text{ ENTONCES } y \text{ es } G^l \quad l=1,...,M$$

Como se mencionó anteriormente la distinción entre los T1-FLS y los T2-FLS está asociada a la naturaleza de las funciones de pertenencia. En un T2-FLS la estructura de las reglas se mantiene, pero algunos o todos los conjuntos utilizados son conjuntos fuzzy tipo 2. Para un T2-FLS con p entradas $x_1 \in X_1, x_2 \in X_2, \dots, x_p \in X_p$, una salida y y M reglas, la l -ésima regla es:

$$R^l: \text{SI } x_1 \text{ es } \tilde{F}_1^l \text{ Y } x_2 \text{ es } \tilde{F}_2^l \text{ Y... Y } x_p \text{ es } \tilde{F}_p^l \text{ ENTONCES } y \text{ es } \tilde{G}^l \quad l=1,...,M$$

Donde $\tilde{F}_i^l$ es el conjunto fuzzy tipo 2 del i -ésimo antecedente de la l -ésima regla y $\tilde{G}^l$ es el conjunto fuzzy tipo 2 del consecuente de la l -ésima regla. Esta regla representa una relación fuzzy entre el espacio de entrada $X_1 \times X_2 \times \dots \times X_p$ y el espacio de salida Y del T2-FLS.

A.2.2 Motor de inferencia fuzzy.

En un T1-FLS el motor de inferencia combina reglas y obtiene un mapeo de los conjuntos fuzzy tipo 1 de entrada a los conjuntos fuzzy tipo 1 de salida. Los antecedentes múltiples en las reglas son combinados mediante una t-norma (intersección de conjuntos fuzzy tipo 1 para la cual generalmente se utiliza el mínimo o producto). Los grados de pertenencia de los conjuntos de entrada son combinados con los de los conjuntos de salida por medio de la composición *sup-★* (composición máximo-mínimo, máximo-producto, etc.). Las reglas múltiples son combinadas utilizando una t-conorma (operación de unión de conjuntos fuzzy tipo 1 para la cual generalmente se utiliza el máximo) o durante la defuzzificación mediante una suma ponderada. En los T2-FLS el proceso de inferencia es muy similar. El motor de inferencia combina las reglas y obtiene un mapeo de los conjuntos fuzzy tipo 2 de entrada a los conjuntos fuzzy tipo 2 de salida, para lo cual calcula uniones e intersecciones de conjuntos fuzzy tipo 2 y composiciones de relaciones fuzzy tipo 2. Para realizar este mapeo, la l -ésima regla es interpretada como una implicación fuzzy tipo 2 (A.17), cuya función de pertenencia es (A.18):

$$R^l : \tilde{F}_1^l \times \tilde{F}_2^l \times \dots \times \tilde{F}_p^l \rightarrow G^l = \tilde{A}^l \rightarrow \tilde{G}^l \quad l = 1, \dots, M \quad (\text{A.17})$$

$$\mu_{R^l}(\mathbf{x}, y) = \mu_{R^l}(x_1, x_2, \dots, x_p, y) = \mu_{\tilde{A}^l \rightarrow \tilde{G}^l}(\mathbf{x}, y) = \left[\bigcap_{i=1}^p \mu_{\tilde{F}_i^l}(x_i) \right] \bigcap \mu_{\tilde{G}^l}(y) \quad (\text{A.18})$$

La entrada p -dimensional a R^l está dada por el conjunto fuzzy tipo 2 $\tilde{A}_x$, cuya función de pertenencia es:

$$\mu_{\tilde{A}_x}(\mathbf{x}) = \bigcap_{i=1}^p \mu_{\tilde{X}_i}(x_i) \quad (\text{A.19})$$

Donde $\tilde{X}_i$ ($i = 1, 2, \dots, p$) es el conjunto fuzzy tipo 2 que describe a la i -ésima entrada. La l -ésima regla define un conjunto fuzzy tipo 2 $\tilde{B}^l = \tilde{A}_x \circ R^l$ cuya función de pertenencia es⁴¹:

$$\mu_{\tilde{B}^l}(y) = \mu_{\tilde{A}_x \circ R^l}(y) = \bigcup_{\mathbf{x} \in X} \left[\mu_{\tilde{A}_x}(\mathbf{x}) \bigcap \mu_{R^l}(\mathbf{x}, y) \right], \quad y \in Y, \quad l = 1, \dots, M \quad (\text{A.20})$$

Esta ecuación puede ser simplificada para obtener (A.21), la cual incluye las funciones de pertenencia de las entradas y de los antecedentes y consecuente de la l -ésima regla:

$$\mu_{\tilde{B}^l}(y) = \mu_{\tilde{G}^l}(y) \bigcap \left\{ \left[\bigcup_{x_1 \in X_1} \mu_{\tilde{X}_1}(x_1) \bigcap \mu_{\tilde{F}_1^l}(x_1) \right] \bigcap \dots \bigcap \left[\bigcup_{x_p \in X_p} \mu_{\tilde{X}_p}(x_p) \bigcap \mu_{\tilde{F}_p^l}(x_p) \right] \right\} \quad (\text{A.21})$$

⁴¹ El símbolo $\circ$ representa a la composición *sup-★* extendida [99].

La ecuación (A.21) representa la relación entrada-salida del motor de inferencia para la l -ésima regla.

A.2.3 Fuzzificador.

Las entradas y salidas del T2-FLS son números crisp, sin embargo el bloque fuzzificador puede variar para considerar las incertidumbres asociadas a estos datos de entrada. Los tipos de fuzzificación utilizados en este trabajo son:

- Fuzzificación singleton tipo 2: no considera incertidumbres en los datos de entrada, la salida del bloque fuzzificador es un singleton tipo 2 (Fig. A.8.1).
- Fuzzificación no singleton tipo 1: la incertidumbre asociada a los datos de entrada es modelada mediante un conjunto fuzzy tipo 1 (o un intervalo tipo 1), la salida del bloque fuzzificador es un conjunto fuzzy tipo 1 (Fig. A.8.2).
- Fuzzificación no singleton tipo 2: la incertidumbre asociada a los datos de entrada es modelada mediante un conjunto fuzzy tipo 2, la salida del bloque fuzzificador es un conjunto fuzzy tipo 2 (Fig. A.8.3).

El efecto del tipo de fuzzificación es modificar la expresión entre llaves de la ecuación (A.21), a esta expresión se le denomina conjunto de disparo (A.22).

$$F^l(\mathbf{x}') = \left[\underline{f}^l(\mathbf{x}'), \overline{f}^l(\mathbf{x}') \right] \equiv \left[\underline{f}^l, \overline{f}^l \right] \quad (\text{A.22})$$

Donde (A.23) es el vector de entradas crisp del T2-FLS:

$$\mathbf{x}' = (x'_1, x'_2, \dots, x'_p) \quad (\text{A.23})$$

A continuación se explica como calcular el nivel de disparo para cada tipo de fuzzificación.

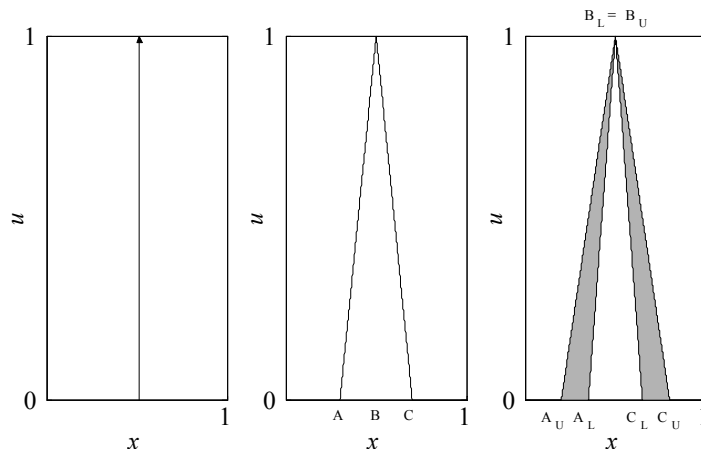


Fig. A.8.1
Singleton tipo 2

Fig. A.8.2
Número fuzzy tipo 1

Fig. A.8.3
Número fuzzy tipo 2

A.2.3.1 Fuzzificación Singleton Tipo 2.

Consiste en la fuzzificación de x_i mediante singletons tipo 2, para este tipo de fuzzificación $x_i \neq 0$ cuando $x_i = x'_i$. El conjunto de disparo para la l -ésima regla es:

$$\underline{f}^l(\mathbf{x}') = \underline{\mu}_{\tilde{F}_1^l}(x'_1) \star \underline{\mu}_{\tilde{F}_2^l}(x'_2) \star \cdots \star \underline{\mu}_{\tilde{F}_p^l}(x'_p) \quad (\text{A.24})$$

$$\overline{f}^l(\mathbf{x}') = \overline{\mu}_{\tilde{F}_1^l}(x'_1) \star \overline{\mu}_{\tilde{F}_2^l}(x'_2) \star \cdots \star \overline{\mu}_{\tilde{F}_p^l}(x'_p) \quad (\text{A.25})$$

En (A.24) y (A.25) se puede utilizar independientemente el producto o el mínimo como t-norma. En este trabajo se utiliza el producto, como se sugiere en [102].

A.2.3.2 Fuzzificación No Singleton Tipo 1.

Consiste en la fuzzificación de x_i mediante números fuzzy tipo 1. El conjunto de disparo para la l -ésima regla es⁴²:

$$\underline{f}^l(\mathbf{x}') = \prod_{k=1}^p \underline{\mu}_{\tilde{Q}_k^l}(x_{k,max}^l) \quad (\text{A.26})$$

$$\overline{f}^l(\mathbf{x}') = \prod_{k=1}^p \overline{\mu}_{\tilde{Q}_k^l}(x_{k,max}^{-l}) \quad (\text{A.27})$$

Donde:

$$\underline{\mu}_{\tilde{Q}_k^l}(x_k) = \int_{x_k \in X_k} \frac{\mu_{X_k}(x_k) \star \underline{\mu}_{\tilde{F}_k^l}(x_k)}{x_k} \quad (\text{A.28})$$

$$\overline{\mu}_{\tilde{Q}_k^l}(x_k) = \int_{x_k \in X_k} \frac{\mu_{X_k}(x_k) \star \overline{\mu}_{\tilde{F}_k^l}(x_k)}{x_k} \quad (\text{A.29})$$

Aquí $\underline{x}_{k,max}^l$ y $\overline{x}_{k,max}^{-l}$ son los valores máximos de $\underline{\mu}_{\tilde{Q}_k^l}(x_k)$ y $\overline{\mu}_{\tilde{Q}_k^l}(x_k)$, respectivamente.

A.2.3.3 Fuzzificación no singleton tipo 2.

Consiste en la fuzzificación de las variables de entrada mediante números fuzzy tipo 2. El conjunto de disparo para la l -ésima regla es:

$$\underline{f}^l(\mathbf{x}') = \prod_{k=1}^p \underline{\mu}_{\tilde{Q}_k^l}(x_{k,max}^l) \quad (\text{A.30})$$

⁴² Se utiliza el símbolo T para representar el cálculo de la t-norma para p FPS.

$$\overline{f}^l(\mathbf{x}') = \prod_{k=1}^p \overline{\mu}_{\tilde{Q}_k}^l(\overline{x}_{k,max}^l) \quad (\text{A.31})$$

Donde:

$$\underline{\mu}_{\tilde{Q}_k}^l(x_k) = \int_{x_k \in X_k} \frac{\underline{\mu}_{X_k}(x_k) \star \underline{\mu}_{\tilde{F}_k}^l(x_k)}{x_k} \quad (\text{A.32})$$

$$\overline{\mu}_{\tilde{Q}_k}^l(x_k) = \int_{x_k \in X_k} \frac{\overline{\mu}_{X_k}(x_k) \star \overline{\mu}_{\tilde{F}_k}^l(x_k)}{x_k} \quad (\text{A.33})$$

$\underline{x}_{k,max}^l$ y $\overline{x}_{k,max}^l$ son los valores máximos de $\underline{\mu}_{\tilde{Q}_k}^l(x_k)$ y $\overline{\mu}_{\tilde{Q}_k}^l(x_k)$, respectivamente.

A.2.4 Reductor de tipo

La reducción de tipo fue propuesta por Karnik y Mendel [149], esta operación es llamada así porque toma los conjuntos fuzzy tipo 2 de salida del motor de inferencia y obtiene conjuntos fuzzy tipo 1 a los que se denomina “conjunto fuzzy tipo 1 reducido”. En T2-FLS de intervalo, la salida del reductor de tipo es un intervalo tipo 1. De la misma forma que en los T1-FLS existen varios métodos de defuzzificación, en los T2-FLS existen varios métodos de reducción de tipo (centroide, centro de sumas, altura, altura modificada, centro de conjuntos, etc.). En este trabajo se utiliza el centro de conjuntos o COS por sus siglas en inglés (Center Of Sets), debido a su eficiencia computacional. Este reductor de tipo ha sido utilizado en otras aplicaciones de T2-FLS [102], [144] y [148]. Para calcular el COS es necesario calcular previamente los centroides de los conjuntos fuzzy tipo 2 que modelan el consecuente de cada regla. El centroide del i -ésimo consecuente es un intervalo tipo 1 (A.34), donde y_i representa la discretización del dominio de la variable de salida (y) y θ_i la discretización de la pertenencia primaria (J_{y_i}) de cada y_i . El procedimiento de cálculo de (A.34) es descrito detalladamente en [102], [148] y [150].

$$C_{\tilde{G}^i} = \int_{\theta_1 \in J_{y_1}} \dots \int_{\theta_N \in J_{y_N}} 1 / \frac{\sum_{i=1}^N y_i \theta_i}{\sum_{i=1}^N \theta_i} = [y_l^i, y_r^i] \quad (\text{A.34})$$

El COS se obtiene calculando los promedios ponderados de los conjuntos de disparo y los centroides del consecuente de las reglas correspondientes (A.35)-(A.37).

$$Y_{COS}(\mathbf{x}) = [y_l, y_r] = \int_{y^1 \in [y_l^1, y_r^1]} \dots \int_{y^M \in [y_l^M, y_r^M]} \int_{f^1 \in [\underline{f}^1, \overline{f}^1]} \dots \int_{f^M \in [\underline{f}^M, \overline{f}^M]} 1 / \frac{\sum_{i=1}^M f^i y^i}{\sum_{i=1}^M f^i} \quad (\text{A.35})$$

$$y_l = \frac{\sum_{i=1}^M f_l^i y_l^i}{\sum_{i=1}^M f_l^i} \quad (\text{A.36})$$

$$y_r = \frac{\sum_{i=1}^M f_r^i y_r^i}{\sum_{i=1}^M f_r^i} \quad (\text{A.37})$$

Las ecuaciones (A.35)-(A.37) son calculadas utilizando los procedimientos iterativos descritos en [102], [148] y [149].

A.2.5 Defuzzificación.

La salida crisp del T2-FLS es calculada por medio de (A.38), esta salida es resultado de la defuzzificación del conjunto fuzzy tipo 1 reducido, como este conjunto es un intervalo tipo 1 se utiliza su valor promedio como salida defuzzificada [102]:

$$y(\mathbf{x}) = \frac{y_l + y_r}{2} \quad (\text{A.38})$$

A.3 Modelación de incertidumbres en T2-FLS.

Un T2-FLS modela eficientemente las siguientes incertidumbres:

- Incertidumbres acerca del valor de las entradas que activan el T2-FLS: para ello pueden utilizar los tres tipos de fuzzificación explicados en la sección A.2.3. La naturaleza de esta incertidumbre concuerda con la definición de *no-especificidad*, i.e., incertidumbre resultado de deficiencia en la información⁴³.
- Incertidumbres acerca del significado de las palabras utilizadas en la base de reglas: las palabras significan diferentes cosas para diferentes personas [102], esta incertidumbre es considerada modelando las palabras de la base de reglas mediante conjuntos fuzzy tipo 2. La naturaleza de esta incertidumbre concuerda con la definición de *vaguedad*, i.e., incertidumbre resultado de la imprecisión lingüística.
- Incertidumbres acerca del consecuente utilizado en cada regla: el consecuente de cada regla es seleccionado entre un conjunto de alternativas, basándose en el conocimiento de los expertos. Sin embargo, pueden existir diferencias de opinión entre los expertos, i.e., cada experto puede seleccionar diferentes alternativas. Esta incertidumbre es considerada mediante el cálculo de un centroide promedio para

⁴³ El término *imprecisión* es utilizado para describir dos tipos de incertidumbres, *no-especificidad* y *vaguedad*. La *no-especificidad* está asociada a valores numéricos imprecisos, esta es la incertidumbre presente cuando se utilizan números como entradas para el T2-FLS. La *vaguedad* está asociada al significado de las palabras, esta es la incertidumbre presente cuando se utilizan palabras o expresiones lingüísticas como entradas para el T2-FLS.

cada consecuente, el cual es obtenido mediante un histograma de posibilidades. La naturaleza de esta incertidumbre concuerda con la definición de *conflicto*, i.e., conflicto entre varios conjuntos de alternativas.

En esta sección se presentan metodologías para la modelación de las incertidumbres acerca del significado de las palabras (construcción de funciones de pertenencia de conjuntos fuzzy tipo 2) y del consecuente utilizado en cada regla (construcción de base de reglas y cálculo del centroide promedio).

A.3.1 Construcción de funciones de pertenencia de conjuntos fuzzy tipo 2.

Como se explicó en la sección A.1, para definir la función de pertenencia de un conjunto fuzzy tipo 2 de intervalo solamente es necesario especificar los parámetros de su FOU. En este trabajo se sugiere utilizar el método propuesto en [102] para calcular estos parámetros. Este método consiste en la extracción del conocimiento (*knowledge mining*) de un grupo de n_e expertos. Este proceso se realiza a través de encuestas en las que se le pide a cada experto ubicar un grupo de términos lingüísticos preseleccionados (e.g., *Grande*, *Pequeño*, etc.), dentro de un intervalo numérico predefinido, e.g., [0,10]. Para cada término lingüístico se obtienen n valores iniciales y finales y sus respectivas medias (m_i , m_f) y desviaciones estándar (σ_i , σ_f). Estos parámetros representan la incertidumbre asociada al significado de los términos lingüísticos y son utilizados para construir las FOU correspondientes. Para explicar el procedimiento, se utilizan los resultados de una encuesta realizada a 10 estudiantes de Doctorado en Ingeniería de Sistemas de Control, del Instituto de Automática de la Universidad Nacional de San Juan, Argentina.

Encuesta:

Abajo hay un número de términos que están asociados a un intervalo ubicado en algún punto entre 0 y 10. Para cada término, por favor dígame donde debería iniciar y finalizar este intervalo. (En otras palabras cuanto de la distancia de 0 a 10 debería ser cubierta por este intervalo). Por ejemplo, el intervalo correspondiente a *Malo* podría iniciar en 2 y finalizar en 4. Son importantes las siguientes observaciones:

1. No todos los intervalos son del mismo tamaño.
2. Los intervalos pueden traslaparse (un intervalo puede incluir parte de otro intervalo).
3. Se pueden utilizar números enteros, números decimales o combinaciones de ambos.

Tabla A.1 Tabla utilizada en encuesta para asignar intervalos numéricos a términos lingüísticos.

Término	Inicio	Fin
Muy Grande		
Insignificante		
Mediano		
Pequeño		
Excesivo		
Muy Pequeño		
Grande		
Medio Pequeño		
Medio Grande		

En la Tabla A.2 y Fig. A.9 se muestran los resultados de la encuesta, los términos han sido ordenados en orden ascendente.

Tabla A.2 Resultados de la encuesta. Promedio y desviación estándar de puntos iniciales y finales de los intervalos correspondientes a cada término lingüístico.

Término	m_i	m_f	σ_i	σ_f
Insignificante	0.000	0.685	0.000	0.633
Muy Pequeño	0.710	2.050	0.621	0.599
Pequeño	1.950	3.400	0.685	0.738
Medio Pequeño	3.000	4.370	0.624	0.747
Mediano	4.150	6.010	0.580	0.538
Medio Grande	5.880	7.090	0.745	0.685
Grande	6.870	8.210	0.838	0.887
Muy Grande	8.150	9.300	0.580	0.632
Excesivo	9.385	10.000	0.686	0.000

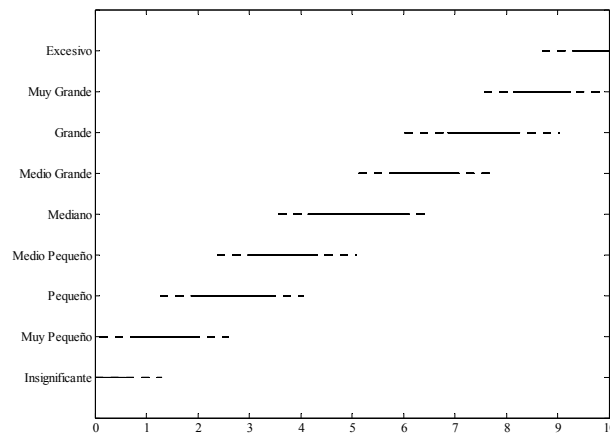


Fig. A.9 Intervalos y bandas de incertidumbre asociados a los términos lingüísticos de la Tabla A.2.

Los extremos de las líneas sólidas de la Fig. A.9 son los valores de m_i y m_f de cada término lingüístico. Los extremos de las líneas punteadas son los valores correspondientes a $m_i - \sigma_i$ y $m_f + \sigma_f$, estos intervalos representan la incertidumbre asociada al significado de cada término lingüístico. Utilizando los valores de m_i , σ_i , m_f y σ_f y (A.39)-(A.42) se pueden calcular los parámetros (A_U , A_L , B_U , B_L , C_U y C_L) de la FOU de la Fig. A.8.3. La variable ρ de estas ecuaciones representa la fracción de incertidumbre de los valores inicial y final del intervalo asociado a cada término lingüístico ($0 \leq \rho \leq 1$). La selección del valor “óptimo” de ρ es un tema actualmente en investigación [113], [114], en la literatura se sugiere $\rho = 0.5$ [102], [144].

$$A_U = m_i - (1 + \rho)\sigma_i, \quad B_U = \frac{m_i + m_f}{2}, \quad C_U = m_f + (1 + \rho)\sigma_f \quad (\text{A.39})$$

$$A_U = m_i - (1 - \rho)\sigma_i, \quad B_L = \frac{m_i + m_f}{2}, \quad C_L = m_f + (1 - \rho)\sigma_f \quad (\text{A.40})$$

$$A_U = m_i - (1 + \rho)\sigma_i, \quad B_U = A_u, \quad C_U = m_f + (1 + \rho)\sigma_f \quad (\text{A.41})$$

$$A_L = m_i - (1 - \rho)\sigma_i, \quad B_L = A_l, \quad C_L = m_f + (1 - \rho)\sigma_f \quad (\text{A.42})$$

Utilizando (A.39)-(A.42), $\rho = 0.5$ y los datos de la Tabla A.2, se obtienen las FOU de la Fig. A.10. Los parámetros de las FOU de los conjuntos fuzzy tipo 2 *Muy Pequeño*, *Pequeño*, *Medio Pequeño*, *Mediano*, *Medio Grande*, *Grande* y *Muy Grande* son calculados mediante A.27, A.28 y los de *Insignificante* y *Excesivo* mediante A.29, A.30.

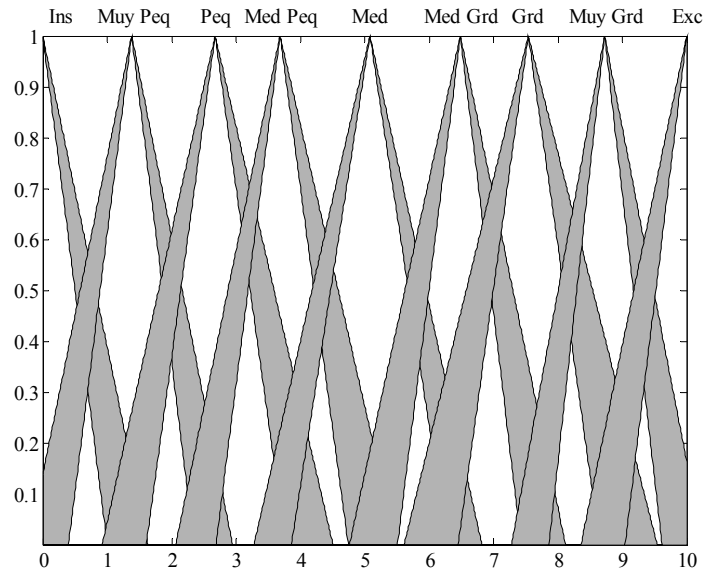


Fig. A.10 FOU de los conjuntos fuzzy triangulares tipo 2 que modelan los términos lingüísticos de la Tabla A.2.

La metodología presentada en esta sección tiene la ventaja de ser muy intuitiva y directa, sin embargo tiene la desventaja de necesitar de un grupo de expertos para aplicarla. En caso que no se cuente con este grupo, es factible utilizar el criterio de solamente un experto para seleccionar los parámetros de las FOU. Si bien en esta situación tradicionalmente se han utilizado conjuntos fuzzy tipo 1 para modelar los términos lingüísticos, es evidente que para un experto también existe incertidumbre respecto a su significado, esta *intra-incertidumbre* debe ser modelada mediante conjuntos fuzzy tipo 2 [151]. El T2-FLS resultante será más robusto y representará de manera más fiel las incertidumbres presentes en el diseño, que su alternativa tipo 1.

Los parámetros de las FOU utilizadas en este trabajo han sido seleccionados basándose en el criterio del autor, en los resultados de la Tabla A.2 y en el procedimiento de categorización prototipo propuesto en [110]. Al definir las funciones de pertenencia se ha escogido el intervalo $[0,1]$ en lugar de $[0,10]$ para que todos los datos de entrada tengan el mismo dominio, esto facilita la relación y comparación de los índices en las bases de reglas y la selección de los consecuentes. Es importante mencionar que escoger la función de pertenencia de un conjunto fuzzy tipo 2 para modelar incertidumbres lingüísticas, es análogo a escoger la función de densidad de probabilidad para modelar incertidumbres aleatorias. No existe una única opción para la función de pertenencia de un conjunto fuzzy tipo 2, de la misma forma que no existe una única opción para la función de pertenencia de un conjunto fuzzy tipo 1 [151]. Sin embargo, los resultados del T2-FLS deben ser independientes del tipo de función de pertenencia que se utilice. Como se muestra en la sección 5.6.6 los T2-FLS propuestos en este trabajo cumplen con este requisito, los resultados obtenidos utilizando conjuntos fuzzy tipo 2 triangulares y gaussianos son muy similares.

A.3.2 Construcción de base de reglas de T2-FLS y cálculo del centroide promedio.

Las reglas utilizadas por el T2-FLS tienen una estructura SI-ENTONCES, cada regla está compuesta por p antecedentes y q consecuentes, donde p es el número de variables de entrada y q el número de variables de salida. En los T2-FLS propuestos en este trabajo $p = 3$ y $q = 1$. Cada antecedente y consecuente es descrito mediante términos lingüísticos (e.g., *Grande*, *Pequeño*, etc.). Las reglas son resultado de las combinaciones de los términos lingüísticos de los antecedentes, el número total de reglas depende de la cantidad de términos lingüísticos y combinaciones consideradas factibles. El consecuente de cada regla es el término lingüístico que mejor describe el valor de la variable de salida correspondiente. En la Fig. A.11 se muestra la representación gráfica de dos de las 27 reglas del T2-FLS utilizado para calcular I_i^Q , cada término lingüístico es representado por un conjunto fuzzy gaussiano tipo 2 y cada entrada por un singleton tipo 2 (número exacto). Los consecuentes de cada regla han sido seleccionados de acuerdo al criterio de un experto y representan su opinión sobre el valor de I_i^Q para la combinación de valores de W_i , F_i^O y T_i^M correspondiente.

Como la selección del consecuente de cada regla depende del criterio del experto, diferentes expertos pueden seleccionar diferentes consecuentes para una misma regla. Para manejar este tipo de incertidumbre se sugiere utilizar el método propuesto en [102], [144] el cual consiste en la extracción del conocimiento de un grupo de n_e expertos. Este proceso se realiza a través de encuestas en las que se pide a cada experto, seleccionar un consecuente para cada regla, como resultado se obtiene un histograma de respuestas que es utilizado para seleccionar el consecuente que representa el consenso de los expertos. Como ejemplo de este procedimiento, se utilizan los resultados de una encuesta realizada a un grupo de 10 estudiantes de Doctorado en Ingeniería Eléctrica del Instituto de Energía Eléctrica de la Universidad Nacional de San Juan, Argentina.

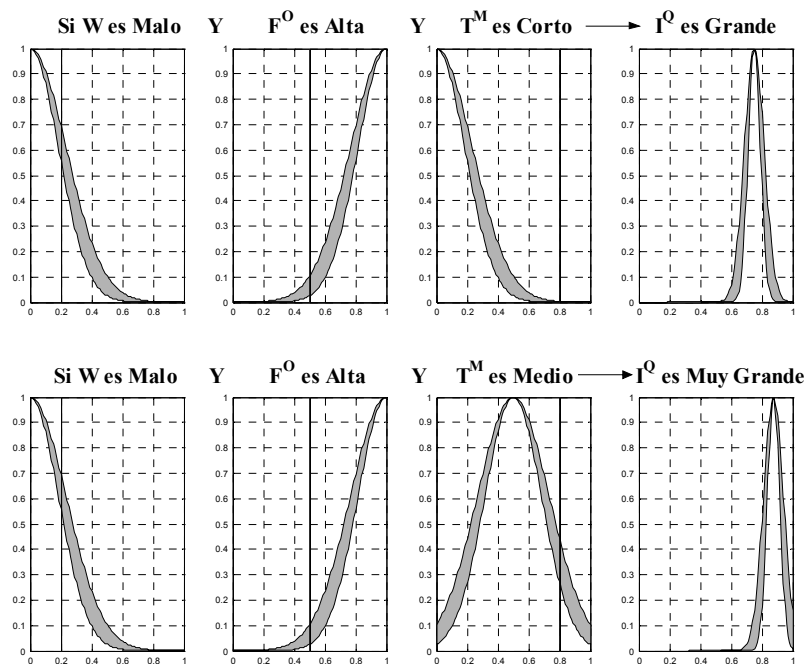


Fig. A.11 Representación gráfica de las reglas No.10 y No.11 del T2-FLS utilizado para calcular I_i^Q (Fig. 4.8) los términos lingüísticos son representados por conjuntos fuzzy gaussianos tipo 2 y las entradas por singletons tipo 2.

Encuesta:

En la Fig. A.12 se muestra un distribuidor de media tensión típico, donde d_i representa a un dispositivo de protección genérico y m_j a su correspondiente zona protegida. Se asume una correcta y efectiva coordinación de protecciones, de tal forma que una falla en la zona m_j causa solamente la operación del dispositivo d_i .

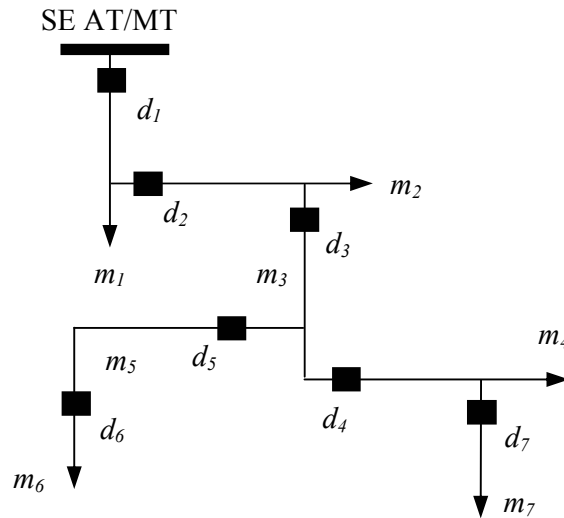


Fig. A.12 Distribuidor de media tensión típico.

Para describir la relación entre las características del distribuidor y la posibilidad de operación de cada dispositivo de protección se seleccionan cuatro variables: W_i , F_i^O , T_i^M e I_i^O . Las cuales se describen a continuación:

1. W_i : Representa el estado del clima en la zona m_j , esta variable es descrita mediante tres términos lingüísticos:
 - Malo
 - Regular
 - Bueno
2. F_i^O : Representa la frecuencia histórica de operación de d_i causada por la ocurrencia de fallas en la zona m_j . Esta variable es descrita mediante tres términos lingüísticos:
 - Baja
 - Media
 - Alta
3. T_i^M : Representa el tiempo transcurrido desde la última ocasión en que se efectuaron labores de mantenimiento en la zona m_j . Esta variable es descrita mediante tres términos lingüísticos:
 - Corto
 - Medio
 - Largo

4. I_i^Q : Es un índice que representa que tan posible es que ocurra una falla en la zona m_j y cause la operación de d_i . Mientras más grande es I_i^Q es más posible que una falla ocurra en la zona m_j y cause la operación de d_i . La variable I_i^Q es descrita mediante nueve términos lingüísticos:

- Insignificante
- Muy pequeño
- Pequeño
- Medio pequeño
- Mediano
- Medio grande
- Grande
- Muy Grande
- Excesivo

La relación entre las variables W_i , F_i^O , T_i^M e I_i^Q es descrita mediante las 27 reglas SI-ENTONCES que se presentan en la Tabla A.3. Los antecedentes de cada regla son los términos lingüísticos utilizados para describir W_i , F_i^O , T_i^M y su consecuente es seleccionado entre los términos lingüísticos utilizados para describir I_i^Q . La estructura de una regla ejemplo es la siguiente:

SI W_i es “Malo” Y F_i^O es “Alta” y T_i^M es “Corto” ENTONCES I_i^Q es “Grande”.

Esta regla representa la siguiente inferencia lógica: Si el estado del clima en la zona m_j es “Malo” y la frecuencia histórica de operación del dispositivo d_i es “Alta” y el tiempo transcurrido desde el último mantenimiento de la zona m_j es “Corto” entonces la posibilidad que una falla ocurra en la zona m_j y cause la operación de d_i es “Grande”.

De acuerdo a su criterio y para cada una de las reglas de la Tabla A.3, seleccione el consecuente que mejor se ajuste a los antecedentes propuestos. El consecuente debe ser seleccionado entre los términos lingüísticos utilizados para describir I_i^Q .

Tabla A.3 Tabla utilizada en encuesta para seleccionar los consecuentes de la base de reglas del T2-FLS utilizado para calcular I_i^Q .

Regla No.	Antecedentes			Consecuente
	W_i	F_i^O	T_i^M	I_i^Q
1	Regular	Alta	Largo	
2	Malo	Baja	Corto	
3	Bueno	Alta	Largo	
4	Malo	Media	Medio	
5	Regular	Media	Corto	
6	Bueno	Media	Corto	
7	Regular	Media	Largo	
8	Malo	Baja	Medio	
9	Bueno	Alta	Corto	
10	Regular	Baja	Largo	
11	Bueno	Baja	Medio	
12	Regular	Baja	Corto	
13	Malo	Baja	Largo	
14	Bueno	Media	Largo	
15	Regular	Media	Medio	
16	Bueno	Baja	Corto	
17	Malo	Alta	Medio	
18	Regular	Baja	Medio	
19	Bueno	Alta	Medio	
20	Regular	Alta	Medio	
21	Malo	Media	Corto	
22	Bueno	Baja	Largo	
23	Malo	Media	Largo	
24	Regular	Alta	Corto	
25	Malo	Alta	Corto	
26	Bueno	Media	Medio	
27	Malo	Alta	Largo	

En la Tabla A.4 se muestra el histograma de resultados de la encuesta, se muestra el número de expertos que seleccionaron cada opción (w_i^l) y el consecuente que representa el consenso de los expertos (C_{avg}^l), el cual es calculado por medio de (A.43), donde $c_{\tilde{G}_i}$ es el centroide del i -ésimo consecuente. El centroide es un intervalo tipo 1 que representa al centro de área o centro de gravedad del conjunto fuzzy tipo 2 correspondiente al i -ésimo término lingüístico y es calculado mediante el procedimiento presentado en [102], [150].

$$C_{avg}^l = \frac{\sum_{i=1}^M w_i^l c_{\tilde{G}_i}}{\sum_{i=1}^M w_i^l} \quad (A.43)$$

La ventaja de este procedimiento es notable, en un T2-FLS construido basándose en el criterio de un experto, la salida final se calcula utilizando solamente c_{G_i} , en cambio en un T2-FLS construido basándose en el consenso de un grupo de expertos, la salida final se calcula utilizando C_{avg}^l , de esta manera se considera la incertidumbre asociada a las diferentes opiniones de los expertos. En caso de ser necesario, también es posible asignar diferentes pesos a las respuestas de los expertos, a fin de considerar su grado de experiencia, de esta manera las opiniones de las personas más experimentadas influirán más en la selección del consecuente. Una alternativa interesante se puede implementar para el caso en que solamente se cuente con un experto, en lugar de escoger solamente un consecuente para cada regla (c_{G_i}), el experto puede asignar los valores de w_i^l para varios consecuentes “vecinos” y posteriormente calcular el consecuente equivalente (C_{avg}^l) mediante A.43. Este procedimiento es similar a la asignación de los consecuentes de los T2-TSK-FLS⁴⁴ de primer orden, en los cuales el consecuente de cada regla es un conjunto fuzzy tipo 1 [102], [152].

Tabla A.4 Resultados de encuesta. Se indica el total de expertos que seleccionó cada consecuente y el centroide promedio de cada regla.

Regla No.	Antecedentes			Consecuente									
	W_i	F_i^O	T_i^M	I_i^p									
				Ins	Muy Peq	Peq	Med Peq	Med	Med Grd	Grd	Muy Grd	Exc	C_{avg}^l
1	Malo	Baja	Corto	0	0	3	3	3	1	0	0	0	[0.380, 0.420]
2	Malo	Baja	Medio	0	0	2	2	3	2	0	1	0	[0.467, 0.507]
3	Malo	Baja	Largo	0	0	0	3	1	2	3	1	0	[0.580, 0.619]
4	Malo	Media	Corto	0	0	0	1	5	3	1	0	0	[0.530, 0.570]
5	Malo	Media	Medio	0	0	0	1	5	3	1	0	0	[0.530, 0.570]
6	Malo	Media	Largo	0	0	0	0	2	1	6	1	0	[0.680, 0.719]
7	Malo	Alta	Corto	0	0	0	0	1	1	3	5	0	[0.755, 0.793]
8	Malo	Alta	Medio	0	0	0	0	0	0	2	7	1	[0.839, 0.874]
9	Malo	Alta	Largo	0	0	0	0	0	0	0	2	8	[0.929, 0.953]
10	Regular	Baja	Corto	1	4	4	1	0	0	0	0	0	[0.174, 0.211]
11	Regular	Baja	Medio	0	0	3	4	2	1	0	0	0	[0.367, 0.407]
12	Regular	Baja	Largo	0	0	2	2	3	2	1	0	0	[0.455, 0.495]
13	Regular	Media	Corto	0	0	3	4	2	1	0	0	0	[0.367, 0.407]
14	Regular	Media	Medio	0	0	1	3	6	0	0	0	0	[0.417, 0.457]
15	Regular	Media	Largo	0	0	1	1	2	3	3	0	0	[0.555, 0.595]
16	Regular	Alta	Corto	0	0	0	1	2	3	4	0	0	[0.605, 0.645]
17	Regular	Alta	Medio	0	0	1	0	1	3	4	1	0	[0.630, 0.669]
18	Regular	Alta	Largo	0	0	0	0	1	0	4	5	0	[0.767, 0.805]
19	Bueno	Baja	Corto	6	3	1	0	0	0	0	0	0	[0.075, 0.102]
20	Bueno	Baja	Medio	2	3	4	0	1	0	0	0	0	[0.179, 0.214]
21	Bueno	Baja	Largo	0	2	3	4	1	0	0	0	0	[0.281, 0.320]
22	Bueno	Media	Corto	0	6	2	2	0	0	0	0	0	[0.183, 0.220]
23	Bueno	Media	Medio	0	0	3	3	4	0	0	0	0	[0.367, 0.407]
24	Bueno	Media	Largo	0	0	3	3	3	0	1	0	0	[0.392, 0.432]
25	Bueno	Alta	Corto	0	0	2	2	5	1	0	0	0	[0.417, 0.457]
26	Bueno	Alta	Medio	0	0	2	0	4	2	2	0	0	[0.505, 0.545]
27	Bueno	Alta	Largo	0	0	0	0	1	4	5	0	0	[0.655, 0.695]

⁴⁴ Type-2 Takagi-Sugeno-Kang Fuzzy Logic Systems.

En este trabajo los consecuentes de la base de reglas han sido seleccionados utilizando el criterio del autor. En la Fig. A.13 y Fig. A.14 se muestran los centroides de los consecuentes correspondientes a las reglas 1-9 y 10-18 del T2-FLS utilizado para calcular I_i^Q . Estas son las reglas más influyentes porque se activan cuando W_i es “Malo” o “Regular”. Los intervalos continuos son los centroides de los consecuentes escogidos por el autor⁴⁵, los intervalos a rayas son los centroides promedio (C_{avg}^I) de la Tabla A.4.

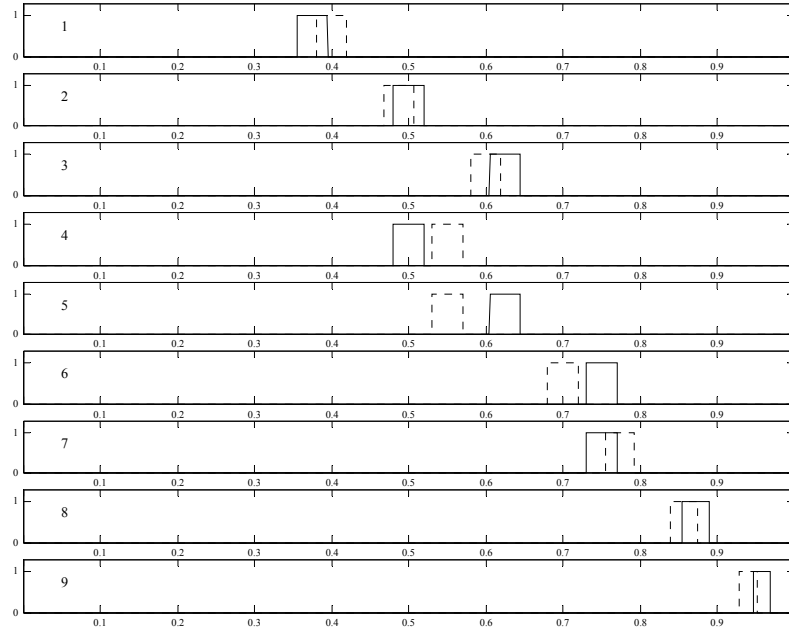


Fig. A.13 Centroides de los consecuentes de las reglas 1-9 del T2-FLS utilizado para calcular I_i^Q . Los intervalos continuos son los centroides de los consecuentes escogidos por el autor, los intervalos a rayas son los centroides promedio de la Tabla A.4.

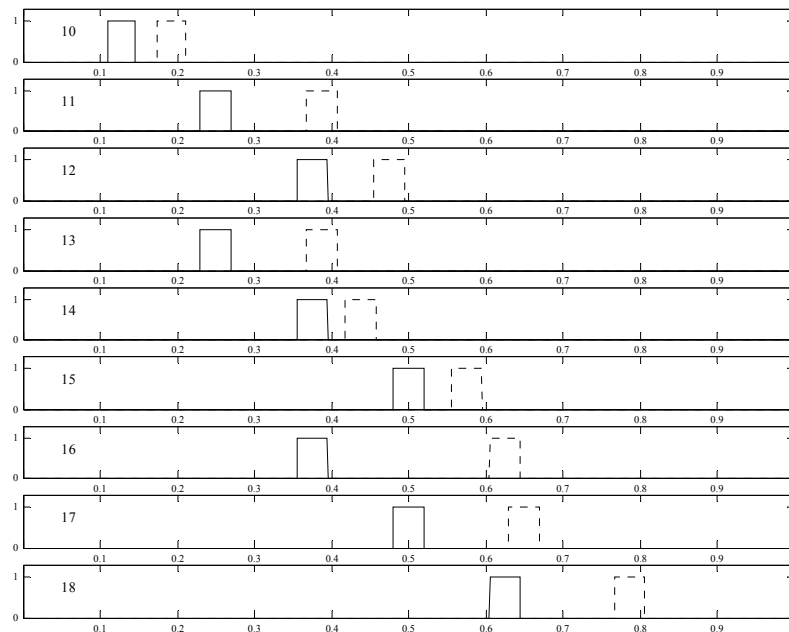


Fig. A.14 Centroides de los consecuentes de las reglas 10-18 del T2-FLS utilizado para calcular I_i^Q . Los intervalos continuos son los centroides de los consecuentes escogidos por el autor, los intervalos a rayas son los centroides promedio de la Tabla A.4.

⁴⁵ Ver sección 4.1.3, Tabla 4.1.

Al analizar la Fig. A.13 y Fig. A.14 se observa que existe mayor consenso o coincidencia en la selección del consecuente cuando el clima es “*Malo*”, la mayoría de los entrevistados coinciden que bajo esa condición el valor de I_i^Q debe ser mayor. Sin embargo existe mayor conflicto o discordia cuando el clima es “*Regular*” o “*Bueno*”, este comportamiento es el esperado, ya que la influencia de W_i , F_i^O y T_i^M sobre I_i^Q bajo estas condiciones es menos evidente. En vista que en este trabajo solamente se considera el criterio de un experto, se ha decidido realizar una selección conservadora de los consecuentes cuando W_i es “*Regular*” o “*Bueno*”. Sin embargo, esta selección puede modificarse mediante el procedimiento descrito en esta sección, en caso de disponer de un grupo de expertos e.g., operadores, ingenieros de operación y mantenimiento, supervisores, etc.

ANEXO B

B Corrientes de falla fuzzy (CFF).

Este anexo está dividido en cuatro secciones. En la primera sección se hace una introducción al principio de extensión fuzzy, la herramienta teórica fundamental para el cálculo de funciones de variables fuzzy. En la segunda sección se explica el método vertex, el procedimiento utilizado para la implementación práctica del principio de extensión. En la tercera sección se explica el teorema de representación, la herramienta teórica utilizada para describir de forma compacta los conjuntos fuzzy tipo 2 de intervalo. Finalmente en la cuarta sección se describe la aplicación del método vertex y el teorema de representación para el cálculo de corrientes de falla fuzzy (CFF) tipo 1 y tipo 2. Se presenta un caso ejemplo en el que se calculan CFF para diferentes puntos del distribuidor de MT de la Fig. 5.1.

B.1 Principio de extensión.

El principio de extensión es uno de los conceptos más básicos de la teoría de conjuntos fuzzy, provee un método general que permite extender los conceptos matemáticos crisp para trabajar con cantidades fuzzy. Sea X un producto cartesiano de universos $X = X_1 \times X_2 \times \dots \times X_r$ y sean $A_1, A_2, \dots, A_r$, r conjuntos fuzzy tipo 1 en $X_1, X_2, \dots, X_r$, respectivamente. La función f es un mapeo⁴⁶ de X al universo Y , $y = f(x_1, x_2, \dots, x_r)$. Entonces el principio de extensión fuzzy permite definir el conjunto fuzzy B en Y como [142]:

$$B = \left\{ (y, \mu_B(y)) \mid y = f(x_1, x_2, \dots, x_r), (x_1, x_2, \dots, x_r) \in X \right\} \quad (B.1)$$

$$\mu_B(y) = \begin{cases} \sup_{(x_1, x_2, \dots, x_r) \in f^{-1}(y)} \min(\mu_{A_1}(x_1), \mu_{A_2}(x_2), \dots, \mu_{A_r}(x_r)) & \text{si } f^{-1}(y) \neq \emptyset \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (B.2)$$

Donde $f^{-1}(y)$ denota el conjunto de todos los puntos $x_1 \in X_1, x_2 \in X_2, \dots, x_r \in X_r$ tales que:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_r) \quad (B.3)$$

Para implementar (B.2), primero se encuentran los valores de $x_1, x_2, \dots, x_r$ para los cuales se cumple que $y = f(x_1, x_2, \dots, x_r)$, después se calculan $\mu_{A_1}(x_1), \mu_{A_2}(x_2), \dots, \mu_{A_r}(x_r)$ para esos valores y luego $\min(\mu_{A_1}(x_1), \mu_{A_2}(x_2), \dots, \mu_{A_r}(x_r))$. Si más de un conjunto de $x_1, x_2, \dots, x_r$ satisface $y = f(x_1, x_2, \dots, x_r)$, entonces se repite este procedimiento para todos los valores y se escoge el mayor de los mínimos como $\mu_B(y)$. El principio de extensión fue definido originalmente utilizando el mínimo como t-norma y el máximo como t-conorma. Sin embargo otras t-normas y t-conormas han sido propuestas en la literatura [153]. En este sentido una propuesta más general es reemplazar el mínimo por la notación $\star$ para indicar que es posible utilizar una t-norma alternativa (e.g., producto).

⁴⁶ Simbólicamente, este mapeo es comúnmente denotado $f: X \rightarrow Y$. Otras terminologías denominan al mapeo $y = f(x)$, la imagen de x bajo f y al mapeo inverso, $x = f^{-1}(y)$, la imagen original de y .

Cuando se necesita extender una operación de la forma $f(x_1, x_2, \dots, x_r)$ a una operación de la forma $f(A_1, A_2, \dots, A_r)$, donde los A_i son conjuntos fuzzy tipo 1, no se extienden las operaciones individuales como multiplicación, adición, etc., presentes en f . En su lugar, se utiliza (B.4), la cual se deriva directamente de (B.2), cuando se utiliza el máximo como t-conorma y una t-norma general ($\star$) en lugar del mínimo [102].

$$f(A_1, A_2, \dots, A_r) = \int_{x_1 \in X_1} \int_{x_2 \in X_2} \dots \int_{x_r \in X_r} \frac{\mu_{A_1}(x_1) \star \mu_{A_2}(x_2) \star \dots \star \mu_{A_r}(x_r)}{f(x_1, x_2, \dots, x_r)} \quad (B.4)$$

El principio de extensión también permite extender la operación $f(x_1, x_2, \dots, x_r)$ a una operación de la forma $f(\tilde{A}_1, \tilde{A}_2, \dots, \tilde{A}_r)$, donde los $\tilde{A}_i$ son conjuntos fuzzy tipo 2. En este caso se utiliza (B.5), la cual se deriva de la aplicación recursiva del principio de extensión a las funciones de pertenencia secundaria $\mu_{\tilde{A}_1}(x_1), \mu_{\tilde{A}_2}(x_2), \dots, \mu_{\tilde{A}_r}(x_r)$ y donde la operación *meet* reemplaza a la t-norma [154], [155].

$$f(\tilde{A}_1, \tilde{A}_2, \dots, \tilde{A}_r) = \int_{x_1 \in X_1} \int_{x_2 \in X_2} \dots \int_{x_r \in X_r} \frac{\mu_{\tilde{A}_1}(x_1) \sqcap \mu_{\tilde{A}_2}(x_2) \sqcap \dots \sqcap \mu_{\tilde{A}_r}(x_r)}{f(x_1, \dots, x_r)} \quad (B.5)$$

En este trabajo son de particular interés las aplicaciones para las cuales $r = 1$, estas se conocen en como *mapeos uno a uno* [110]. En estos casos el principio de extensión se reduce a (B.6) y (B.7) para conjuntos fuzzy tipo 1 y 2 respectivamente. Donde (B.8) es la FPS de $\tilde{A}$ y $f_x(u) = 1$ para conjuntos fuzzy tipo 2 de intervalo.

$$f(A) = \int_{x \in X} \frac{\mu_A(x)}{f(x)} \quad (B.6)$$

$$f(\tilde{A}) = \int_{x \in X} \frac{\mu_{\tilde{A}}(x)}{f(x)} \quad (B.7)$$

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \int_{u \in J_x} \frac{f_x(u)}{u}, \quad J_x \subseteq [0, 1] \quad (B.8)$$

B.2 El método vertex.

Una seria desventaja de la implementación práctica del principio de extensión para propagar las incertidumbres fuzzy (*fuzziness*) en mapeos continuos (f continua), es que se pueden obtener funciones de pertenencia irregulares y erróneas para la variable de salida, si las variables de entrada son discretizadas por conveniencia numérica. La razón de esta anomalía es que la solución del principio de extensión como se expresa en (B.2), es en realidad un problema de programación no lineal para funciones continuas. Es bien sabido que en cualquier proceso de optimización, la discretización de cualquier variable puede producir

una solución óptima errónea porque porciones del espacio de solución son omitidas en los cálculos. Estas complicaciones no ocurren por problemas inherentes al principio de extensión, en realidad surgen cuando funciones continuas son discretizadas. Una opción para evitar este problema es disminuir el paso de discretización, pero esto incrementa la carga computacional del procedimiento y no asegura la obtención de una función de pertenencia regular. Otros métodos han sido propuestos en la literatura para solucionar la carga computacional de implementar el principio de extensión para funciones continuas. El método utilizado en este trabajo es el denominado método vertex [110], este método está basado en la combinación del concepto de corte α y el análisis de intervalos estándar. El método vertex puede prevenir anomalías en la función de pertenencia de salida debido a la aplicación de técnicas de discretización en el dominio de las variables fuzzy. También puede prevenir el ensanchamiento del conjunto de valores de la función resultante, debido a múltiples ocurrencias de variables en la expresión funcional. Además su implementación es sencilla y su algoritmo es eficiente desde el punto de vista computacional.

El algoritmo funciona de la siguiente forma. De acuerdo al principio de resolución [110], [111], cualquier función de pertenencia continua $\mu_A(x)$ puede ser representada como un barrido de cortes α desde $\alpha = 0^+$ a $\alpha = 1$, donde $I_\alpha = [a, b]$ es un corte α genérico como el mostrado en la Fig. B.1. Supóngase que se tiene una función de una variable $y = f(x)$ que se desea calcular para variables de entrada fuzzy i.e., se desea calcular $B = f(A)$. Supóngase que se ha descompuesto A en una serie de cortes α (I_α). Cuando la función f es continua y monótona en I_α , el intervalo que representa a B para un valor particular de α (B_α), puede ser obtenido mediante (B.9):

$$B_\alpha = f(I_\alpha) = [\min(f(a), f(b)), \max(f(a), f(b))] \quad (\text{B.9})$$

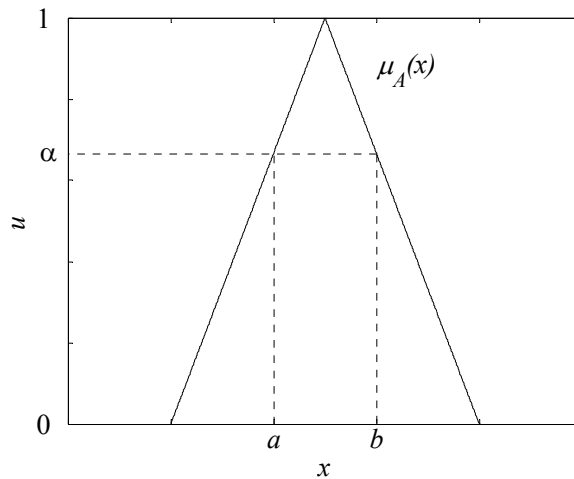


Fig. B.1 Corte α genérico $I_\alpha = [a, b]$

Cuando el mapeo está dado por n entradas, i.e., $y = f(x_1, x_2, \dots, x_r)$, entonces el espacio de entrada puede ser representado por una región cartesiana r -dimensional. Cada variable de entrada puede ser descrita por un intervalo ($I_{i\alpha}$) para un corte α específico, donde:

$$I_{i\alpha} = [a_i, b_i], \quad i = 1, 2, \dots, r \quad (\text{B.10})$$

Cuando el mapeo $y = f(x_1, x_2, \dots, x_r)$ es continuo en la región cartesiana r -dimensional y cuando tampoco existen puntos extremos en esta región (o a lo largo de sus fronteras), el valor de la función intervalo para un corte α particular puede ser obtenido mediante (B.11):

$$B_\alpha = f(I_{1\alpha}, I_{2\alpha}, \dots, I_{r\alpha}) = \left[\min_j \left(f(c_j) \right), \max_j \left(f(c_j) \right) \right] \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (\text{B.11})$$

Donde $N = 2^r$ es el número de vértices (c_j) de la región r -dimensional, los cuales son definidos por los valores de a_i y b_i . Por ejemplo cuando $r = 3$, para cada corte α se tienen 8 vértices: (a_1, a_2, a_3) , (a_1, a_2, b_3) , (a_1, b_2, a_3) , (a_1, b_2, b_3) , (b_1, a_2, a_3) , (b_1, a_2, b_3) , (b_1, b_2, a_3) , (b_1, b_2, b_3) . Cuando existen puntos extremos de la función f en la región cartesiana r -dimensional, estos deben ser tratados como vértices adicionales (E_k) en el espacio cartesiano. Entonces el valor de B_α puede ser obtenido mediante (B.12), donde m es número total de puntos extremos en la región:

$$B_\alpha = \left[\min_{j,k} \left(f(c_j), f(E_k) \right), \max_{j,k} \left(f(c_j), f(E_k) \right) \right] \quad j = 1, 2, \dots, r \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (\text{B.12})$$

Se observa que el método vertex está definido en función de conjuntos fuzzy tipo 1, para aplicarlo a conjuntos fuzzy tipo 2 de intervalo es necesario hacer algunas simplificaciones utilizando (B.7) y (B.8). Estas simplificaciones pueden ser visualizadas fácilmente mediante la introducción del teorema de representación

B.3 Teorema de representación.

El teorema de representación [156] es una herramienta teórica que facilita la interpretación del significado de los conjuntos fuzzy tipo 2 ($\tilde{A}$). Este teorema representa de forma compacta un conjunto fuzzy tipo 2, mediante los conceptos de conjuntos fuzzy incrustados⁴⁷ tipo 2 y tipo 1, propuestos por Mendel y John en 2002.

Para utilizar el teorema de representación y explicar los conjuntos fuzzy incrustados tipo 2 y tipo 1, es necesario definir el conjunto fuzzy tipo 2 $\tilde{A}$ para universos de discurso discretos. Si X y J_x son universos de discurso discretos (ya sea como resultado de la formulación del problema o de la discretización de universos de discurso continuos) entonces el conjunto fuzzy tipo 2 $\tilde{A}$ es definido como:

$$\tilde{A} = \sum_{x \in X} \left[\sum_{u \in J_x} \frac{f_x(u)}{u} \right] / x \quad (\text{B.13})$$

$$\tilde{A} = \left[\sum_{k=1}^{M_1} \frac{f_{x_1}(u_{1k})}{u_{1k}} \right] / x_1 + \dots + \left[\sum_{k=1}^{M_N} \frac{f_{x_N}(u_{Nk})}{u_{Nk}} \right] / x_N \quad (\text{B.14})$$

⁴⁷ Embedded type-2 fuzzy set y embedded type-1 fuzzy set.

En estas ecuaciones el símbolo + denota unión. Se observa que x ha sido discretizada en N valores y cada u_{ik} ha sido discretizada en M_i valores. La discretización para cada u_{ik} no tiene que ser la misma, por esta razón aparecen diferentes sumatorias en cada término entre corchetes. Si la discretización es la misma entonces $M_1 = M_2 = \dots = M_N = M$.

B.3.1 Conjuntos fuzzy incrustados tipo 2.

Para universos de discurso discretos X y U , un conjunto fuzzy incrustado tipo 2 ($\tilde{A}_e$)⁴⁸ tiene N elementos, cada uno perteneciente a $J_{x_1}, J_{x_2}, \dots, J_{x_N}$ ($u_1, u_2, \dots, u_N$) y con grado secundario asociado $f_{x_1}(u_1), f_{x_2}(u_2), \dots, f_{x_N}(u_N)$.

$$\tilde{A}_e = \sum_{i=1}^N \left[\frac{f_{x_i}(u_i)}{u_i} \right] / x_i \quad u_i \in J_{x_i} \subseteq U = [0,1] \quad (\text{B.15})$$

B.3.2 Conjuntos fuzzy incrustados tipo 1.

Para universos de discurso discretos X y U , un conjunto fuzzy incrustado tipo 1 (A_e)⁴⁹ tiene N elementos, cada uno perteneciente a $J_{x_1}, J_{x_2}, \dots, J_{x_N}$ ($u_1, u_2, \dots, u_N$).

$$A_e = \sum_{i=1}^N u_i / x_i \quad u_i \in J_{x_i} \subseteq U = [0,1] \quad (\text{B.16})$$

B.3.3 Formulación matemática.

Sea $\tilde{A}_e^j$ el j -ésimo conjunto fuzzy incrustado tipo 2 de $\tilde{A}$, entonces $\tilde{A}$ puede ser representado como la unión de sus conjuntos fuzzy incrustados tipo 2:

$$\tilde{A}_e^j = \left\{ \left(u_i^j, f_{x_i}(u_i^j) \right), i = 1, \dots, N \right\} \quad (\text{B.17})$$

$$u_i^j \in \{u_{ik}, k = 1, \dots, M_i\} \quad (\text{B.18})$$

$$\tilde{A} = \sum_{j=1}^n \tilde{A}_e^j \quad (\text{B.19})$$

$$n = \prod_{i=1}^N M_i \quad (\text{B.20})$$

⁴⁸ Hay un total de $\prod_{i=1}^N M_i$ conjuntos $\tilde{A}_e$ incrustados en $\tilde{A}$.

⁴⁹ El conjunto A_e es la unión de todas las pertenencias primarias del conjunto $\tilde{A}_e$ (B.15) y su número total es de $\prod_{i=1}^N M_i$.

A la ecuación (B.15) se le denomina representación *wavy slice* o *corte ondulado* de $\tilde{A}$. Su principal ventaja es que permite definir operaciones sobre conjuntos fuzzy tipo 2 sin necesidad de utilizar el principio de extensión. Por ejemplo en [156]-[158] es utilizada para definir la unión, intersección, negación, operaciones aritméticas y centroide de conjuntos fuzzy tipo 2. Como se explica en estas publicaciones, cuando $\tilde{A}$ es un conjunto fuzzy tipo 2 de intervalo, se pueden tratar sus conjuntos fuzzy incrustados tipo 2 ($\tilde{A}_e^j$) como conjuntos fuzzy incrustados tipo 1 (A_e^j), en vista que todos sus grados secundarios son iguales a uno. Luego, utilizando A_e^j se pueden definir las operaciones de interés (mediante la teoría de conjuntos fuzzy tipo 1) y posteriormente adjuntar los grados secundarios a todos los resultados para obtener las formulas finales, las cuales serán válidas para conjuntos fuzzy tipo 2 de intervalo. Por ejemplo, mediante este procedimiento en [158] se define el centroide de un conjunto fuzzy tipo 2 sin utilizar el principio de extensión. Utilizando estos conceptos es posible calcular el mapeo de $\tilde{A}$, el procedimiento es el siguiente:

1. Discretizar los universos de discurso X y U en los cuales está definido $\tilde{A}$.
2. Calcular los n conjuntos fuzzy incrustados tipo 2 ($\tilde{A}_e^j$) y tipo 1 (A_e^j).
3. Calcular los n mapeos de A_e^j (e.g., utilizando el método vertex) y luego adjuntar los grados secundarios a todos los resultados para obtener los n mapeos de $\tilde{A}_e^j$. Estos mapeos son B_e^j y $\tilde{B}_e^j$ respectivamente.
4. Finalmente aplicar (B.19) para obtener $\tilde{B}$.

Este procedimiento es intensivo desde el punto de vista computacional, sin embargo puede simplificarse considerablemente para *mapeos uno a uno*. En (B.7) se observa que para cada valor de x solamente es necesario evaluar $f(x)$, no hay que realizar ninguna operación sobre $\mu_{\tilde{A}}(x)$, esto implica que los intervalos definidos por las pertenencias primarias de $\tilde{A}$ y $\tilde{B}$ son iguales⁵⁰. Entonces, para obtener $f(\tilde{A})$ solamente se deben calcular los mapeos de $\underline{\mu}_{\tilde{A}}(x)$ y $\bar{\mu}_{\tilde{A}}(x)$, los cuales son conjuntos fuzzy incrustados tipo 2 de $\tilde{A}$ y conjuntos fuzzy tipo 2 de intervalo. Por lo tanto se puede reemplazar $\underline{\mu}_{\tilde{A}}(x)$ y $\bar{\mu}_{\tilde{A}}(x)$ por sus alternativas tipo 1, $\underline{\mu}_A(x)$ y $\bar{\mu}_A(x)$, luego realizar las operaciones de interés y finalmente adjuntar los grados secundarios a los resultados. De esta forma solamente es necesario realizar los mapeos fuzzy tipo 1 indicados en (B.21) y (B.22), los cuales pueden calcularse fácilmente utilizando el método vertex. Los resultados definen la FOU y la función de pertenencia fuzzy tipo 2 de $\tilde{B} = f(\tilde{A})$. Este es el procedimiento utilizado en este trabajo.

$$\underline{\mu}_B(y) = \int_{x \in X} \frac{\underline{\mu}_A(x)}{f(x)} \quad (\text{B.21})$$

⁵⁰ Aquí es necesario aclarar que las FPS están definidas en diferentes universos de discurso (x, y), sin embargo las longitudes de sus dominios, i.e., las longitudes de los intervalos definidos por sus pertenencias primarias (J_x, J_y) son iguales $\forall x, y$.

$$\bar{\mu}_B(y) = \int_{x \in X} \frac{\bar{\mu}_A(x)}{f(x)} \quad (\text{B.22})$$

B.4 Cálculo de corrientes de falla fuzzy (CFF).

El concepto de CFF fue propuesto originalmente en [3], para Z_f modelada como número fuzzy tipo 1 y operaciones matemáticas realizadas mediante aritmética fuzzy tipo 1 convencional [110]-[111]. Su único precedente es [30], donde se modelan directamente las corrientes de falla como conjuntos fuzzy tipo 1, pero no se propone un procedimiento para definir las funciones de pertenencia utilizadas, las cuales son construidas basándose exclusivamente en conocimiento experto. Partiendo de [3], la formulación matemática de las CFF ha sido extendida en este trabajo, para calcular con números fuzzy tipo 1 generales y números fuzzy tipo 2 de intervalo [1]. El procedimiento propuesto se basa en la implementación del método vertex y la utilización de la representación *wavy slice* de conjuntos fuzzy tipo 2. El cálculo de corrientes de falla en SDEE es un procedimiento bien conocido, estudios completos pueden ser encontrados en [86]-[88], [93]. Generalmente, para SDEE se asume que las impedancias de secuencia positiva y negativa son iguales, esta asunción simplifica las ecuaciones clásicas, por ejemplo para la magnitud de la corriente de falla monofásica se obtiene (B.23):

$$I_{fk}^{1\varphi} = \frac{3U_{pfk}}{\sqrt{\left(2R_{Tk}^+ + R_{Tk}^0 + 3R_{fk}\right)^2 + \left(2X_{Tk}^+ + X_{Tk}^0\right)^2}} \quad (\text{B.23})$$

Donde:

$I_{fk}^{1\varphi}$ = Magnitud de corriente de falla monofásica en el k -ésimo punto.

U_{pfk} = Tensión de pre-falla en el k -ésimo punto del distribuidor de MT.

R_{Tk}^+, X_{Tk}^+ = Resistencia y reactancia de secuencia positiva vista desde el k -ésimo punto.

R_{Tk}^0, X_{Tk}^0 = Resistencia y reactancia de secuencia cero vista desde el k -ésimo punto.

R_{fk} = Impedancia de falla del k -ésimo punto (se asume que Z_{fk} es una resistencia pura).

La mayoría de las variables involucradas en el cálculo de (B.23) son conocidas con suficiente precisión. Sus valores pueden ser obtenidos de las bases de datos GIS AM / FM, de los resultados de los EE y programas de cálculo de flujo de potencia, etc. Sin embargo, como se explicó en la sección 4.1.2, Z_f no es conocida con precisión, solamente se tiene una idea aproximada de su rango de valores. Para considerar la influencia de esta incertidumbre en el proceso de inferencia de la CO, en este trabajo se modela Z_f como un número fuzzy tipo 1 o tipo 2 de intervalo y luego se calcula (B.23) mediante el método vertex. Como resultado se obtienen las corrientes de falla fuzzy tipo 1 y tipo 2 (CFF) para k puntos del distribuidor. Las CFF consideran un espectro mayor de posibilidades que los resultados derivados de cálculos determinísticos. El método vertex puede ser aplicado directamente en el caso fuzzy tipo 1, pero en el caso fuzzy tipo 2 es necesario utilizar (B.21) y (B.22). Este procedimiento se puede aplicar a cualquiera de los tipos de fallas, utilizando las ecuaciones

simplificadas correspondientes. Sin embargo, la ecuación de mayor interés en este trabajo es (B.23), porque las fallas monofásicas son las más comunes en SDEE [86].

Antes de continuar es importante discutir la consideración de la corriente de carga en el cálculo de las CFF, este punto está directamente relacionado con la motivación original de utilizar la teoría fuzzy como herramienta metodológica para considerar las incertidumbres presentes en el cálculo de corrientes de falla. De acuerdo a la literatura [21], [27], [159]-[162], la corriente de carga debe ser considerada cuando se estudian problemas relacionados con la localización de fallas en SDEE. En el problema de la localización de fallas es necesario modelar en detalle las cargas para mejorar la precisión de los resultados, porque existe poca tolerancia por la imprecisión. En la inferencia de la CO por el contrario, no es necesario determinar la localización exacta de la falla, basta con identificar la zona o región donde esta ha ocurrido. Por lo tanto es factible afirmar que una buena aproximación de la corriente de falla es suficiente y que existe tolerancia por la imprecisión.

Existen muchas metodologías de cálculo de corrientes de falla en SDEE, con diferentes grados de precisión y complejidad [86]-[88], [93], [163]-[166]. En este trabajo el objetivo es lograr una solución de compromiso entre la precisión y complejidad de la metodología, valiéndose de la tolerancia por la imprecisión implícita en el problema bajo estudio y del potencial de la teoría de conjuntos fuzzy como una herramienta matemática para el cálculo y razonamiento aproximado. En este sentido, a fin de simplificar los cálculos se ha decidido utilizar una ecuación aproximada para considerar la corriente de carga (B.24), esta ecuación está basada en el así llamado principio de superposición [166] y proporciona un estimado razonable de la corriente de falla vista desde la SE AT/MT [27].

$$\tilde{I}_k = \tilde{I}_{fk} + \tilde{I}_{pf} \quad (\text{B.24})$$

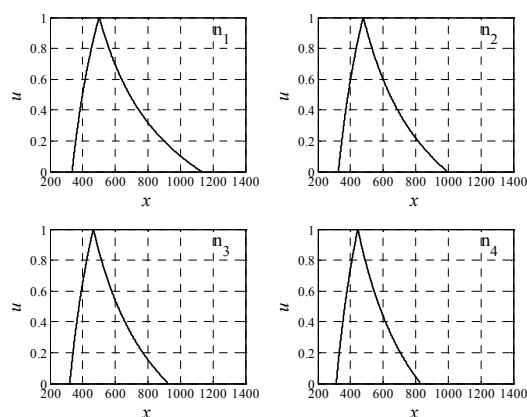
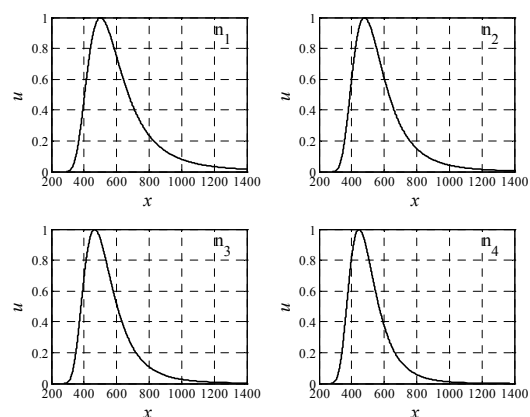
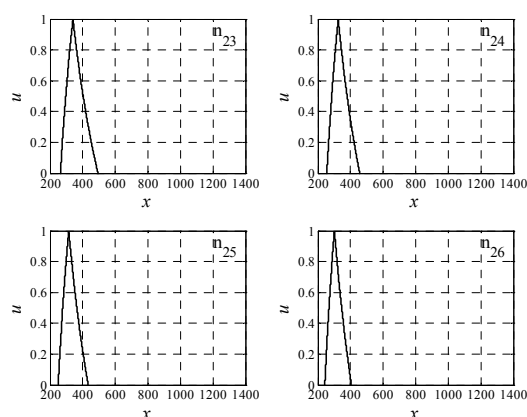
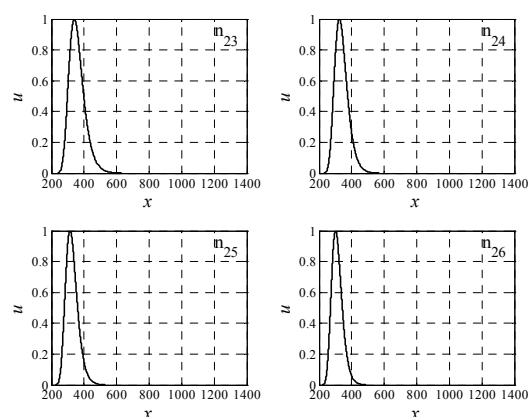
En (B.24) $\tilde{I}_{fk}$ es la CFF en el punto k , calculada utilizando las ecuaciones clásicas, e.g., (B.23), $\tilde{I}_{pf}$ es la corriente de carga de pre-falla medida en la SE AT/MT e $\tilde{I}_k$ es la CFF vista desde la SE AT/MT para una falla en el punto k . Cuando ocurre una falla, la corriente medida en la SE AT/MT (I_{sc}) es comparada con $\tilde{I}_k$ para obtener el índice I_k^I . Este índice representa el grado de similitud entre la corriente de falla medida y las corrientes de falla posibles para cada punto del distribuidor de MT. Se observa que $\tilde{I}_{fk}$ también puede ser modelada como número fuzzy, aunque en general se considera un número crisp. Para evaluar la metodología se calcula $\tilde{I}_k$ para fallas en los puntos n_1 - n_{26} del distribuidor de la Fig. 5.1, se modela Z_f como número fuzzy tipo 1 y tipo 2 (triangular y gaussiano). Los parámetros de las funciones de pertenencia y FOU se muestran en la Tabla B.1 y los parámetros necesarios para evaluar (B.23) se muestran en la Tabla B.2. La tensión de pre-falla (U_{pf}) es calculada utilizando el método descrito en el anexo C, la corriente de carga de pre-falla es medida en la SE AT/MT ($\tilde{I}_{fk} = 53.8$ A). Las CFF correspondientes a n_1 - n_4 y n_{23} - n_{26} se muestran en las Fig. B.2-B.9, las CFF restantes se presentan en el anexo E.

Tabla B.1 Parámetros de las funciones de pertenencia y FOU de los números fuzzy tipo 1 y tipo 2 utilizados para modelar Z_f .

Números fuzzy triangulares								Números fuzzy gaussianos				
Tipo 1			Tipo 2					Tipo 1		Tipo 2		
A	B	C	A_U	A_L	$B_U=B_L$	C_U	C_L	m	σ	m	σ_1	σ_2
5	15	25	3	7	15	23	27	15	4	15	3	5

Tabla B.2 Parámetros eléctricos de los puntos n_1 - n_{26} del distribuidor de la Fig. 5.1.

n_k	U_{pf} (V)	R_T^+ (Ω)	X_T^+ (Ω)	R_T^0 (Ω)	X_T^0 (Ω)	n_k	U_{pf} (V)	R_T^+ (Ω)	X_T^+ (Ω)	R_T^0 (Ω)	X_T^0 (Ω)
n_1	7505.9	1.557	0.953	1.872	4.229	n_{14}	7449.6	5.938	2.765	6.424	12.707
n_2	7499.8	2.291	1.346	2.741	5.955	n_{15}	7473.2	2.530	1.531	2.962	6.901
n_3	7496.0	2.741	1.586	3.273	7.013	n_{16}	7471.7	4.024	1.941	4.341	8.953
n_4	7489.9	3.461	1.972	4.125	8.708	n_{17}	7470.1	5.417	2.324	5.628	10.868
n_5	7488.4	3.688	2.093	4.393	9.240	n_{18}	7469.4	7.040	2.770	7.128	13.098
n_6	7488.4	3.704	2.102	4.412	9.277	n_{19}	7444.2	6.872	3.141	7.406	14.439
n_7	7486.9	4.030	2.277	4.798	10.045	n_{20}	7441.9	8.144	3.491	8.581	16.187
n_8	7486.1	4.392	2.470	5.226	10.895	n_{21}	7441.2	8.685	3.640	9.080	16.930
n_9	7486.1	4.465	2.509	5.313	11.069	n_{22}	7439.6	9.293	3.964	9.799	18.354
n_{10}	7473.9	2.272	1.460	2.723	6.546	n_{23}	7439.6	9.298	3.968	9.805	18.371
n_{11}	7464.8	3.135	1.873	3.695	8.392	n_{24}	7438.1	10.566	4.396	11.056	20.414
n_{12}	7458.7	3.598	2.113	4.242	9.455	n_{25}	7438.1	11.520	4.658	11.937	21.724
n_{13}	7455.6	4.329	2.314	4.917	10.460	n_{26}	7437.4	12.836	5.020	13.153	23.533

Fig. B.2 CFF tipo 1 de puntos n_1 - n_4 de distribuidor de la Fig. 5.1 (Z_f número fuzzy triangular tipo 1)Fig. B.3 CFF tipo 1 de puntos n_1 - n_4 de distribuidor de la Fig. 5.1 (Z_f número fuzzy gaussiano tipo 1)Fig. B.4 CFF tipo 1 de puntos n_{23} - n_{26} de distribuidor de la Fig. 5.1 (Z_f número fuzzy triangular tipo 1)Fig. B.5 CFF tipo 1 de puntos n_{23} - n_{26} de distribuidor de la Fig. 5.1 (Z_f número fuzzy gaussiano tipo 1)

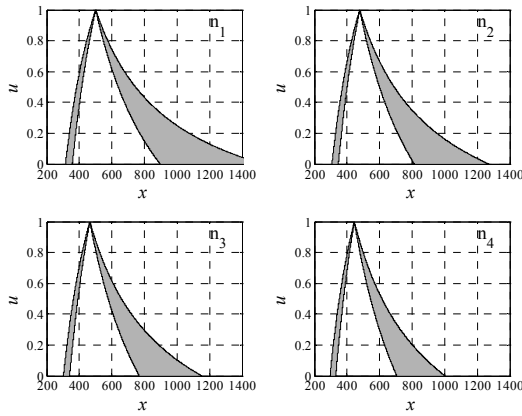


Fig. B.6 CFF tipo 2 de puntos n_1 - n_4 de distribuidor de la Fig. 5.1 (Z_f número fuzzy triangular tipo 2)

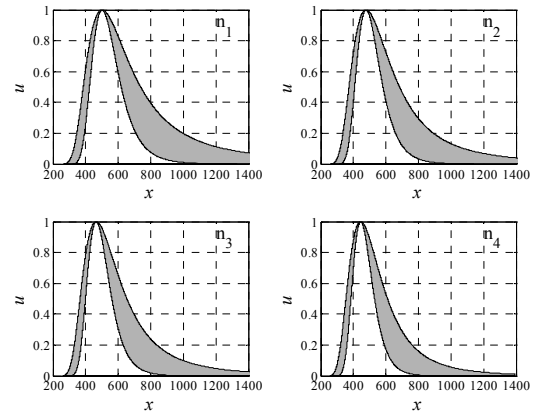


Fig. B.7 CFF tipo 2 de puntos n_1 - n_4 de distribuidor de la Fig. 5.1 (Z_f número fuzzy gaussiano tipo 2)

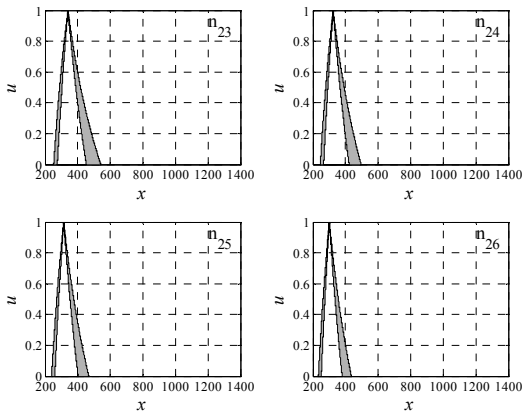


Fig. B.8 CFF tipo 2 de puntos n_{23} - n_{26} de distribuidor de la Fig. 5.1 (Z_f número fuzzy triangular tipo 2)

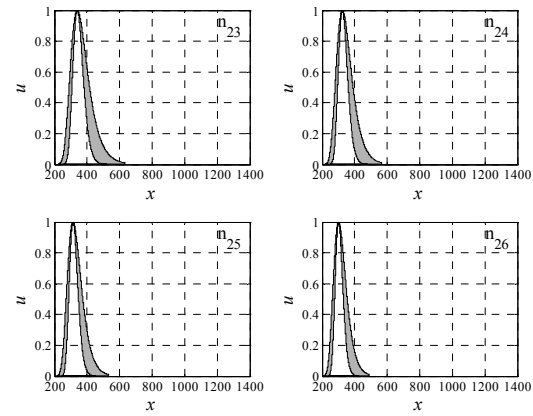


Fig. B.9 CFF tipo 2 de puntos n_{23} - n_{26} de distribuidor de la Fig. 5.1 (Z_f número fuzzy gaussiano tipo 2)

En las Fig. B.2-B.9 se observa que la incertidumbre acerca del valor de la corriente de falla es mayor para los puntos ubicados cerca de la SE AT/MT. Las funciones de pertenencia calculadas son similares a la función de pertenencia propuesta en [30], con la diferencia que los parámetros de la última son definidos basándose exclusivamente en conocimiento experto.

Un punto interesante que también ha sido investigado en este trabajo es el cálculo las CFF mediante la linealización de (B.23). La linealización de las funciones de variables fuzzy es propuesta en [74], donde se utiliza para obtener los parámetros de las funciones de pertenencia de algunas variables (flujos de potencia, corrientes de ramas, etc.), como parte de una metodología de estimación de estado fuzzy. Para analizar esta posibilidad se ha linealizado (B.23) alrededor del valor central de la función de pertenencia de Z_f (v_c), considerando las variables restantes como constantes [167], como resultado se obtiene (B.25). Aquí $v_c = B$ cuando la función de pertenencia es triangular y $v_c = m$ cuando la función de pertenencia es gaussiana. Las CFF obtenidas utilizando (B.25) se muestran en las Fig. B.10-B.17 para n_1 - n_4 y n_{23} - n_{26} .

$$I_f^{lq-g} = f(Z_f) \approx f(v_c) + f'(v_c)(Z_f - v_c) \quad (\text{B.25})$$

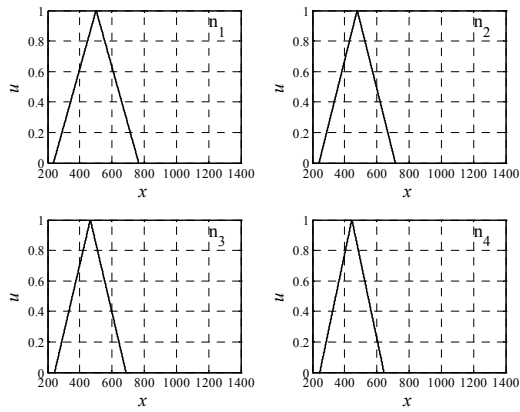


Fig. B.10 CFF tipo 1 (modelo lineal) de puntos n_1 - n_4 de distribuidor de la Fig. 5.1 (Z_f número fuzzy triangular tipo 1)

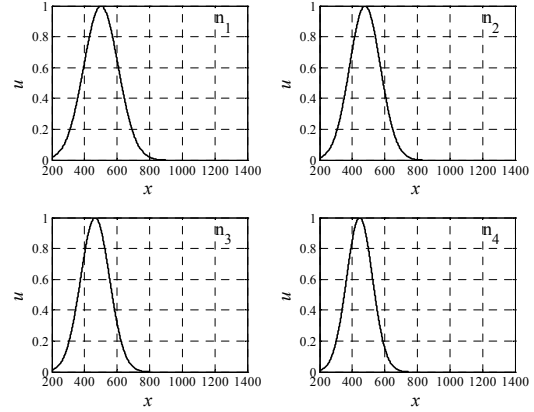


Fig. B.11 CFF tipo 1 (modelo lineal) de puntos n_1 - n_4 de distribuidor de la Fig. 5.1 (Z_f número fuzzy gaussiano tipo 1)

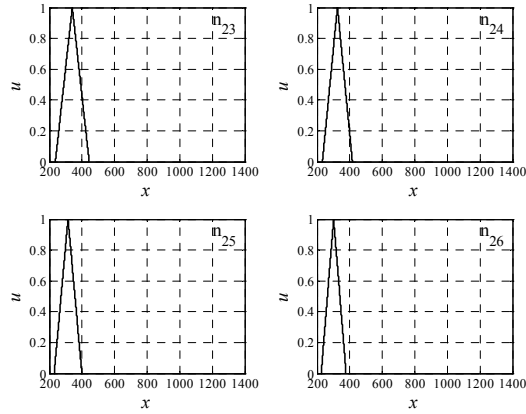


Fig. B.12 CFF tipo 1 (modelo lineal) de puntos n_{23} - n_{26} de distribuidor de la Fig. 5.1 (Z_f número fuzzy triangular tipo 1)

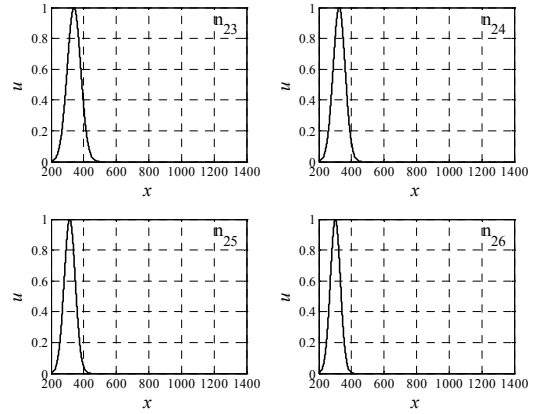


Fig. B.13 CFF tipo 1 (modelo lineal) de puntos n_{23} - n_{26} de distribuidor de la Fig. 5.1 (Z_f número fuzzy gaussiano tipo 1)

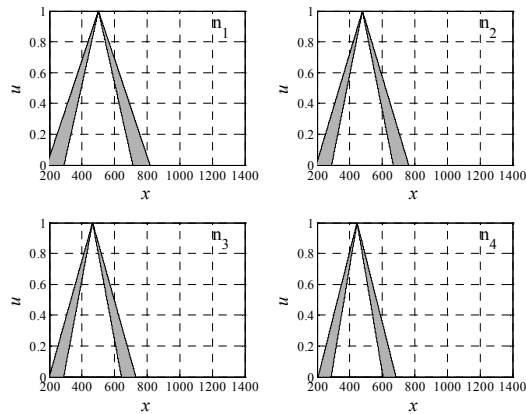


Fig. B.14 CFF tipo 2 (modelo lineal) de puntos n_1 - n_4 de distribuidor de la Fig. 5.1 (Z_f número fuzzy triangular tipo 2)

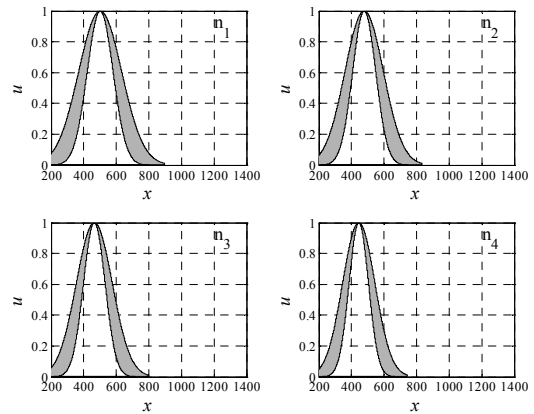


Fig. B.15 CFF tipo 2 (modelo lineal) de puntos n_1 - n_4 de distribuidor de la Fig. 5.1 (Z_f número fuzzy gaussiano tipo 2)

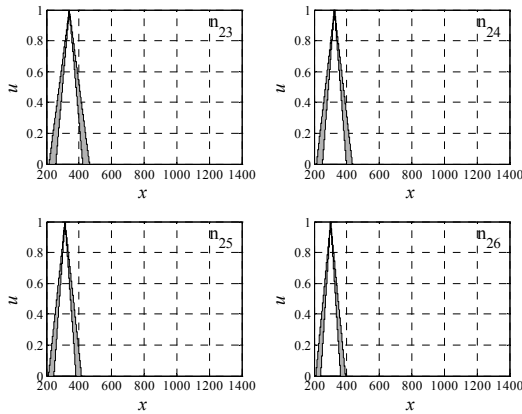


Fig. B.16 CFF tipo 2 (modelo lineal) de puntos n_{23} - n_{26} de distribuidor de la Fig. 5.1 (Z_f número fuzzy triangular tipo 2)

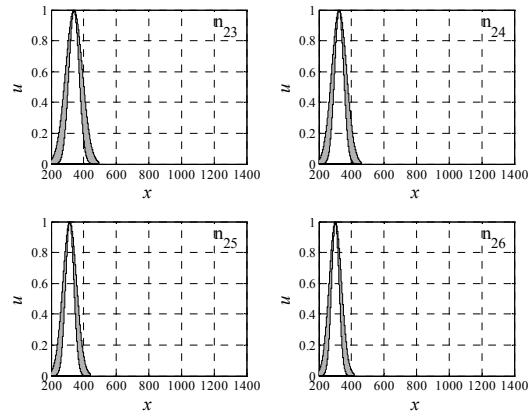


Fig. B.17 CFF tipo 2 (modelo lineal) de puntos n_{23} - n_{26} de distribuidor de la Fig. 5.1 (Z_f número fuzzy gaussiano tipo 2)

En las Fig. B.10-B.17 se observa que las CFF calculadas tienen funciones de pertenencia simétricas respecto a su valor central, este es el comportamiento esperado como resultado de la linealización de A.54. Evidentemente, la aproximación es bastante buena para los valores cercanos a B y m , sin embargo se pierde mucha información para valores mayores. Para evitar este fenómeno, en este trabajo se utiliza (B.23) para calcular las CFF.

Otra variable relativamente incierta, que puede ser de interés modelar como número fuzzy, es U_{pf} , esta variable también es influyente y puede no ser conocida con exactitud. Se sabe que sus valores se encuentran generalmente dentro de un intervalo definido por las regulaciones de CSE (e.g., entre 0.95 pu y 1.05 pu). Aunque en los extremos de los distribuidores y en las horas de mayor o menor consumo pueden observarse valores fuera de este intervalo. Utilizando esta información es posible modelar U_{pf} como número fuzzy y obtener las CFF tomando en cuenta esta incertidumbre adicional. En la Fig. B.18 y Fig. B.19 se muestran las $\tilde{I}_k$ calculadas para fallas trifásicas en los puntos n_1 , n_8 , n_{12} y n_{26} del distribuidor de la Fig. 5.1, aquí se utiliza (B.26) para calcular $\tilde{I}_{fk}$.

$$I_{fk}^{3\phi} = \frac{U_{pfk}}{\sqrt{(R_{Tk}^+ + R_{fk})^2 + X_{Tk}^+{}^2}} \quad (B.26)$$

En la Fig. B.18 y Fig. B.19 se comparan los resultados obtenidos cuando Z_f es modelada como número fuzzy y U_{pf} como número crisp (línea sólida) y cuando ambas variables son modeladas como números fuzzy (línea punteada). Los parámetros utilizados para los cálculos son los mostrados en las Tablas B.1-B.3. Como se observa, la incertidumbre es mayor cuando U_{pf} también es modelada como número fuzzy, este es el comportamiento esperado porque en este caso se está calculando con dos cantidades inciertas.

Tabla B.3 Parámetros de las funciones de pertenencia y FOU de los números fuzzy tipo 1 y tipo 2 utilizados para modelar U_{pf} .

Números fuzzy triangulares								Números fuzzy gaussianos				
Tipo 1			Tipo 2					Tipo 1		Tipo 2		
A	B	C	A _U	A _L	B _U =B _L	C _U	C _L	m	σ	m	σ ₁	σ ₂
0.9·U _{pf}	U _{pf}	1.1·U _{pf}	0.85·U _{pf}	0.95·U _{pf}	U _{pf}	1.05·U _{pf}	1.15·U _{pf}	U _{pf}	0.04·U _{pf}	U _{pf}	0.02·U _{pf}	0.06·U _{pf}

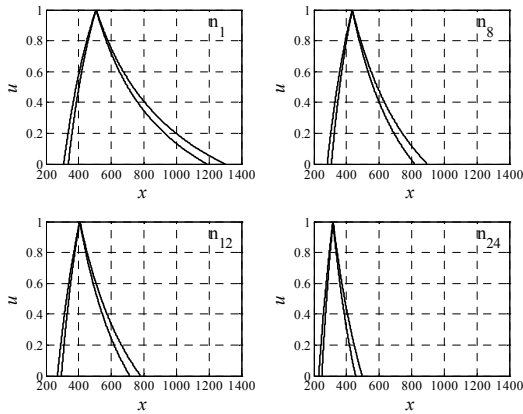


Fig. B.18 Comparación de CFF tipo 1 para Z_f fuzzy (línea sólida) y Z_f, U_{pf} fuzzy (línea punteada) para distribuidor de la Fig. 5.1

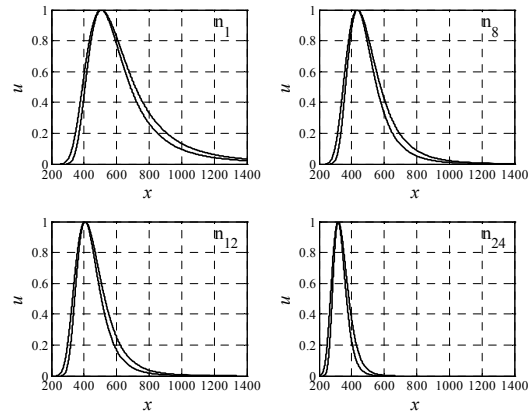


Fig. B.19 Comparación de CFF tipo 1 para Z_f fuzzy (línea sólida) y Z_f, U_{pf} fuzzy (línea punteada) para distribuidor de la Fig. 5.1

En el caso fuzzy tipo 2 los cálculos pueden simplificarse porque la operación *meet* para conjuntos tipo 1 de intervalo es sencilla de evaluar. De acuerdo a [102], la operación $\prod_{i=1}^n F_i$ de n conjuntos tipo 1 de intervalo, cuyos dominios son $[l_1, r_1], \dots, [l_n, r_n]$, respectivamente y donde $l_i \geq 0$ y $r_i \geq 0$ ($i = 1, \dots, n$) es un conjunto tipo 1 de intervalo con dominio $[(l_1 \star l_2 \star \dots \star l_n), (r_1 \star r_2 \star \dots \star r_n)]$, donde $\star$ es la t-norma general (mínimo o producto). Este teorema permite simplificar (B.5) y mediante un razonamiento similar al utilizado para obtener (B.21) y (B.22) es posible definir la FOU de $\tilde{B} = f(\tilde{A}_1, \tilde{A}_2)$ realizando operaciones sobre las funciones de pertenencia superior e inferior de los conjuntos fuzzy tipo 2 de entrada, como se muestra en (B.27) y (B.28). Estas ecuaciones se calculan mediante el método vertex y luego se adjuntan los grados secundarios para obtener la función de pertenencia fuzzy tipo 2 de $\tilde{B}$.

$$\underline{\mu}_B(y) = \int_{x_1 \in X_1} \int_{x_2 \in X_2} \frac{\underline{\mu}_{A_1}(x_1) \star \underline{\mu}_{A_2}(x_2)}{f(x_1, x_2)} \quad (\text{B.27})$$

$$\bar{\mu}_B(y) = \int_{x_1 \in X_1} \int_{x_2 \in X_2} \frac{\bar{\mu}_{A_1}(x_1) \star \bar{\mu}_{A_2}(x_2)}{f(x_1, x_2)} \quad (\text{B.28})$$

Utilizando este procedimiento y los parámetros de las Tablas B.1-B.3 se obtienen los resultados mostrados en la Fig. B.20 y Fig. B.21, para fallas trifásicas en los puntos n_1, n_8, n_{12} y n_{26} del distribuidor de la Fig. 5.1. La FOU más oscura corresponde al caso original (Z_f fuzzy y U_{pf} crisp) y la FOU más clara corresponde al caso modificado (Z_f y U_{pf} fuzzy). Se observa que los resultados del caso modificado son más inciertos que los del caso original, este es el comportamiento esperado porque son obtenidos utilizando dos variables inciertas.

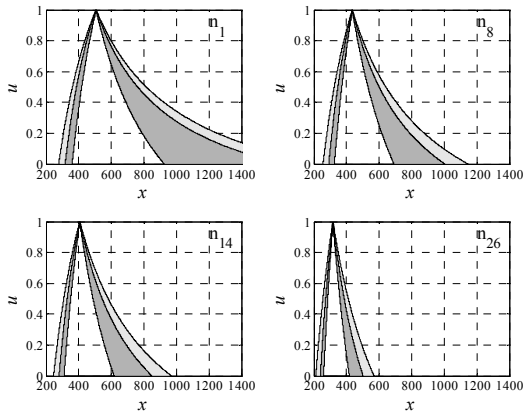


Fig. B.20 Comparación de CFF tipo 2 para Z_f fuzzy (FOU oscura) y Z_f, U_{pf} fuzzy (FOU clara) para distribuidor de la Fig. 5.1

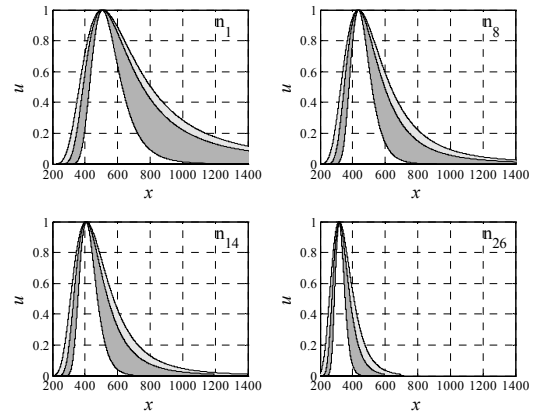


Fig. B.21 Comparación de CFF tipo 2 para Z_f fuzzy (FOU oscura) y Z_f, U_{pf} fuzzy (FOU clara) para distribuidor de la Fig. 5.1

ANEXO C

C Análisis de flujos de potencia.

Como se explicó en la sección 4.1 la potencia activa desconectada (ΔP) es un dato utilizado para obtener más información acerca de la CO del distribuidor. En muchas situaciones prácticas, conocer el valor de ΔP es insuficiente para inferir con exactitud que dispositivo de protección (d_i) ha operado. Sin embargo si ΔP es comparado con el flujo de potencia estimado para cada d_i (P_i) para la condición de carga previa, se puede obtener un grado de similitud (I_i^P) que indica que tan posible es la operación de los d_i analizados. Esta información es utilizada por el T2-FLS para mejorar los resultados de la inferencia.

El valor de P_i para la condición de carga previa a la detección de ΔP puede ser calculado mediante un algoritmo de EE. El principal problema de este cálculo es que no se conocen con precisión las demandas nodales de cada SE MT/BT (P_s , Q_s) para esa condición de carga. Este problema es resuelto mediante un procedimiento conocido en la literatura como estimación de carga o *load estimation*. A las demandas nodales estimadas se les denomina seudo mediciones y sirven como punto de partida para la EE. Existen varias propuestas para la estimación de carga, en las que se utilizan principalmente técnicas probabilísticas [68], [140] [168]-[173], técnicas de inteligencia artificial (lógica fuzzy y redes neuronales) [74], [133], [136], [174]-[176] y métodos determinísticos [177]. La mayoría de las propuestas concuerdan en la necesidad de integrar todos los datos disponibles: consumos históricos de energía de los clientes servidos por cada SE MT/BT (mensuales o bimensuales), curvas típicas de carga de cada grupo de clientes (residencial, comercial, industrial, etc.), datos de temperatura, etc. La precisión de los resultados depende principalmente de la cantidad e incertidumbre presente en estos datos. Partiendo de los resultados de la estimación de carga, el EE procesa y depura todas las mediciones y seudo mediciones disponibles y obtiene el mejor estimado de las demandas nodales y flujos de potencia del distribuidor.

En este trabajo se utiliza el método iterativo propuesto en [35] para estimar las demandas nodales de MT y flujos de potencia de la condición de carga previa a la detección de ΔP . Este método está basado en cálculos de flujo de potencias y como se indica en [35] ha demostrado obtener resultados aceptables en su implementación práctica e incluso se ha utilizado para la estimación de carga en BT. Sin embargo, como se explicó en la sección 4.1 otros algoritmos también pueden ser utilizados para este cálculo. El procedimiento es descrito a continuación:

1. Inicialmente se hace una estimación de la demanda nodal horaria en cada una de las SE MT/BT del distribuidor, los resultados se denominan vector de referencia de potencia inicial (VRP inicial). Este vector es obtenido utilizando las curvas típicas de carga, factores de potencia y los consumos de energía mensuales o bimensuales de los clientes servidos por cada SE MT/BT. El cálculo se realiza agrupando los clientes de cada SE MT/BT, para cada cliente se determina su potencia basándose en los consumos mensuales conocidos y en las curvas típicas de carga correspondientes. El método consiste en ubicar la energía consumida dentro de las curvas típicas normalizadas [35]. El VRP inicial es calculado fuera de línea para las diferentes condiciones de carga y es almacenado en una base de datos.

2. La potencia medida en la salida del distribuidor (P_M, Q_M) es distribuida proporcionalmente en cada SE MT/BT utilizando el VRP inicial y las pérdidas estimadas, como resultado se obtiene una estimación inicial de P_s y Q_s .
3. Utilizando la primera distribución de carga y un algoritmo de flujo de potencia se calculan las pérdidas activas y reactivas totales del distribuidor (P_L, Q_L). Las tensiones nodales obtenidas (U_s) son utilizadas para corregir P_s y Q_s , de esta manera se considera la dependencia de la carga respecto a la tensión. La corrección puede realizarse utilizando uno de los modelos propuestos en la literatura. Un modelo no lineal muy utilizado es el modelo universal de la demanda⁵¹ (C.1), (C.2). En este trabajo se utiliza (C.3), un modelo lineal basado en el factor de elasticidad de la demanda (F_{elas})⁵², el cual ha demostrado representar aceptablemente la dependencia de la carga respecto a la tensión [35].

$$P_{s_{corr}}^{(r)} = P_N \left(\frac{U_s^{(r)}}{U_N} \right)^\alpha \quad (C.1)$$

$$Q_{s_{corr}}^{(r)} = Q_N \left(\frac{U_s^{(r)}}{U_N} \right)^\beta \quad (C.2)$$

$$S_{s_{corr}}^{(r)} = S_N \left(1 + \frac{U_s^{(r)} - U_N}{U_N F_{elas}} \right) \quad (C.3)$$

4. Como resultado de este procedimiento se obtiene un VRP corregido ($P_{s_{corr}}, Q_{s_{corr}}$), esta corrección por tensión es importante especialmente en los sistemas de distribución latinoamericanos, donde los distribuidores pueden tener grandes longitudes y generalmente no existen nodos de tensión controlada. Las pérdidas en el hierro y cobre de cada SE MT/BT (P_{Fe0s}, P_{Cu0s}) calculadas para la potencia y tensión nominal (S_N, U_N) también son corregidas en cada iteración r por medio de (C.4), (C.5):

$$P_{Fe_s}^{(r)} = P_{Fe0s} \frac{U_s^{(r)}}{U_N} \quad (C.4)$$

$$P_{Cu_s}^{(r)} = P_{Cu0s} \frac{\left(S_{s_{corr}}^{(r)} \right)^2}{S_N^2} \quad (C.5)$$

5. El VRP corregido que representa la potencia total referida al lado de MT de cada SE MT/BT es calculado por medio de (C.6):

⁵¹ En (C.1), (C.2) S_N, P_N y Q_N son las potencias aparente, activa y reactiva a tensión nominal (U_N) respectivamente. Los valores de α se encuentran en el intervalo $[0.5, 1]$ y los de β en el intervalo $[0.5, 2]$.

⁵² La determinación de este factor es compleja [32], en este trabajo se ha definido de forma heurística como $F_{elas} = 0.7$.

$$S_{MT_s}^{(r)} = P_s^{(r)} + jQ_s^{(r)} = \left\{ P_{Fe_s}^{(r)} + P_{Cu_s}^{(r)} + P_{scorr}^{(r)} \right\} + jQ_{scorr}^{(r)} \quad (C.6)$$

6. Para iniciar la siguiente iteración se resta P_L y Q_L de P_M y Q_M respectivamente, los resultados son distribuidos de nuevo en cada SE MT/BT utilizando el VRP corregido. Este procedimiento iterativo (C.7), (C.8) se repite hasta que el flujo de potencia en la salida del distribuidor sea igual a P_M y Q_M . La convergencia se alcanza rápidamente después de dos o tres iteraciones.

$$P_s^{(r+1)} = \frac{P_s^{(r)}}{\sum_{s=1}^t P_s^{(r)}} \left(P_M - P_L^{(r)} \right) \quad (C.7)$$

$$Q_s^{(r+1)} = \frac{Q_s^{(r)}}{\sum_{s=1}^t Q_s^{(r)}} \left(Q_M - Q_L^{(r)} \right) \quad (C.8)$$

Los resultados de este procedimiento son los flujos de potencia determinísticos de cada SE MT/BT (P_s) y cada d_i (P_i). Estos resultados tienen aceptable precisión, sin embargo para considerar las incertidumbres presentes en los cálculos, se modela a P_i como un número fuzzy triangular tipo 2 ($\tilde{P}_i$). En esta modelación P_i es el valor central del número fuzzy y los parámetros restantes son seleccionados utilizando como referencia la ubicación de cada d_i respecto a la SE AT/MT, como se explica en la sección 4.1.

Para ejecutar el proceso iterativo descrito por (C.7) y (C.8) es necesario utilizar un algoritmo de flujo de potencia rápido y robusto. En este trabajo se utiliza el método desarrollado por Vargas [35], el cual mejora significativamente la convergencia, el tiempo de cálculo y los requerimientos de memoria mediante la modificación de la formulación del problema de flujo de potencia y la utilización del método de Zollenkopf para la bi-factorización de la matriz de admitancia. Los resultados obtenidos mediante este algoritmo demuestran su rapidez, robustez y precisión.

ANEXO D

D Inferencia abductiva.

El objetivo del diagnóstico es identificar los desórdenes del sistema a ser diagnosticado a fin de explicar su comportamiento anormal (o manifestaciones). Los métodos existentes de diagnóstico pueden ser clasificados en grandes rasgos en métodos basados en asociación empírica y métodos basados en modelos. El modelo de inferencia abductiva para la solución de problemas de diagnóstico es clasificado dentro de los métodos basados en modelos. La inferencia abductiva es conducida de la siguiente forma: “**M** es cierto si **D** es cierto, si **M** es observado entonces hay razones para creer que **D** es cierto”. La inferencia abductiva es generalmente definida como “razonar la mejor explicación” para un conjunto dado de hechos [178].

Uno de los modelos de inferencia abductiva para la solución de problemas de diagnóstico más utilizado, es el propuesto por Peng y Regia [130]. Esta propuesta presenta un método eficiente para calcular las combinaciones de desórdenes candidatos para un conjunto de manifestaciones observadas, el cual está basado en la *Parsimonious Set Covering Theory* (PSCT).

D.1 Conceptos básicos de la PSCT.

La versión básica de la PSCT utiliza dos conjuntos finitos para definir el alcance del problema de diagnóstico. El conjunto **D**, representa todos los desórdenes posibles que pueden ocurrir (d_i) y el conjunto **M** representa todas las manifestaciones posibles que pueden ocurrir cuando uno o más desórdenes están presentes. Una relación **C** de **D** a **M** asocia cada desorden individual con sus manifestaciones causadas. Una asociación $\langle d_i, m_j \rangle$ en **C** significa que d_i puede causar directamente a m_j . El conjunto de desórdenes **D**, el conjunto de manifestaciones **M** y la relación causal **C** constituyen la base de conocimiento. Formalmente, la base de conocimiento se define como una tripleta $\mathbf{KB} = \langle \mathbf{D}, \mathbf{M}, \mathbf{C} \rangle$, un ejemplo se muestra en la Fig. D.1.

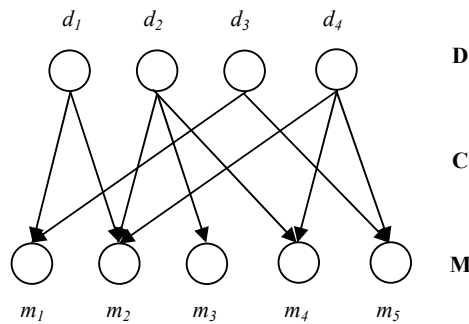


Fig. D.1 Red causal de la base de conocimiento del problema de diagnóstico.

Para completar la formulación del problema se necesita un caso de diagnóstico particular, para ello se utiliza $\mathbf{M}^+$, un subconjunto de **M**, para denotar el conjunto de observaciones o manifestaciones presentes en un caso en particular. Todas las manifestaciones no incluidas en $\mathbf{M}^+$ se asumen como ausentes. Entonces, un problema de diagnóstico puede definirse mediante la cuarteta de conjuntos y relaciones **P** (D.1):

$$\mathbf{P} = \langle \mathbf{D}, \mathbf{M}, \mathbf{C}, \mathbf{M}^+ \rangle \quad (\text{D.1})$$

Donde cada elemento es definido como:

- **D** es un conjunto finito, no vacío, de elementos denominados *desórdenes* del sistema (D.2).

$$\mathbf{D} = \{d_1 \quad d_2 \quad \dots \quad d_n\} \quad (\text{D.2})$$

- **M** es un conjunto finito, no vacío, de elementos denominados *manifestaciones* del sistema (D.3).

$$\mathbf{M} = \{m_1 \quad m_2 \quad \dots \quad m_m\} \quad (\text{D.3})$$

- $\mathbf{C} \subseteq \mathbf{D} \times \mathbf{M}$ es una relación denominada *relación de causalidad*. La relación de causalidad puede ser descrita de forma simplificada mediante una matriz **C**, donde cada elemento $c_{ij} \neq 0$, significa que d_i puede causar directamente la manifestación m_j con una probabilidad c_{ij} (D.4). Esta probabilidad representa con que frecuencia d_i causa m_j cuando d_i está presente, i.e., $c_{ij} = P(d_i \text{ cause } m_j \mid d_i)$ [178].

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \dots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \dots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{n1} & c_{n2} & \dots & c_{nm} \end{bmatrix} \quad (\text{D.4})$$

- $\mathbf{M}^+$ es la información disponible del caso, se le denomina conjunto de *manifestaciones observadas*, donde $\mathbf{M}^+ \subseteq \mathbf{M}$ (D.5).

$$\mathbf{M}^+ = \{m_1 \quad m_2 \quad \dots \quad m_r\} \quad r \leq m \quad (\text{D.5})$$

Resolver el problema de diagnóstico **P** consiste en obtener el conjunto de desórdenes que puedan explicar a $\mathbf{M}^+$, para lo cual es necesario definir el concepto de explicación. Este concepto y otros necesarios para resolver **P** son explicados a continuación.

D.2 Solución del problema de diagnóstico.

A fin de caracterizar formalmente la solución del problema de diagnóstico la PSCT define la noción de *cover*, basado en la relación causal **C**, el criterio de parsimonia o simplicidad y el concepto de explicación (hipótesis explicativa). Para ello es necesario introducir los conceptos de efectos y causas. Para cualquier $d_i \in \mathbf{D}$ y $m_j \in \mathbf{M}$ en un problema **P**:

$$\text{efectos}(d_i) = \{m_j \mid c_{ij} > 0\} \quad (\text{D.6})$$

$$\text{causas}(m_j) = \{d_i \mid c_{ij} > 0\} \quad (\text{D.7})$$

El conjunto $efectos(d_i)$ representa todas las manifestaciones que pueden ser causadas por d_i . El conjunto $causas(m_j)$ representa todos los desórdenes que pueden causar m_j . Esto implica que $efectos(d_i) \subseteq \mathbf{M}$ y $causas(m_j) \subseteq \mathbf{D}$, como se muestra en la Fig. D.2.

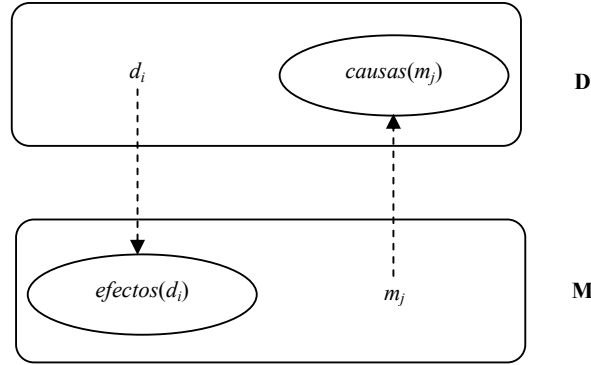


Fig. D.2 Relación entre $efectos(d_i)$ y $causas(m_j)$.

Estas funciones pueden ser fácilmente generalizadas de desórdenes (d_i) y manifestaciones (m_j), individuales a conjuntos de desórdenes y manifestaciones. Para cualquier $\mathbf{D}_I \subseteq \mathbf{D}$ y $\mathbf{M}_J \subseteq \mathbf{M}$, en un problema de diagnóstico $\mathbf{P}$:

$$efectos(\mathbf{D}_I) = \bigcup_{d_i \in \mathbf{D}_I} efectos(d_i) \quad (\text{D.8})$$

$$causas(\mathbf{M}_J) = \bigcup_{m_j \in \mathbf{M}_J} causas(m_j) \quad (\text{D.9})$$

Utilizando estos conceptos es posible definir la noción de cover, el conjunto $\mathbf{D}_I$ es un cover de $\mathbf{M}_J$ si $\mathbf{M}_J \subseteq efectos(\mathbf{D}_I)$. El concepto de cover implica que $\mathbf{D}_I$ puede causar a $\mathbf{M}_J$, lo cual lleva al concepto de explicación, un conjunto $\mathbf{D}_I$ es una explicación de $\mathbf{M}^+$ para un problema de diagnóstico $\mathbf{P}$, si $\mathbf{D}_I$ es cover de $\mathbf{M}^+$ y satisface un criterio de parsimonia o criterio de simplicidad predefinido.

Un cover es parsimonioso o simple si satisface el principio de parsimonia o principio de simplicidad (comúnmente conocido como navaja de Ocam u *Ocam's razor*). Este principio dice que las soluciones simples son preferidas en lugar de las soluciones complejas, esto es intuitivamente satisfactorio porque es bien sabido que es más probable que ocurran fallas simples en lugar de fallas múltiples o complejas. Hasta la fecha se han propuesto en la literatura muchos criterios para evaluar la simplicidad de un cover, algunos de los criterios usualmente utilizados son [121]:

- Criterio de desorden simple: un cover $\mathbf{D}_I$ de $\mathbf{M}^+$ es una explicación si contiene únicamente un desorden.
- Criterio minimalista: un cover $\mathbf{D}_I$ de $\mathbf{M}^+$ es una explicación si tiene la mínima cardinalidad entre todos los covers de $\mathbf{M}^+$.
- Criterio de no-redundancia: un cover $\mathbf{D}_I$ de $\mathbf{M}^+$ es una explicación si no tiene subconjuntos propios que también sean covers de $\mathbf{M}^+$.

- Criterio de relevancia: un cover $\mathbf{D}_1$ de $\mathbf{M}^+$ es una explicación si contiene desórdenes causalmente asociados con al menos una de las manifestaciones de $\mathbf{M}^+$.

Claramente un cover de desorden simple es un cover mínimo, un cover mínimo es un cover no redundante, un cover no redundante es un cover relevante y un cover relevante es un obviamente un cover. La selección del criterio de simplicidad depende de las características de cada problema de diagnóstico. En muchos problemas de diagnóstico, interesa conocer todas las explicaciones plausibles para un caso, en lugar de una única explicación, porque las alternativas pueden afectar el curso de las acciones tomadas por el encargado del diagnóstico. Esto lleva a la definición de solución del problema, la solución de un problema de diagnóstico $\mathbf{P}$, designada como $\mathbf{Sol}(\mathbf{P})$ es el conjunto de todas las explicaciones de $\mathbf{M}^+$.

En este trabajo se utiliza el criterio de no-redundancia como criterio de simplicidad, como se sugiere en [130]. Si interesa desarrollar algoritmos generales para problemas de diagnóstico el criterio de no-redundancia aparenta ser la elección preferible debido que del conjunto de explicaciones no-redundantes se puede generar el conjunto de todas las explicaciones mínimas (seleccionando los conjuntos con mínima cardinalidad) y el conjunto de explicaciones relevantes (adicionando sistemáticamente nuevos desórdenes a algunas explicaciones no-redundantes). Por ejemplo, para la base de conocimiento de la Fig. D.1, si se observan las manifestaciones $\mathbf{M}^+ = \{m_2, m_5\}$, entonces:

- $\mathbf{D}_1 = \{d_4\}$ es una explicación mínima.
- $\mathbf{D}_2 = \{d_2, d_3\}$ es una explicación no-redundante.
- $\mathbf{D}_3 = \{d_1, d_2, d_4\}$ es una explicación relevante.
- $\mathbf{Sol}(\mathbf{P}) = \{\{d_4\}, \{d_2, d_3\}, \{d_1, d_3\}\}$ es la solución del problema de diagnóstico utilizando el criterio de no-redundancia como criterio de parsimonia o criterio de simplicidad.

D.3 Algoritmos de solución.

Existen básicamente dos metodologías para desarrollar algoritmos para la PSCT, dependiendo de cómo se presenta el conjunto $\mathbf{M}^+$. El conjunto puede ser presentado previamente al algoritmo, en este caso se dice que el algoritmo es no interactivo. Esto aparenta ser adecuado en situaciones en las cuales se puede supervisar todas las manifestaciones posibles, de tal forma que se conoce que manifestaciones están presentes en cada momento. En la segunda alternativa, las observaciones en $\mathbf{M}^+$ son presentadas al algoritmo una a la vez, posiblemente como respuestas a preguntas realizadas por el encargado del diagnóstico. Esta metodología aparenta ser más apropiada en situaciones en las que es muy costoso obtener todas las observaciones [131], esta es la situación típica observada en los SDEE. En [130], [131] se presenta un algoritmo interactivo eficiente [122], el cual utiliza el criterio de no-redundancia y el concepto de generadores, este es el algoritmo utilizado en este trabajo y es explicado brevemente a continuación.

Si $\mathbf{g}_1, \mathbf{g}_2, \dots, \mathbf{g}_m$ son conjuntos disjuntos de $\mathbf{D}$, entonces:

- $\mathbf{G}_1 = \{\mathbf{g}_1, \mathbf{g}_2, \dots, \mathbf{g}_m\}$ es un *generador*.
- $[\mathbf{G}_1] = \{\{d_1, d_2, \dots, d_m\} \mid d_i \in \mathbf{g}_i\}$ es la *clase* generada por $\mathbf{G}_1$.

- $\mathbf{G} = \{\mathbf{G}_1, \mathbf{G}_2, \dots, \mathbf{G}_m\}$ es un *conjunto generador* si cada $\mathbf{G}_i$ es un generador y $[\mathbf{G}_i] \cap [\mathbf{G}_j] = \emptyset$.

Se definen las operaciones *residuo* (*res*), *división* (*div*), *residuo aumentado* (*augres*) y *revisión* (*revise*), donde $\mathbf{G}$ y $\mathbf{Q}$ son *conjuntos generadores*, $\mathbf{G}_i \in \mathbf{G}$ y $\mathbf{Q}_j \in \mathbf{Q}$ son *generadores*, $\mathbf{S}_D \subseteq \mathbf{D}$ es un conjunto de desórdenes y $\mathbf{q}_j \in \mathbf{Q}_j$ es también un conjunto de desórdenes. A pesar de estar definida en términos de *generador* y *conjunto de generadores* la operación *div* se puede definir fácilmente en términos de conjuntos de explicaciones. Dados un conjunto de explicaciones para un conjunto de manifestaciones ($\mathbf{M}^+$), representado como un *conjunto de generadores* ($\mathbf{G}$) y los desórdenes evocados por una nueva manifestación m , representados como un conjunto de desórdenes ($\mathbf{S}_D$), la operación *div* calcula las explicaciones de $\mathbf{M}^+$ que también explican la nueva manifestación m .

$$div(\mathbf{G}, \mathbf{S}_D) = \bigcup_{\mathbf{G}_i \in \mathbf{G}} div(\mathbf{G}_i, \mathbf{S}_D) \quad (D.10)$$

$$div(\mathbf{G}, \mathbf{S}_D) = \left\{ \mathbf{Q}_k \mid \mathbf{Q}_k = \{\mathbf{q}_{k1}, \mathbf{q}_{k1}, \dots, \mathbf{q}_{kn}\} \right\} \quad (D.11)$$

$$\mathbf{q}_{kj} = \begin{cases} \mathbf{g}_j - \mathbf{S}_D & \text{si } j < k \\ \mathbf{g}_j \cap \mathbf{S}_D & \text{si } j = k \\ \mathbf{g}_j & \text{si } j > k \end{cases} \quad (D.12)$$

La operación *res* es de alguna manera el dual de la operación *div*, dado un conjunto de explicaciones de $\mathbf{M}^+$ y los desórdenes evocados por una nueva manifestación m , la operación *res* calcula las explicaciones de $\mathbf{M}^+$ que no explican la nueva manifestación m .

$$res(\mathbf{G}, \mathbf{S}_D) = \bigcup_{\mathbf{G}_i \in \mathbf{G}} res(\mathbf{G}_i, \mathbf{S}_D) \quad (D.13)$$

$$res(\mathbf{G}, \mathbf{S}_D) = \begin{cases} \{\{\mathbf{g}_1 - \mathbf{S}_D\}, \dots, \{\mathbf{g}_n - \mathbf{S}_D\}\} & \text{si } \mathbf{g}_n - \mathbf{S}_D \neq \emptyset, \quad 1 \leq i \leq n \\ \emptyset & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (D.14)$$

Las operaciones *div* y *res* son extendidas para tratar con conjuntos de conjuntos de desórdenes (representados como *generador* y *conjunto de generadores*) como su segundo argumento.

$$div(\mathbf{G}, \mathbf{Q}_j) = \bigcup_{\mathbf{G}_i \in \mathbf{G}} div(\mathbf{G}_i, \mathbf{Q}_j) \quad (D.15)$$

$$div(\mathbf{G}_i, \mathbf{Q}_j) = \begin{cases} \{\mathbf{G}_i\} & \text{si } \mathbf{Q}_j = \emptyset \\ div(div(\mathbf{G}_i, \mathbf{q}_j), \mathbf{Q}_j - \{\mathbf{q}_j\}) & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (D.16)$$

$$res(\mathbf{G}, \mathbf{Q}) = \begin{cases} \{\mathbf{G}\} & \text{si } \mathbf{Q} = \emptyset \\ res(res(\mathbf{G}, \mathbf{Q}_j), \mathbf{Q} - \{\mathbf{Q}_j\}) & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (\text{D.17})$$

$$res(\mathbf{G}, \mathbf{Q}_j) = \bigcup_{\mathbf{G}_I \in \mathbf{G}} res(\mathbf{G}_I, \mathbf{Q}_j) \quad (\text{D.18})$$

$$res(\mathbf{G}_I, \mathbf{Q}_j) = \begin{cases} \{\emptyset\} & \text{si } \mathbf{Q} = \emptyset \\ res(\mathbf{G}_I, \mathbf{q}_j) \cup res(div(\mathbf{G}_I, \mathbf{q}_j), \mathbf{Q}_j - \{\mathbf{q}_j\}) & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (\text{D.19})$$

La operación *augres* es una modificación de la operación *res* que en lugar de calcular el conjunto de explicaciones de $\mathbf{M}^+$ que no explican la nueva manifestación m , adiciona nuevos desórdenes a esas explicaciones para que también expliquen $\mathbf{M}^+ \cup \{m\}$.

$$augres(\mathbf{G}, \mathbf{S}_D) = \bigcup_{\mathbf{G}_I \in \mathbf{G}} augres(\mathbf{G}_I, \mathbf{S}_D) \quad (\text{D.20})$$

$$augres(\mathbf{G}_I, \mathbf{S}_D) = \begin{cases} \{\{\mathbf{g}_1 - \mathbf{S}_D\}, \dots, \{\mathbf{g}_n - \mathbf{S}_D\}, \mathbf{A}\} & \text{si } \mathbf{g}_i - \mathbf{S}_D \neq \emptyset, \mathbf{A} \neq \emptyset \quad 1 \leq i \leq n \\ \emptyset & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (\text{D.21})$$

$$\mathbf{A} = \mathbf{S}_D - \bigcup_{i=1}^n \mathbf{g}_i \quad (\text{D.22})$$

Así, dado el conjunto de explicaciones de $\mathbf{M}^+$ y un conjunto de desórdenes evocados por una nueva manifestación m , el conjunto de explicaciones de $\mathbf{M}^+ \cup \{m\}$ puede ser obtenido por una combinación de la operación *div* y la operación *augres*. Esto puede hacerse mediante la operación *revise* (D.23)-(D.25). Utilizando estas operaciones, cuando se conocen las explicaciones de $\mathbf{M}^+$ y una nueva manifestación $\{m\}$ es dada, se pueden calcular las explicaciones de $\mathbf{M}^+ \cup \{m\}$.

$$revise(\mathbf{G}, \mathbf{S}_D) = \mathbf{Q} \cap res(\mathbf{Q}', \mathbf{Q}) \quad (\text{D.23})$$

$$\mathbf{Q} = div(\mathbf{G}, \mathbf{S}_D) \quad (\text{D.24})$$

$$\mathbf{Q}' = augres(\mathbf{G}, \mathbf{S}_D) \quad (\text{D.25})$$

Se observa entonces que repitiendo las operaciones indicadas (incrementando los elementos de $\mathbf{M}^+$ uno por uno) se puede obtener el conjunto de todas las explicaciones de $\mathbf{M}^+$, i.e., la solución del problema de diagnóstico $\mathbf{P}$. Debido a que generalmente hay más de una explicación, es necesario seleccionar la mejor. Para esta selección se utilizan las probabilidades c_{ij} de la relación de causalidad $\mathbf{C}$. La mejor explicación es aquella que maximiza la “medida de probabilidad relativa” (D.26)-(D.29).

$$F(\mathbf{D}_I, \mathbf{M}^+) = F_1(\mathbf{D}_I, \mathbf{M}^+) \cdot F_2(\mathbf{D}_I, \mathbf{M}^+) \cdot F_3(\mathbf{D}_I, \mathbf{M}^+) \quad (\text{D.26})$$

$$F_1(\mathbf{D}_I, \mathbf{M}^+) = \prod_{m_j \in M^+} \left(1 - \prod_{d_i \in D_I} (1 - c_{ij}) \right) \quad (\text{D.27})$$

$$F_2(\mathbf{D}_I, \mathbf{M}^+) = \prod_{m_l \in M^-} \prod_{d_i \in D_I} (1 - c_{il}) \quad (\text{D.28})$$

$$F_3(\mathbf{D}_I, \mathbf{M}^+) = \prod_{d_i \in D_I} \frac{p_i}{1 - p_i} \quad (\text{D.29})$$

Donde (D.27) es la probabilidad que las manifestaciones incluidas en $\mathbf{M}^+$ sean observadas dado el conjunto $\mathbf{D}_I$ de desórdenes. (D.28) es la probabilidad que las manifestaciones no incluidas en $\mathbf{M}^+$ no sean observadas dado el conjunto $\mathbf{D}_I$ de desórdenes. (D.29) es la probabilidad previa de que el conjunto de desórdenes $\mathbf{D}_I$ (y no otros) se presenten, donde p_i es la probabilidad previa de ocurrencia de cada desorden. Se asume que los desórdenes identificados en $\mathbf{D}_I$ son independientes entre ellos. Las principales desventajas de la utilización de (D.26)-(D.29) son:

- En muchos SDEE no se dispone de los datos necesarios para calcular con precisión las probabilidades utilizadas [119]
- Para la aplicación de (D.26) es necesario que las relaciones de causalidad entre desórdenes y manifestaciones ($\mathbf{C}$) sean invariantes en el tiempo⁵³ [179], i.e., cada vez que d_i ocurre causa m_j con la misma probabilidad c_{ij} .

Por estas desventajas en este trabajo se utiliza el modelo basado en ecuaciones relacionales fuzzy, para la formulación del problema de diagnóstico. Este modelo es más general y flexible y como se explica en [115]-[118], considera al modelo de Peng y Reggia como un caso especial. En este trabajo solamente se utiliza el algoritmo basado en la PSCT para generar las explicaciones del problema de diagnóstico $\mathbf{P}$. Luego se selecciona la mejor explicación utilizando (4.25)-(4.26).

⁵³ Evidentemente esta asunción no aplica en algunos dominios, sin embargo en [176] se afirma que los resultados obtenidos utilizando (D.26) pueden ser buenas aproximaciones de la situación real.

ANEXO E

E Tablas y resultados adicionales.

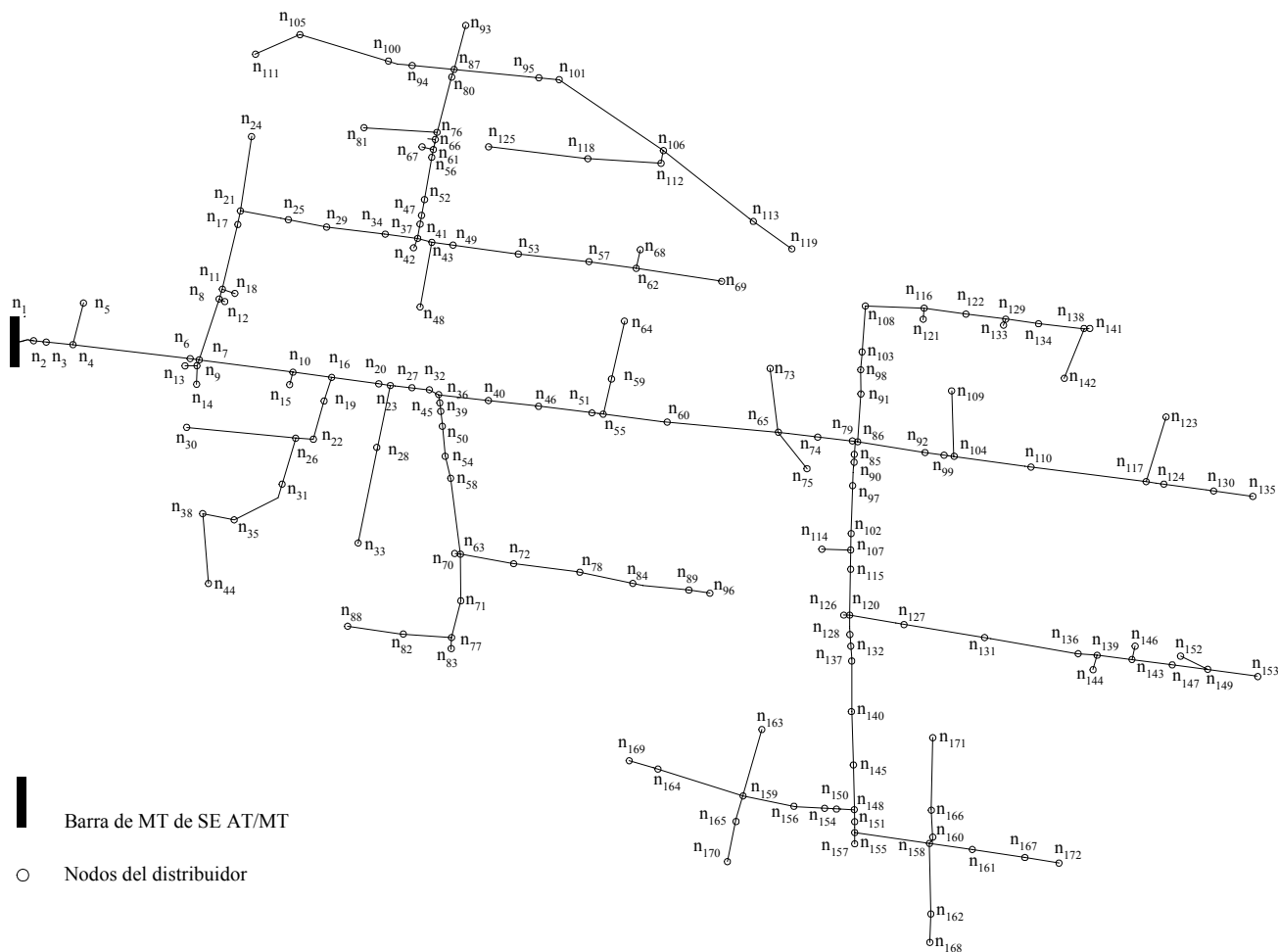


Fig. E.1 Diagrama unifilar del distribuidor NACNOR. Por simplicidad no se incluyen los dispositivos de protección (ver Tabla E.1). La numeración de los nodos de la Fig. E.1 solamente es válida para las Tablas E.1-E.3. En las Tablas y Figuras de los ejemplos restantes de este trabajo se utiliza la numeración de la Fig. 5.1.

Tabla E.1 Dispositivos de protección asociados a los nodos del distribuidor de la Fig. E.1.
Obs. Los nodos n_1 , n_2 , n_3 , n_4 , n_6 y n_7 son protegidos por DI.

d_i	n_k	d_i	n_k	d_i	n_k	d_i	n_k
F1301	n_5	F1325	$n_{28} \ n_{33}$	F1352	$n_{31} \ n_{35} \ n_{38}$	F1340	n_{109}
R021	$n_8 \ n_{11} \ n_{12} \ n_{17}$ $n_{21} \ n_{25} \ n_{29} \ n_{34}$	F1342	$n_{32} \ n_{36} \ n_{39} \ n_{40} \ n_{46}$ $n_{51} \ n_{55} \ n_{60} \ n_{65} \ n_{74}$	F1322	$n_{72} \ n_{78}$	F1785	$n_{110} \ n_{117} \ n_{123} \ n_{124}$ $n_{130} \ n_{135} \ n_{150}$
F1312	$n_9 \ n_{13} \ n_{14}$	F1333	$n_{57} \ n_{62} \ n_{68} \ n_{69}$	F1371	$n_{82} \ n_{88}$	F1364	$n_{113} \ n_{119}$
F1326	$n_{10} \ n_{16}$	F1303	$n_{80} \ n_{87} \ n_{93}$ $n_{94} \ n_{100} \ n_{105}$	F1369	$n_{99} \ n_{97} \ n_{102} \ n_{107}$ $n_{115} \ n_{120} \ n_{126} \ n_{128}$	F1895	$n_{118} \ n_{125}$
F883	n_{18}	F1332	n_{81}	F1304	$n_{91} \ n_{98} \ n_{103} \ n_{108}$	F1327	$n_{136} \ n_{139} \ n_{143} \ n_{144}$ $n_{147} \ n_{149} \ n_{152} \ n_{153}$
F2402	n_{24}	F1384	$n_{26} \ n_{30}$	F1367	$n_{92} \ n_{99} \ n_{104}$	F1320	$n_{150} \ n_{154} \ n_{156}$ $n_{159} \ n_{164} \ n_{169} \ n_{163}$
F1355	$n_{37} \ n_{41} \ n_{42}$	F1368	$n_{45} \ n_{50} \ n_{54} \ n_{58} \ n_{63}$ $n_{70} \ n_{71} \ n_{77} \ n_{83}$	F1331	$n_{106} \ n_{112}$	F1349	$n_{158} \ n_{160}$
F1357	n_{15}	F1310	$n_{59} \ n_{64}$	F1329	n_{44}	F1381	n_{142}
F1382	n_{19}	F1361	n_{73}	F1379	$n_{84} \ n_{89} \ n_{96}$	F1662	n_{146}
R032	$n_{20} \ n_{23} \ n_{27}$	F1273	n_{75}	F2446	n_{114}	F1366	$n_{165} \ n_{170}$
F1348	$n_{43} \ n_{48} \ n_{49} \ n_{53}$	F1677	$n_{79} \ n_{85} \ n_{86}$	F1337	$n_{127} \ n_{131}$	F1664	$n_{161} \ n_{167} \ n_{172}$
F2403	$n_{47} \ n_{52} \ n_{56}$ $n_{61} \ n_{66} \ n_{76} \ n_{67}$	F1759	$n_{95} \ n_{101}$	F1339	$n_{132} \ n_{137} \ n_{140} \ n_{145}$ $n_{148} \ n_{151} \ n_{155} \ n_{157}$	F1862	$n_{162} \ n_{168}$
F1345	n_{22}	F1377	n_{111}	F1318	$n_{116} \ n_{121} \ n_{122} \ n_{129}$ $n_{133} \ n_{134} \ n_{138} \ n_{141}$	F1374	$n_{166} \ n_{171}$

Tabla E.2 Impedancias de secuencia (Ω) del distribuidor de la Fig. E.1, cada sección es definida por un nodo inicial (n_i) y final (n_f).

n_i	n_f	R_T^+	X_T^+	R_T^0	X_T^0	n_i	n_f	R_T^+	X_T^+	R_T^0	X_T^0	n_i	n_f	R_T^+	X_T^+	R_T^0	X_T^0
n ₁	n ₂	0.096	0.022	0.104	0.083	n ₅₅	n ₅₉	3.716	0.469	3.716	1.488	n ₁₀₈	n ₁₁₆	0.641	0.239	0.737	1.132
n ₂	n ₃	0.066	0.047	0.081	0.211	n ₅₅	n ₆₀	0.731	0.201	0.675	1.004	n ₁₁₀	n ₁₁₇	1.340	0.470	1.445	1.974
n ₃	n ₄	0.129	0.092	0.159	0.412	n ₅₆	n ₆₁	0.053	0.028	0.062	0.124	n ₁₁₂	n ₁₁₈	7.992	1.008	7.992	3.200
n ₄	n ₅	6.254	0.789	6.254	2.504	n ₅₇	n ₆₂	0.428	0.159	0.491	0.755	n ₁₁₃	n ₁₁₉	5.854	0.738	5.854	2.344
n ₄	n ₆	0.644	0.458	0.793	2.057	n ₅₈	n ₆₃	1.394	0.383	1.287	1.915	n ₁₁₅	n ₁₂₀	0.484	0.259	0.573	1.139
n ₆	n ₇	0.005	0.003	0.006	0.015	n ₅₉	n ₆₄	2.607	0.329	2.607	1.044	n ₁₁₆	n ₁₂₁	0.024	0.009	0.027	0.042
n ₇	n ₈	0.617	0.330	0.730	1.451	n ₆₀	n ₆₅	1.516	0.417	1.400	2.083	n ₁₁₆	n ₁₂₂	0.372	0.139	0.428	0.657
n ₇	n ₉	0.080	0.030	0.092	0.141	n ₆₁	n ₆₆	0.039	0.021	0.046	0.092	n ₁₁₇	n ₁₂₃	9.251	1.167	9.251	3.704
n ₇	n ₁₀	0.486	0.346	0.598	1.552	n ₆₁	n ₆₇	0.013	0.007	0.015	0.030	n ₁₁₇	n ₁₂₄	0.107	0.038	0.116	0.158
n ₈	n ₁₁	0.100	0.054	0.118	0.235	n ₆₂	n ₆₈	0.242	0.090	0.278	0.427	n ₁₁₈	n ₁₂₅	9.281	1.171	9.281	3.716
n ₈	n ₁₂	0.024	0.013	0.029	0.057	n ₆₂	n ₆₉	0.790	0.294	0.907	1.394	n ₁₂₀	n ₁₂₆	0.017	0.005	0.016	0.023
n ₉	n ₁₃	0.008	0.003	0.009	0.013	n ₆₃	n ₇₀	0.038	0.010	0.035	0.052	n ₁₂₀	n ₁₂₇	0.597	0.164	0.552	0.821
n ₉	n ₁₄	0.026	0.010	0.030	0.046	n ₆₃	n ₇₁	0.861	0.237	0.795	1.183	n ₁₂₀	n ₁₂₈	0.114	0.061	0.135	0.269
n ₁₀	n ₁₅	0.169	0.063	0.194	0.299	n ₆₃	n ₇₂	0.656	0.180	0.606	0.902	n ₁₂₂	n ₁₂₉	0.374	0.139	0.430	0.661
n ₁₀	n ₁₆	0.196	0.139	0.241	0.624	n ₆₅	n ₇₃	0.847	0.315	0.973	1.496	n ₁₂₄	n ₁₃₀	0.561	0.197	0.605	0.827
n ₁₁	n ₁₇	0.634	0.339	0.750	1.491	n ₆₅	n ₇₄	0.093	0.035	0.107	0.164	n ₁₂₇	n ₁₃₁	1.214	0.334	1.122	1.669
n ₁₁	n ₁₈	0.026	0.014	0.030	0.060	n ₆₅	n ₇₅	0.550	0.205	0.632	0.971	n ₁₂₈	n ₁₃₂	0.014	0.008	0.017	0.033
n ₁₆	n ₁₉	0.461	0.127	0.426	0.634	n ₆₆	n ₇₆	0.035	0.019	0.041	0.082	n ₁₂₉	n ₁₃₃	0.031	0.012	0.036	0.055
n ₁₆	n ₂₀	0.233	0.166	0.287	0.744	n ₇₁	n ₇₇	0.697	0.192	0.644	0.958	n ₁₂₉	n ₁₃₄	0.306	0.114	0.352	0.541
n ₁₇	n ₂₁	0.167	0.089	0.197	0.392	n ₇₂	n ₇₈	0.850	0.234	0.785	1.168	n ₁₃₀	n ₁₃₅	0.519	0.182	0.560	0.764
n ₁₉	n ₂₂	0.696	0.191	0.643	0.956	n ₇₄	n ₇₉	0.459	0.245	0.543	1.079	n ₁₃₁	n ₁₃₆	8.442	1.065	8.442	3.380
n ₂₀	n ₂₃	0.160	0.044	0.148	0.220	n ₇₆	n ₈₀	0.630	0.337	0.745	1.481	n ₁₃₂	n ₁₃₇	0.307	0.164	0.363	0.721
n ₂₁	n ₂₄	1.373	0.377	1.268	1.886	n ₇₆	n ₈₁	0.921	0.253	0.851	1.265	n ₁₃₄	n ₁₃₈	0.404	0.151	0.464	0.714
n ₂₁	n ₂₅	0.283	0.151	0.334	0.665	n ₇₇	n ₈₂	0.453	0.169	0.521	0.800	n ₁₃₆	n ₁₃₉	1.958	0.247	1.958	0.784
n ₂₂	n ₂₆	0.215	0.059	0.198	0.295	n ₇₇	n ₈₃	0.066	0.018	0.061	0.090	n ₁₃₇	n ₁₄₀	0.962	0.264	0.888	1.321
n ₂₃	n ₂₇	0.022	0.016	0.029	0.075	n ₇₈	n ₈₄	0.875	0.240	0.808	1.202	n ₁₃₈	n ₁₄₁	0.015	0.006	0.017	0.027
n ₂₃	n ₂₈	1.182	0.325	1.091	1.624	n ₇₉	n ₈₅	0.453	0.125	0.419	0.623	n ₁₃₈	n ₁₄₂	7.193	0.907	7.193	2.880
n ₂₅	n ₂₉	0.327	0.175	0.386	0.768	n ₇₉	n ₈₆	0.017	0.009	0.020	0.040	n ₁₃₉	n ₁₄₃	3.367	0.425	3.367	1.348
n ₂₆	n ₃₀	1.429	0.393	1.320	1.964	n ₈₀	n ₈₇	0.079	0.042	0.093	0.185	n ₁₃₉	n ₁₄₄	3.097	0.391	3.097	1.240
n ₂₆	n ₃₁	1.115	0.306	1.030	1.532	n ₈₂	n ₈₈	0.684	0.188	0.632	0.940	n ₁₄₀	n ₁₄₅	0.954	0.262	0.881	1.310
n ₂₇	n ₃₂	0.236	0.126	0.279	0.554	n ₈₄	n ₈₉	0.416	0.155	0.478	0.735	n ₁₄₃	n ₁₄₆	7.003	0.883	7.003	2.804
n ₂₈	n ₃₃	1.742	0.479	1.609	2.394	n ₈₅	n ₉₀	0.022	0.006	0.021	0.031	n ₁₄₃	n ₁₄₇	3.716	0.469	3.716	1.488
n ₂₉	n ₃₄	0.394	0.211	0.466	0.927	n ₈₆	n ₉₁	0.908	0.249	0.839	1.247	n ₁₄₅	n ₁₄₈	0.848	0.233	0.783	1.165
n ₃₁	n ₃₅	0.985	0.271	0.910	1.354	n ₈₆	n ₉₂	0.739	0.259	0.797	1.089	n ₁₄₇	n ₁₄₉	3.646	0.460	3.646	1.460
n ₃₂	n ₃₆	0.187	0.051	0.173	0.257	n ₈₇	n ₉₃	0.840	0.231	0.776	1.154	n ₁₄₈	n ₁₅₀	0.170	0.047	0.157	0.234
n ₃₄	n ₃₇	0.226	0.121	0.268	0.533	n ₈₇	n ₉₄	0.351	0.188	0.415	0.825	n ₁₄₈	n ₁₅₁	0.320	0.088	0.295	0.439
n ₃₅	n ₃₈	0.411	0.113	0.380	0.565	n ₈₇	n ₉₅	0.678	0.252	0.779	1.197	n ₁₄₉	n ₁₅₂	6.693	0.844	6.693	2.680
n ₃₆	n ₃₉	0.047	0.013	0.044	0.065	n ₈₉	n ₉₆	0.275	0.076	0.254	0.378	n ₁₄₉	n ₁₅₃	4.765	0.601	4.765	1.908
n ₃₆	n ₄₀	0.339	0.182	0.402	0.798	n ₉₀	n ₉₇	0.093	0.026	0.086	0.128	n ₁₅₀	n ₁₅₄	0.025	0.007	0.023	0.034
n ₃₇	n ₄₁	0.010	0.005	0.012	0.023	n ₉₁	n ₉₈	0.424	0.117	0.392	0.583	n ₁₅₁	n ₁₅₅	0.097	0.027	0.090	0.133
n ₃₇	n ₄₂	0.062	0.033	0.073	0.145	n ₉₂	n ₉₉	0.282	0.099	0.304	0.415	n ₁₅₄	n ₁₅₆	0.544	0.149	0.502	0.747
n ₃₇	n ₄₃	0.119	0.064	0.141	0.281	n ₉₄	n ₁₀₀	0.035	0.019	0.041	0.082	n ₁₅₅	n ₁₅₇	0.052	0.014	0.048	0.072
n ₃₈	n ₄₄	10.150	1.280	10.150	4.064	n ₉₅	n ₁₀₁	0.273	0.102	0.313	0.481	n ₁₅₅	n ₁₅₈	7.243	0.914	7.243	2.900
n ₃₉	n ₄₅	0.024	0.006	0.022	0.032	n ₉₇	n ₁₀₂	1.179	0.324	1.089	1.620	n ₁₅₆	n ₁₅₉	0.689	0.189	0.636	0.947
n ₄₀	n ₄₆	0.336	0.180	0.397	0.790	n ₉₈	n ₁₀₃	0.291	0.080	0.269	0.400	n ₁₅₈	n ₁₆₀	0.819	0.103	0.819	0.328
n ₄₁	n ₄₇	0.006	0.003	0.007	0.013	n ₉₉	n ₁₀₄	0.060	0.021	0.065	0.089	n ₁₅₈	n ₁₆₁	4.156	0.524	4.156	1.664
n ₄₃	n ₄₈	0.647	0.346	0.765	1.521	n ₁₀₀	n ₁₀₅	0.765	0.409	0.905	1.799	n ₁₅₈	n ₁₆₂	10.080	1.271	10.080	4.036
n ₄₃	n ₄₉	0.116	0.062	0.138	0.274	n ₁₀₁	n ₁₀₆	1.689	0.629	1.941	2.983	n ₁₅₉	n ₁₆₃	9.471	1.195	9.471	3.792
n ₄₅	n ₅₀	0.460	0.126	0.425	0.632	n ₁₀₂	n ₁₀₇	0.244	0.067	0.225	0.335	n ₁₅₉	n ₁₆₄	1.231	0.338	1.137	1.692
n ₄₆	n ₅₁	0.417	0.223	0.494	0.982	n ₁₀₃	n ₁₀₈	0.882	0.242	0.814	1.211	n ₁₅₉	n ₁₆₅	3.666	0.462	3.666	1.468
n ₄₇	n ₅₂	0.327	0.175	0.386	0.768	n ₁₀₄	n ₁₀₉	1.200	0.330	1.108	1.649	n ₁₅₉	n ₁₆₆	4.735	0.597	4.735	1.896
n ₄₉	n ₅₃	0.430	0.230	0.509	1.012	n ₁₀₄	n ₁₁₀	0.787	0.276	0.849	1.159	n ₁₆₁	n ₁₆₇	5.065	0.639	5.065	2.028
n ₅₀	n ₅₄	0.593	0.163	0.548	0.815	n ₁₀₅	n ₁₁₁	0.904	0.248	0.835	1.242	n ₁₆₂	n ₁₆₈	3.926	0.495	3.926	1.572
n ₅₁	n ₅₅	0.046	0.017	0.053	0.081	n ₁₀₆	n ₁₁₂	0.169	0.063	0.194	0.299	n ₁₆₄	n ₁₆₉	0.328	0.090	0.303	0.450
n ₅₂	n ₅₆	0.309	0.165	0.365	0.726	n ₁₀₆	n ₁₁₃	12.907	1.628	12.907	5.168	n ₁₆₅	n ₁₇₀	6.054	0.764	6.054	2.424
n ₅₃	n ₅₇	0.712	0.265	0.818	1.257	n ₁₀₇	n ₁₁₄	0.260	0.097	0.299	0.460	n ₁₆₆	n ₁₇₁	9.990	1.260	9.990	4.000
n ₅₄	n ₅₈	0.440	0.121	0.407	0.605	n ₁₀₇	n ₁₁₅	0.297	0.082	0.275	0.409	n ₁₆₇	n ₁₇₂	3.417	0.431	3.417	1.368

Tabla E.3 Potencias nodales activa (kW) y reactiva (kVAR) del distribuidor de la Fig. E.1.

n_k	P_k	Q_k	n_k	P_k	Q_k	n_k	P_k	Q_k	n_k	P_k	Q_k
n_1	0.00	0.00	n_{44}	4.50	2.18	n_{87}	0.00	0.00	n_{130}	0.00	0.00
n_2	0.00	0.00	n_{45}	0.00	0.00	n_{88}	3.10	1.50	n_{131}	8.30	4.02
n_3	4.20	2.03	n_{46}	0.10	0.05	n_{89}	0.00	0.00	n_{132}	0.00	0.00
n_4	0.00	0.00	n_{47}	0.00	0.00	n_{90}	0.00	0.00	n_{133}	1.20	0.58
n_5	1.90	0.92	n_{48}	13.10	6.34	n_{91}	7.10	3.44	n_{134}	0.50	0.24
n_6	41.40	20.04	n_{49}	1.20	0.58	n_{92}	1.10	0.53	n_{135}	3.30	1.60
n_7	0.00	0.00	n_{50}	0.00	0.00	n_{93}	5.20	2.52	n_{136}	0.50	0.24
n_8	0.00	0.00	n_{51}	6.30	3.05	n_{94}	0.20	0.10	n_{137}	3.90	1.89
n_9	0.00	0.00	n_{52}	31.30	15.15	n_{95}	10.90	5.28	n_{138}	0.00	0.00
n_{10}	0.00	0.00	n_{53}	7.10	3.44	n_{96}	5.30	2.57	n_{139}	0.00	0.00
n_{11}	0.00	0.00	n_{54}	1.40	0.68	n_{97}	14.10	6.82	n_{140}	1.20	0.58
n_{12}	1.30	0.63	n_{55}	0.00	0.00	n_{98}	0.00	0.00	n_{141}	0.80	0.39
n_{13}	212.90	103.04	n_{56}	36.40	17.62	n_{99}	1.70	0.82	n_{142}	1.50	0.73
n_{14}	0.90	0.44	n_{57}	0.20	0.10	n_{100}	0.00	0.00	n_{143}	0.00	0.00
n_{15}	152.60	73.86	n_{58}	2.40	1.16	n_{101}	10.00	4.84	n_{144}	0.50	0.24
n_{16}	0.00	0.00	n_{59}	0.30	0.15	n_{102}	13.50	6.53	n_{145}	2.20	1.06
n_{17}	5.40	2.61	n_{60}	2.80	1.36	n_{103}	7.80	3.78	n_{146}	1.80	0.87
n_{18}	5.20	2.52	n_{61}	0.00	0.00	n_{104}	0.00	0.00	n_{147}	0.00	0.00
n_{19}	204.50	98.98	n_{62}	0.00	0.00	n_{105}	0.00	0.00	n_{148}	0.00	0.00
n_{20}	42.50	20.57	n_{63}	0.00	0.00	n_{106}	0.00	0.00	n_{149}	1.40	0.68
n_{21}	0.00	0.00	n_{64}	0.50	0.24	n_{107}	0.00	0.00	n_{150}	0.00	0.00
n_{22}	0.70	0.34	n_{65}	0.00	0.00	n_{108}	16.50	7.99	n_{151}	0.00	0.00
n_{23}	0.00	0.00	n_{66}	0.00	-300.00	n_{109}	1.90	0.92	n_{152}	0.00	0.00
n_{24}	7.60	3.68	n_{67}	0.00	0.00	n_{110}	7.00	3.39	n_{153}	0.00	0.00
n_{25}	1.30	0.63	n_{68}	4.40	2.13	n_{111}	7.20	3.48	n_{154}	0.00	0.00
n_{26}	0.00	0.00	n_{69}	2.80	1.36	n_{112}	26.50	12.83	n_{155}	0.00	0.00
n_{27}	0.00	0.00	n_{70}	4.50	2.18	n_{113}	2.60	1.26	n_{156}	2.80	1.36
n_{28}	6.00	2.90	n_{71}	5.10	2.47	n_{114}	17.60	8.52	n_{157}	3.00	1.45
n_{29}	0.00	0.00	n_{72}	4.20	2.03	n_{115}	4.90	2.37	n_{158}	0.00	0.00
n_{30}	1.40	0.68	n_{73}	4.60	2.23	n_{116}	0.00	0.00	n_{159}	0.00	0.00
n_{31}	3.60	1.74	n_{74}	25.20	12.20	n_{117}	0.00	0.00	n_{160}	0.00	0.00
n_{32}	4.90	2.37	n_{75}	3.10	1.50	n_{118}	0.60	0.29	n_{161}	3.90	1.89
n_{33}	3.90	1.89	n_{76}	0.00	0.00	n_{119}	3.50	1.69	n_{162}	2.60	1.26
n_{34}	3.10	1.50	n_{77}	0.00	0.00	n_{120}	0.00	0.00	n_{163}	0.00	0.00
n_{35}	0.00	0.00	n_{78}	4.50	2.18	n_{121}	6.30	3.05	n_{164}	2.20	1.06
n_{36}	0.00	0.00	n_{79}	0.00	0.00	n_{122}	0.20	0.10	n_{165}	0.40	0.19
n_{37}	0.00	0.00	n_{80}	38.30	18.54	n_{123}	4.40	2.13	n_{166}	2.80	1.36
n_{38}	4.00	1.94	n_{81}	10.60	5.13	n_{124}	2.40	16.16	n_{167}	0.50	0.24
n_{39}	0.00	0.00	n_{82}	0.00	0.00	n_{125}	1.70	0.82	n_{168}	5.10	2.47
n_{40}	1.40	0.68	n_{83}	16.50	7.99	n_{126}	3.10	1.50	n_{169}	0.00	0.00
n_{41}	0.00	0.00	n_{84}	5.00	2.42	n_{127}	2.90	1.40	n_{170}	2.30	1.11
n_{42}	33.90	16.41	n_{85}	0.00	0.00	n_{128}	0.00	0.00	n_{171}	0.80	0.39
n_{43}	0.00	0.00	n_{86}	0.00	0.00	n_{129}	0.00	0.00	n_{172}	0.90	0.44

Tabla E.4 Parámetros de los conjuntos fuzzy gaussianos que modelan la incertidumbre relativa (IR) de los d_i del distribuidor de la Fig. 5.1.

Ubicación	Conjuntos fuzzy gaussianos tipo 2		
	m	σ_1	σ_2
P	P_i	$0.04 \cdot P_i$	$0.08 \cdot P_i$
M	P_i	$0.08 \cdot P_i$	$0.16 \cdot P_i$
G	P_i	$0.16 \cdot P_i$	$0.24 \cdot P_i$

Tabla E.5 Parámetros de conjuntos fuzzy gaussianos tipo 1 y tipo 2 que modelan Z_f .

Números fuzzy gaussianos tipo 1		Números fuzzy gaussianos tipo 2		
m	σ_1	m	σ_1	σ_2
15	4	15	3	5

Tabla E.6 Parámetros de los conjuntos fuzzy gaussianos que modelan la base de reglas del T2-FLS utilizado para calcular I_i^Q .

V.	Términos Lingüísticos	Conjuntos fuzzy gaussianos tipo 2		
		m	σ_1	σ_2
W_i	Malo	0.000	0.185	0.235
	Regular	0.500	0.185	0.235
	Bueno	1.000	0.185	0.235
F_i^O	Bajo	0.000	0.185	0.235
	Medio	0.500	0.185	0.235
	Alto	1.000	0.185	0.235
T_i^M	Corto	0.000	0.185	0.235
	Medio	0.500	0.185	0.235
	Largo	1.000	0.185	0.235
I_i^Q	Insignificante	0.000	0.04	0.065
	Muy Pequeño	0.125	0.04	0.065
	Pequeño	0.250	0.04	0.065
	Medio Pequeño	0.375	0.04	0.065
	Medio	0.500	0.04	0.065
	Medio Grande	0.625	0.04	0.065
	Grande	0.750	0.04	0.065
	Muy Grande	0.875	0.04	0.065
	Excesivo	1.000	0.04	0.065

Tabla E.7 Parámetros de los conjuntos fuzzy gaussianos tipo 2 que modelan las entradas cualitativas del T2-FLS utilizado para calcular I_i^Q .

Términos Lingüísticos			Conjuntos fuzzy gaussianos tipo 2		
W_i	F_i^O	T_i^M	m	σ_1	σ_2
Pésimo	Insignificante	Insignificante	0.000	0.04	0.065
Muy Malo	Muy Baja	Muy Corto	0.125	0.04	0.065
Malo	Baja	Corto	0.250	0.04	0.065
Medio Malo	Media Baja	Medio Corto	0.375	0.04	0.065
Regular	Media	Medio	0.500	0.04	0.065
Medio Bueno	Media Alta	Medio Largo	0.625	0.04	0.065
Bueno	Alta	Largo	0.750	0.04	0.065
Muy Bueno	Muy Alta	Muy Largo	0.875	0.04	0.065
Excelente	Extra Alta	Extra Largo	1.000	0.04	0.065

Tabla E.8 Parámetros de los conjuntos fuzzy gaussianos que modelan la base de reglas del T2-FLS utilizado para calcular $\mu_{c_i}^+$.

V.	Términos Lingüísticos	Conjuntos fuzzy gaussianos tipo 2		
		m	σ_1	σ_2
I_i^P	Pequeño	0.000	0.185	0.235
	Mediano	0.500	0.185	0.235
	Grande	1.000	0.185	0.235
I_i^I	Pequeño	0.000	0.185	0.235
	Mediano	0.500	0.185	0.235
	Grande	1.000	0.185	0.235
I_i^Q	Pequeño	0.000	0.185	0.235
	Mediano	0.500	0.185	0.235
	Grande	1.000	0.185	0.235
$\mu_{c_i}^+$	Insignificante	0.000	0.04	0.065
	Muy Pequeño	0.125	0.04	0.065
	Pequeño	0.250	0.04	0.065
	Medio Pequeño	0.375	0.04	0.065
	Medio	0.500	0.04	0.065
	Medio Grande	0.625	0.04	0.065
	Grande	0.750	0.04	0.065
	Muy Grande	0.875	0.04	0.065
	Excesivo	1.000	0.04	0.065

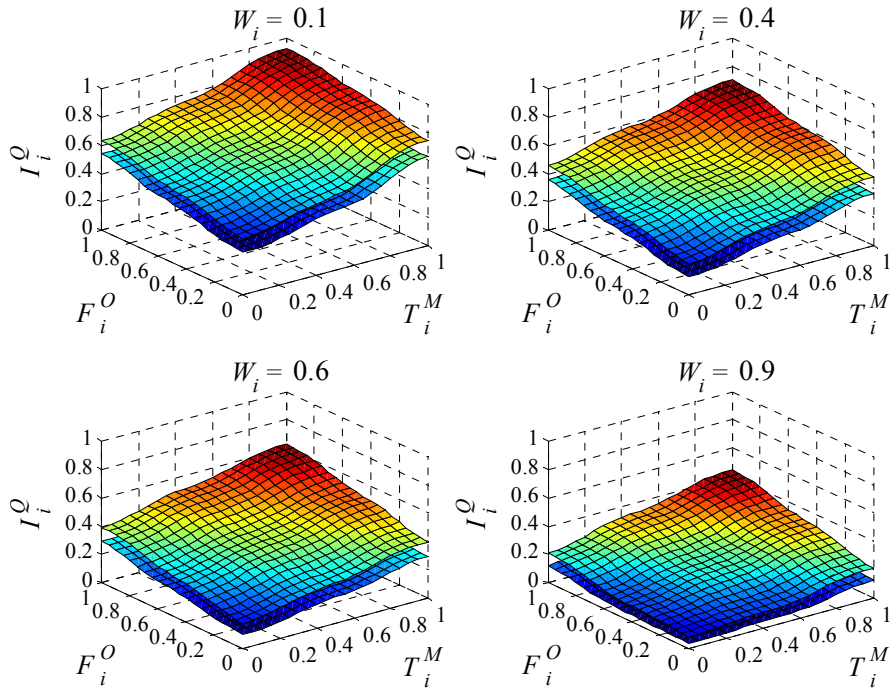


Fig. E.2 Gráfica de I_i^Q en función de W_i , F_i^O y T_i^M (entradas cuantitativas), se utilizan los conjuntos fuzzy gaussianos tipo 2 de la Tabla E.4 para modelar la base de reglas del T2-FLS.

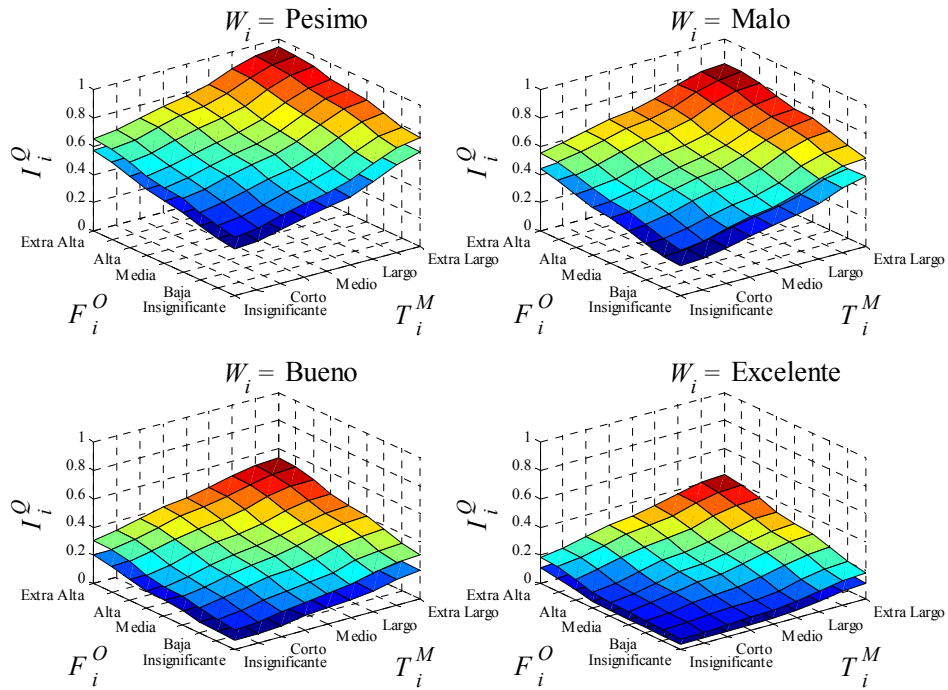


Fig. E.3 Gráfica de I_i^Q en función de W_i , F_i^O y T_i^M (entradas cualitativas), se utilizan los conjuntos fuzzy gaussianos tipo 2 de la Tabla E.4 para modelar la base de reglas del T2-FLS y los de la Tabla E.5 para modelar las entradas cualitativas.

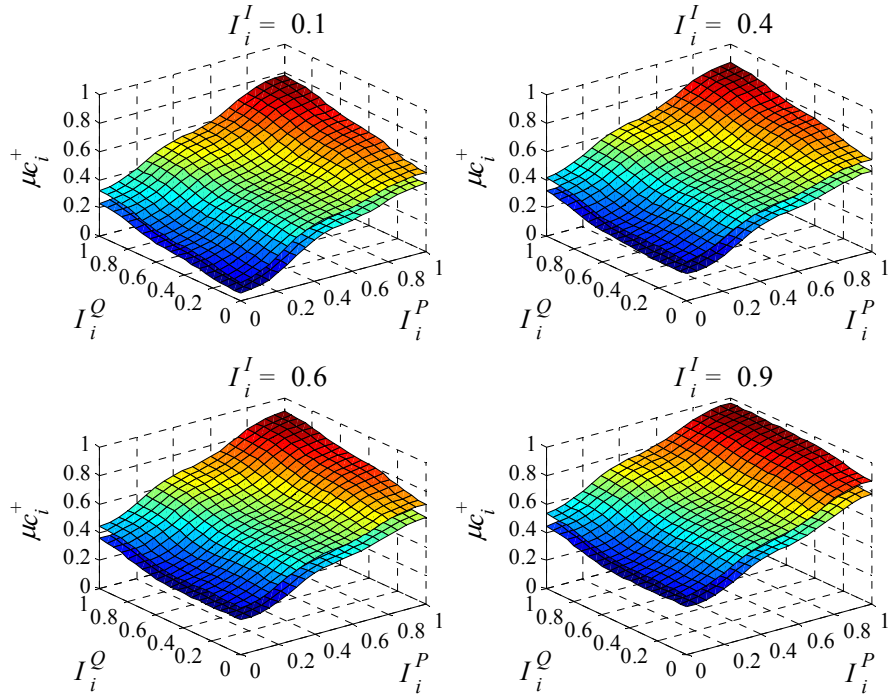


Fig. E.4 Gráfica de $\mu_{c_i}^+$ en función de I_i^P , I_i^I e I_i^Q (entradas cuantitativas e I_i^I constante), se utilizan los conjuntos fuzzy gaussianos tipo 2 de la Tabla E.6 para modelar la base de reglas del T2-FLS.

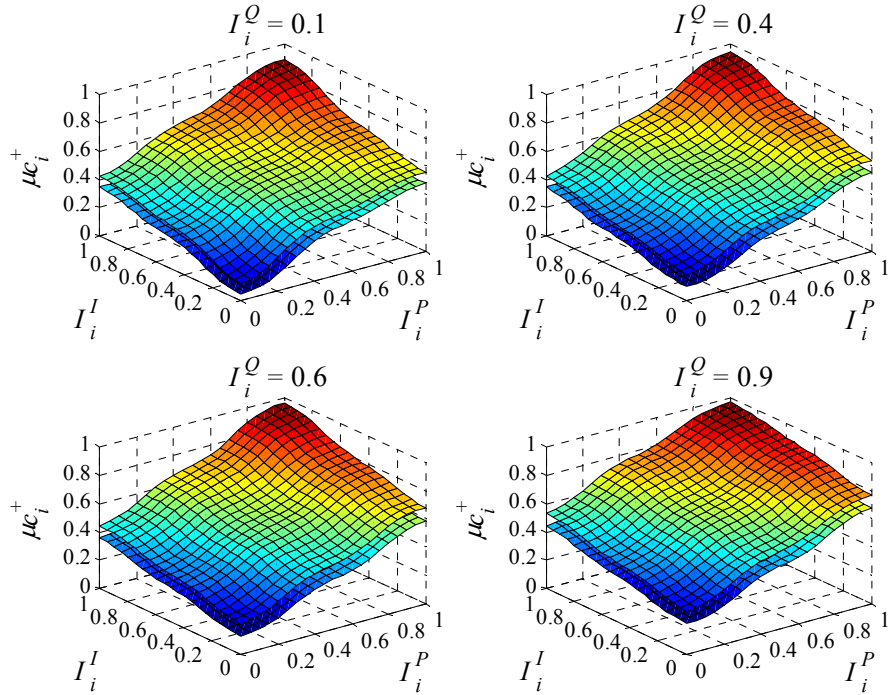


Fig. E.5 Gráfica de $\mu_{c_i}^+$ en función de I_i^P , I_i^I e I_i^Q (entradas cuantitativas e I_i^I constante), se utilizan los conjuntos fuzzy gaussianos tipo 2 de la Tabla E.6 para modelar la base de reglas del T2-FLS.

Tabla E.9 Resultados del modelo de TR para el caso 1 (R021), se utilizan conjuntos fuzzy gaussianos tipo 2 para modelar IR , Z_f y la base de reglas y entradas cualitativas de los T2-FLS que calculan I_i^O y μ_{ci}^+ .

$\Delta P_{3\phi}$ (kW)	$I_{sc1\phi}$ (A)	d_i	I_{iL}^P	I_{iU}^P	I_{iL}^I	I_{iU}^I	I_{iL}^O	I_{iU}^O	$\mu_{ci}^+{}_L$	$\mu_{ci}^+{}_C$	$\mu_{ci}^+{}_U$	Términos Lingüísticos
260	350	R021	0.585	0.874	0.114	0.458	0.208	0.314	0.489	0.534	0.578	Mediano
		R032	0.000	0.075	0.031	0.287	0.251	0.380	0.140	0.187	0.234	Muy Pequeño
	400	R021	0.585	0.874	0.700	0.879	0.208	0.314	0.633	0.685	0.738	Medio Grande
		R032	0.000	0.075	0.370	0.699	0.251	0.380	0.232	0.292	0.351	Pequeño
	450	R021	0.585	0.874	0.996	0.999	0.208	0.314	0.699	0.748	0.797	Grande
		R032	0.000	0.075	0.886	0.957	0.251	0.380	0.340	0.388	0.435	Medio Pequeño
	500	R021	0.585	0.875	1.000	1.000	0.208	0.314	0.700	0.748	0.797	Grande
		R032	0.000	0.075	0.988	0.996	0.251	0.380	0.356	0.399	0.443	Medio Pequeño
	550	R021	0.585	0.874	0.856	0.945	0.208	0.314	0.671	0.725	0.779	Grande
		R032	0.000	0.075	0.769	0.910	0.251	0.380	0.318	0.366	0.414	Medio Pequeño
	600	R021	0.585	0.874	0.592	0.828	0.208	0.314	0.611	0.661	0.710	Medio Grande
		R032	0.000	0.075	0.491	0.774	0.251	0.380	0.267	0.317	0.367	Medio Pequeño
	650	R021	0.585	0.874	0.368	0.698	0.208	0.314	0.547	0.611	0.675	Medio Grande
		R032	0.000	0.075	0.285	0.636	0.251	0.380	0.199	0.260	0.321	Pequeño
280	350	R021	0.722	0.922	0.114	0.458	0.208	0.314	0.520	0.566	0.612	Medio Grande
		R032	0.012	0.330	0.031	0.287	0.251	0.380	0.225	0.270	0.316	Pequeño
	400	R021	0.722	0.922	0.700	0.879	0.208	0.314	0.671	0.726	0.780	Grande
		R032	0.012	0.330	0.370	0.699	0.251	0.380	0.307	0.368	0.429	Medio Pequeño
	450	R021	0.722	0.922	0.996	0.999	0.208	0.314	0.744	0.794	0.844	Grande
		R032	0.012	0.330	0.886	0.957	0.251	0.380	0.415	0.463	0.511	Mediano
	500	R021	0.722	0.922	1.000	1.000	0.208	0.314	0.745	0.795	0.845	Grande
		R032	0.012	0.330	0.988	0.996	0.251	0.380	0.430	0.474	0.519	Mediano
	550	R021	0.722	0.922	0.856	0.945	0.208	0.314	0.714	0.770	0.825	Grande
		R032	0.012	0.330	0.769	0.910	0.251	0.380	0.393	0.442	0.492	Mediano
	600	R021	0.722	0.922	0.592	0.828	0.208	0.314	0.646	0.699	0.752	Grande
		R032	0.012	0.330	0.491	0.774	0.251	0.380	0.346	0.395	0.444	Medio Pequeño
	650	R021	0.722	0.922	0.368	0.698	0.208	0.314	0.582	0.649	0.715	Medio Grande
		R032	0.012	0.330	0.285	0.636	0.251	0.380	0.277	0.337	0.397	Medio Pequeño

Tabla E.10 Resultados del modelo de TR para el caso 3 (F1339 y F1368), se utilizan conjuntos fuzzy gaussianos tipo 2 para modelar IR , Z_f y la base de reglas y entradas cualitativas de los T2-FLS que calculan I_i^O y μc_i^+ .

$\Delta P_{1\varphi}$ (kW)	$I_{sc1\varphi}$ (A)	d_i	I_{iL}^P	I_{iU}^P	I_{iL}^I	I_{iU}^I	I_{iL}^O	I_{iU}^O	$\mu c_i^+{}_L$	$\mu c_i^+{}_C$	$\mu c_i^+{}_U$	Términos Lingüísticos
10	250	F1339	0.754	0.882	0.022	0.255	0.334	0.466	0.516	0.565	0.615	Medio Grande
		F1348	0.915	0.978	0.000	0.002	0.208	0.314	0.507	0.550	0.594	Mediano
		F1349	0.000	0.002	0.993	0.998	0.251	0.380	0.347	0.385	0.424	Medio Pequeño
		F1364	0.000	0.000	0.997	0.999	0.208	0.314	0.347	0.385	0.423	Medio Pequeño
	300	F1339	0.754	0.882	0.999	1.000	0.334	0.466	0.769	0.817	0.865	Muy Grande
		F1348	0.915	0.978	0.003	0.125	0.208	0.314	0.516	0.563	0.610	Medio Grande
		F1331	0.248	0.705	0.166	0.523	0.208	0.314	0.338	0.416	0.494	Medio Pequeño
		F1304	0.228	0.518	0.244	0.602	0.251	0.380	0.332	0.399	0.465	Medio Pequeño
	350	F1339	0.754	0.882	0.953	0.983	0.334	0.466	0.761	0.811	0.861	Grande
		F1348	0.915	0.978	0.254	0.611	0.208	0.314	0.595	0.655	0.716	Medio Grande
		F1331	0.248	0.705	0.995	0.998	0.208	0.314	0.527	0.605	0.683	Medio Grande
		F1304	0.228	0.518	0.995	0.998	0.251	0.380	0.493	0.549	0.604	Mediano
	400	F1348	0.915	0.978	0.921	0.971	0.208	0.314	0.802	0.853	0.904	Muy Grande
		F1339	0.754	0.882	0.271	0.625	0.334	0.466	0.571	0.637	0.702	Medio Grande
		F1331	0.248	0.705	0.532	0.797	0.208	0.314	0.436	0.517	0.599	Mediano
		F1304	0.228	0.518	0.758	0.905	0.251	0.380	0.453	0.513	0.573	Mediano
13	250	F1304	0.937	0.972	0.000	0.034	0.251	0.380	0.526	0.571	0.615	Medio Grande
		F1339	0.668	0.836	0.022	0.255	0.334	0.466	0.486	0.534	0.581	Mediano
		F1349	0.000	0.000	0.993	0.998	0.251	0.380	0.347	0.385	0.423	Medio Pequeño
		F1364	0.000	0.000	0.997	0.999	0.208	0.314	0.347	0.385	0.423	Medio Pequeño
	300	F1339	0.668	0.836	0.999	1.000	0.334	0.466	0.726	0.773	0.821	Grande
		F1304	0.937	0.972	0.244	0.602	0.251	0.380	0.611	0.669	0.727	Medio Grande
		F1331	0.288	0.733	0.166	0.523	0.208	0.314	0.365	0.444	0.522	Mediano
		F1320	0.000	0.000	0.997	0.999	0.251	0.380	0.347	0.385	0.423	Medio Pequeño
	350	F1304	0.937	0.972	0.995	0.998	0.251	0.380	0.839	0.882	0.925	Muy Grande
		F1339	0.668	0.836	0.953	0.983	0.334	0.466	0.718	0.768	0.817	Grande
		F1331	0.288	0.733	0.995	0.998	0.208	0.314	0.559	0.639	0.720	Medio Grande
		F1368	0.008	0.295	0.733	0.894	0.290	0.418	0.377	0.427	0.476	Medio Pequeño
	400	F1304	0.937	0.972	0.758	0.905	0.251	0.380	0.772	0.823	0.874	Muy Grande
		F1339	0.668	0.836	0.271	0.625	0.334	0.466	0.538	0.601	0.664	Medio Grande
		F1331	0.288	0.733	0.532	0.797	0.208	0.314	0.464	0.546	0.628	Mediano
		F1368	0.008	0.295	0.991	0.997	0.290	0.418	0.420	0.465	0.510	Mediano

Tabla E.11 Resultados del modelo de TR para el caso 3 (F1339 y F1368), se utilizan conjuntos fuzzy gaussianos tipo 2 para modelar IR , Z_f y la base de reglas y entradas cualitativas de los T2-FLS que calculan I_i^O y μ_{ci}^+ .

$\Delta P_{1\varphi}$ (kW)	$I_{sc1\varphi}$ (A)	d_i	I_{iL}^P	I_{iU}^P	I_{iL}^I	I_{iU}^I	I_{iL}^O	I_{iU}^O	$\mu_{ci}^+{}_L$	$\mu_{ci}^+{}_C$	$\mu_{ci}^+{}_U$	Términos Lingüísticos
16	350	F1304	0.608	0.801	0.995	0.998	0.251	0.380	0.687	0.738	0.788	Grande
		F1368	0.629	0.890	0.733	0.894	0.290	0.418	0.666	0.716	0.766	Grande
		F1759	0.251	0.707	0.653	0.858	0.314	0.439	0.472	0.551	0.629	Mediano
	400	F1368	0.629	0.890	0.990	0.997	0.290	0.418	0.726	0.770	0.814	Grande
		F1304	0.608	0.801	0.758	0.905	0.251	0.380	0.637	0.693	0.748	Grande
		F1759	0.251	0.707	0.974	0.991	0.314	0.439	0.536	0.613	0.690	Medio Grande
	450	F1368	0.629	0.890	0.996	0.998	0.290	0.418	0.727	0.771	0.814	Grande
		F1304	0.608	0.801	0.231	0.590	0.251	0.380	0.499	0.557	0.615	Mediano
		F1759	0.251	0.707	0.491	0.774	0.314	0.439	0.440	0.521	0.603	Mediano
	500	F1368	0.629	0.890	0.916	0.969	0.290	0.418	0.712	0.760	0.807	Grande
		F1304	0.608	0.801	0.046	0.330	0.251	0.380	0.468	0.513	0.558	Mediano
		F1759	0.251	0.707	0.148	0.503	0.314	0.439	0.353	0.427	0.501	Medio Pequeño
	550	F1368	0.629	0.890	0.610	0.837	0.290	0.418	0.639	0.687	0.735	Medio Grande
		F1304	0.608	0.801	0.008	0.175	0.251	0.380	0.439	0.486	0.534	Mediano
		F1759	0.251	0.707	0.036	0.303	0.314	0.439	0.324	0.397	0.471	Medio Pequeño
	600	F1368	0.629	0.890	0.341	0.679	0.290	0.418	0.560	0.625	0.690	Medio Grande
		F1304	0.608	0.801	0.001	0.092	0.251	0.380	0.427	0.474	0.520	Mediano
		F1759	0.000	0.000	0.930	0.974	0.314	0.439	0.339	0.380	0.421	Medio Pequeño
	650	F1368	0.629	0.890	0.176	0.536	0.290	0.418	0.521	0.569	0.617	Medio Grande
		F1304	0.608	0.801	0.000	0.049	0.251	0.380	0.424	0.469	0.514	Mediano
		F1759	0.251	0.707	0.002	0.104	0.314	0.439	0.288	0.364	0.440	Medio Pequeño
19	350	F1759	0.935	0.983	0.653	0.858	0.314	0.439	0.752	0.801	0.851	Grande
		F1368	0.487	0.835	0.733	0.894	0.290	0.418	0.624	0.680	0.736	Medio Grande
		F1304	0.062	0.291	0.995	0.998	0.251	0.380	0.420	0.466	0.513	Mediano
	400	F1759	0.935	0.983	0.974	0.991	0.314	0.439	0.846	0.889	0.932	Muy Grande
		F1368	0.487	0.835	0.990	0.997	0.290	0.418	0.679	0.730	0.781	Grande
		F1304	0.062	0.291	0.758	0.905	0.251	0.380	0.381	0.432	0.483	Medio Pequeño
	450	F1759	0.935	0.983	0.491	0.774	0.314	0.439	0.708	0.763	0.818	Grande
		F1368	0.487	0.835	0.996	0.998	0.290	0.418	0.680	0.731	0.781	Grande
		F1325	0.000	0.000	0.997	0.999	0.251	0.380	0.347	0.385	0.423	Medio Pequeño
	500	F1368	0.487	0.835	0.916	0.969	0.290	0.418	0.666	0.720	0.774	Grande
		F1759	0.935	0.983	0.148	0.503	0.314	0.439	0.607	0.655	0.703	Medio Grande
		F883	0.000	0.000	0.999	0.999	0.372	0.511	0.351	0.391	0.430	Medio Pequeño
	550	F1368	0.487	0.835	0.610	0.837	0.290	0.418	0.599	0.652	0.705	Medio Grande
		F1759	0.935	0.983	0.036	0.303	0.314	0.439	0.578	0.624	0.670	Medio Grande
		F1312	0.000	0.000	0.944	0.979	0.208	0.314	0.339	0.379	0.419	Medio Pequeño
	600	F1759	0.935	0.983	0.008	0.178	0.314	0.439	0.555	0.603	0.651	Medio Grande
		F1368	0.487	0.835	0.341	0.679	0.290	0.418	0.520	0.590	0.660	Medio Grande
		F1312	0.000	0.000	0.724	0.890	0.208	0.314	0.298	0.341	0.384	Medio Pequeño
	650	F1759	0.935	0.983	0.002	0.104	0.314	0.439	0.545	0.592	0.640	Medio Grande
		F1368	0.487	0.835	0.176	0.536	0.290	0.418	0.485	0.538	0.592	Mediano
		F1312	0.000	0.000	0.492	0.775	0.208	0.314	0.256	0.302	0.349	Pequeño

Tabla E.12 Resultados del modelo de TR para el caso 4 (F1369 y F2403), se utilizan conjuntos fuzzy gaussianos tipo 2 para modelar IR , Z_f y la base de reglas y entradas cualitativas de los T2-FLS que calculan I_i^O y μ_{ci}^+ .

$\Delta P_{1\phi}$ (kW)	$I_{sc1\phi}$ (A)	d_i	I_{iL}^P	I_{iU}^P	I_{iL}^I	I_{iU}^I	I_{iL}^O	I_{iU}^O	$\mu_{ci}^+{}_L$	$\mu_{ci}^+{}_C$	$\mu_{ci}^+{}_U$	Términos Lingüísticos
30	300	F1369	0.784	0.898	0.332	0.673	0.208	0.314	0.578	0.651	0.725	Medio Grande
		F1339	0.000	0.000	0.999	1.000	0.334	0.466	0.349	0.388	0.427	Medio Pequeño
	350	F1369	0.784	0.898	1.000	1.000	0.208	0.314	0.761	0.814	0.868	Muy Grande
		F1303	0.166	0.638	0.727	0.891	0.251	0.380	0.440	0.509	0.578	Mediano
	400	F1369	0.784	0.898	0.853	0.945	0.208	0.314	0.729	0.788	0.848	Grande
		F1303	0.166	0.638	0.998	0.999	0.251	0.380	0.490	0.553	0.617	Mediano
	450	F1369	0.784	0.898	0.312	0.658	0.208	0.314	0.570	0.642	0.714	Medio Grande
		F1303	0.166	0.638	0.699	0.879	0.251	0.380	0.434	0.503	0.571	Mediano
	500	F1369	0.784	0.898	0.073	0.390	0.208	0.314	0.523	0.570	0.618	Medio Grande
		F1303	0.166	0.638	0.279	0.632	0.251	0.380	0.328	0.408	0.488	Medio Pequeño
36	300	F1369	0.918	0.963	0.332	0.673	0.208	0.314	0.621	0.690	0.759	Grande
		F1303	0.975	0.994	0.036	0.303	0.251	0.380	0.574	0.616	0.658	Medio Grande
	350	F1369	0.918	0.963	1.000	1.000	0.208	0.314	0.820	0.867	0.914	Muy Grande
		F1303	0.975	0.994	0.727	0.891	0.251	0.380	0.772	0.820	0.869	Muy Grande
	400	F1303	0.975	0.994	0.998	0.999	0.251	0.380	0.852	0.892	0.932	Muy Grande
		F1369	0.918	0.963	0.853	0.945	0.208	0.314	0.783	0.837	0.891	Muy Grande
	450	F1303	0.975	0.994	0.699	0.879	0.251	0.380	0.764	0.812	0.859	Grande
		F1369	0.918	0.963	0.312	0.658	0.208	0.314	0.613	0.681	0.748	Medio Grande
	500	F1303	0.975	0.994	0.279	0.632	0.251	0.380	0.628	0.689	0.749	Grande
		F1369	0.918	0.963	0.073	0.390	0.208	0.314	0.561	0.605	0.649	Medio Grande

Tabla E.13 Resultados del modelo de TR para el caso 4 (F1369 y F2403), se utilizan conjuntos fuzzy gaussianos tipo 2 para modelar IR , Z_f y la base de reglas y entradas cualitativas de los T2-FLS que calculan I_i^O y μ_{ci}^+ .

$\Delta P_{1\phi}$ (kW)	$I_{sc1\phi}$ (A)	d_i	I_{iL}^P	I_{iU}^P	I_{iL}^I	I_{iU}^I	I_{iL}^O	I_{iU}^O	$\mu_{ci}^+{}_L$	$\mu_{ci}^+{}_C$	$\mu_{ci}^+{}_U$	Términos Lingüísticos
57	350	F1677	0.883	0.969	0.778	0.914	0.208	0.314	0.749	0.805	0.861	Grande
		F2403	0.693	0.912	0.257	0.613	0.208	0.314	0.535	0.594	0.654	Medio Grande
	400	F1677	0.883	0.969	0.932	0.975	0.208	0.314	0.794	0.846	0.898	Muy Grande
		F2403	0.693	0.912	0.923	0.972	0.208	0.314	0.721	0.773	0.826	Grande
	450	F2403	0.693	0.912	0.981	0.993	0.208	0.314	0.732	0.782	0.832	Grande
		F1677	0.883	0.969	0.412	0.727	0.208	0.314	0.645	0.708	0.772	Grande
	500	F2403	0.693	0.912	0.653	0.858	0.208	0.314	0.651	0.704	0.756	Grande
		F1677	0.883	0.969	0.113	0.456	0.208	0.314	0.561	0.608	0.654	Medio Grande
	550	F2403	0.693	0.912	0.319	0.663	0.208	0.314	0.552	0.620	0.689	Medio Grande
		F1677	0.883	0.969	0.026	0.268	0.208	0.314	0.533	0.580	0.627	Medio Grande
65	600	F2403	0.693	0.912	0.136	0.488	0.208	0.314	0.516	0.563	0.610	Medio Grande
		F1677	0.883	0.969	0.006	0.155	0.208	0.314	0.513	0.561	0.610	Mediano
	350	F2403	0.739	0.927	0.257	0.613	0.208	0.314	0.546	0.608	0.670	Medio Grande
		F1677	0.067	0.510	0.778	0.914	0.208	0.314	0.425	0.479	0.533	Mediano
	400	F2403	0.739	0.927	0.923	0.972	0.208	0.314	0.737	0.791	0.844	Grande
		F1677	0.067	0.510	0.932	0.975	0.208	0.314	0.453	0.505	0.556	Mediano
	450	F2403	0.739	0.927	0.981	0.993	0.208	0.314	0.748	0.799	0.850	Grande
		F1312	0.268	0.720	0.650	0.856	0.208	0.314	0.472	0.554	0.636	Mediano
	500	F2403	0.739	0.927	0.653	0.858	0.208	0.314	0.665	0.719	0.773	Grande
		F1312	0.268	0.720	0.977	0.992	0.208	0.314	0.539	0.621	0.703	Medio Grande
65	550	F2403	0.739	0.927	0.319	0.663	0.208	0.314	0.565	0.634	0.704	Medio Grande
		F1312	0.268	0.720	0.944	0.979	0.208	0.314	0.533	0.617	0.700	Medio Grande
65	600	F2403	0.739	0.927	0.136	0.488	0.208	0.314	0.527	0.575	0.623	Medio Grande
		F1312	0.268	0.720	0.724	0.890	0.208	0.314	0.487	0.571	0.655	Medio Grande

Tabla E.14 Resultados del modelo de TR para el caso 5 (F1355), se utilizan conjuntos fuzzy gaussianos tipo 2 para modelar IR , Z_f y la base de reglas y entradas cualitativas de los T2-FLS que calculan I_i^Q y μ_{ci}^+ .

$\Delta P_{I\varphi}$ (kW)	$I_{scl\varphi}$ (A)	d_i	I_{iL}^P	I_{iU}^P	I_{iL}^I	I_{iU}^I	I_{iL}^Q	I_{iU}^Q	$\mu_{ci}^+{}_L$	$\mu_{ci}^+{}_C$	$\mu_{ci}^+{}_U$	Términos Lingüísticos
75	0	F1355	0.566	0.867	0.000	0.000	0.208	0.314	0.421	0.464	0.507	Mediano
		F1382	0.461	0.824	0.000	0.000	0.208	0.314	0.391	0.442	0.493	Mediano
		F1342	0.156	0.628	0.000	0.000	0.208	0.314	0.224	0.285	0.346	Pequeño
		F1312	0.142	0.614	0.000	0.000	0.208	0.314	0.201	0.280	0.339	Pequeño

Tabla E.15 Resultados del modelo de TR para el caso 6 (F1342), se utilizan conjuntos fuzzy gaussianos tipo 2 para modelar IR , Z_f y la base de reglas y entradas cualitativas de los T2-FLS que calculan I_i^Q y μ_{ci}^+ .

$\Delta P_{I\varphi}$ (kW)	$I_{scl\varphi}$ (A)	d_i	I_{iL}^P	I_{iU}^P	I_{iL}^I	I_{iU}^I	I_{iL}^Q	I_{iU}^Q	$\mu_{ci}^+{}_L$	$\mu_{ci}^+{}_C$	$\mu_{ci}^+{}_U$	Términos Lingüísticos
80	0	F1355	0.955	0.988	0.000	0.000	0.208	0.314	0.515	0.557	0.598	Mediano
		F1342	0.473	0.829	0.000	0.000	0.208	0.314	0.395	0.445	0.495	Mediano
		F1382	0.011	0.326	0.000	0.000	0.208	0.314	0.172	0.217	0.263	Pequeño
		F1312	0.000	0.169	0.000	0.000	0.208	0.314	0.114	0.162	0.211	Muy Pequeño

Tabla E.16 Resultados del modelo de TR para el caso 6 (F1342), se utilizan conjuntos fuzzy gaussianos tipo 2 para modelar IR , Z_f y la base de reglas y entradas cualitativas de los T2-FLS que calculan I_i^Q y μ_{ci}^+ .

$\Delta P_{I\varphi}$ (kW)	$I_{scl\varphi}$ (A)	d_i	I_{iL}^P	I_{iU}^P	I_{iL}^I	I_{iU}^I	I_{iL}^Q	I_{iU}^Q	$\mu_{ci}^+{}_L$	$\mu_{ci}^+{}_C$	$\mu_{ci}^+{}_U$	Términos Lingüísticos
70	0	F1312	0.985	0.996	0.000	0.000	0.208	0.314	0.520	0.561	0.601	Mediano
		F1382	0.880	0.968	0.000	0.000	0.208	0.314	0.498	0.543	0.588	Mediano
		F2403	0.198	0.667	0.000	0.000	0.208	0.314	0.237	0.304	0.371	Pequeño
		F1355	0.188	0.658	0.000	0.000	0.208	0.314	0.234	0.299	0.365	Pequeño
		F1677	0.223	0.514	0.000	0.000	0.208	0.314	0.238	0.294	0.350	Pequeño
		F1342	0.031	0.420	0.000	0.000	0.208	0.314	0.196	0.240	0.285	Pequeño

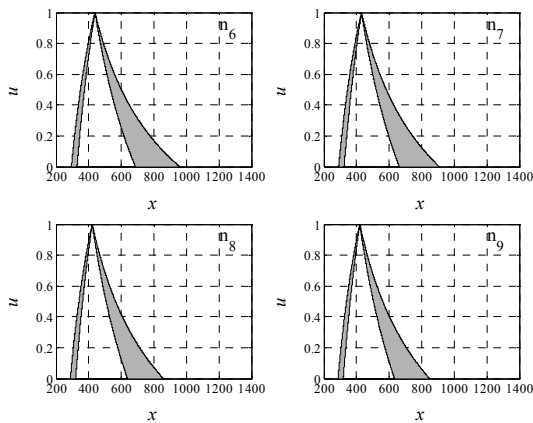


Fig. E.6 CFF de puntos n_6 - n_9 (Z_f número fuzzy triangular tipo 2).

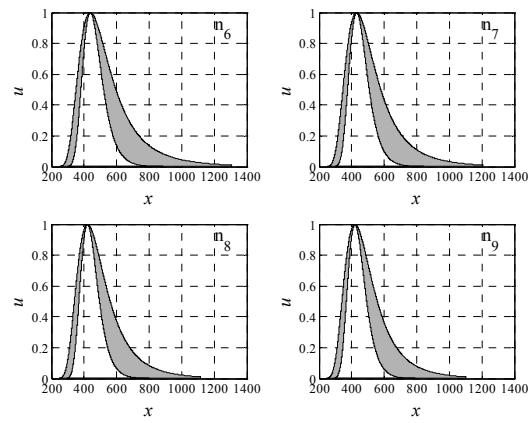


Fig. E.7 CFF de puntos n_6 - n_9 (Z_f número fuzzy gaussiano tipo 2).

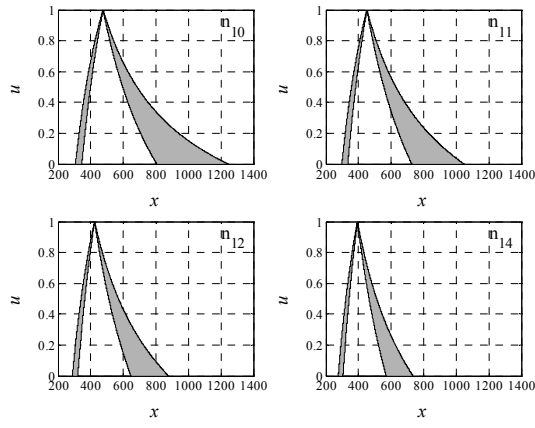


Fig. E.8 CFF de puntos n_{10} - n_{14}
(Z_f número fuzzy triangular tipo 2).

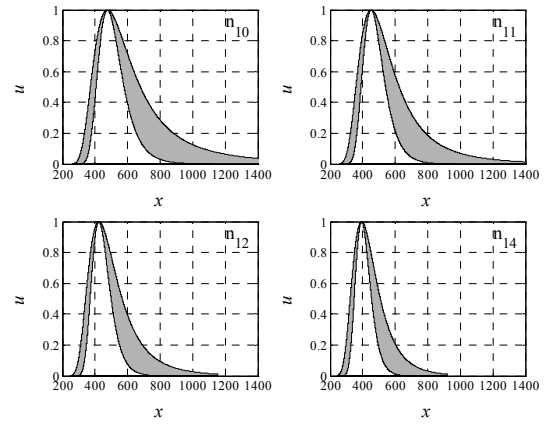


Fig. E.9 CFF de puntos n_{10} - n_{14}
(Z_f número fuzzy gaussiano tipo 2).

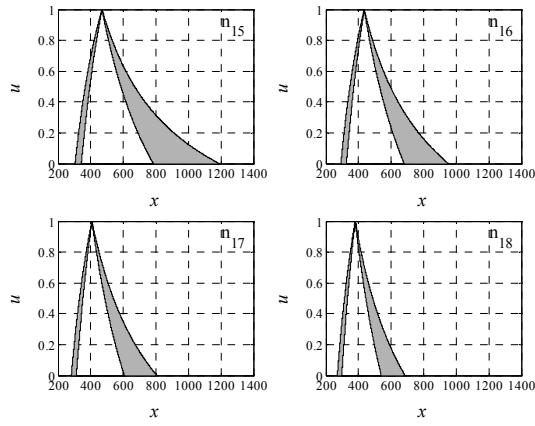


Fig. E.10 CFF de puntos n_{15} - n_{18}
(Z_f número fuzzy triangular tipo 2).

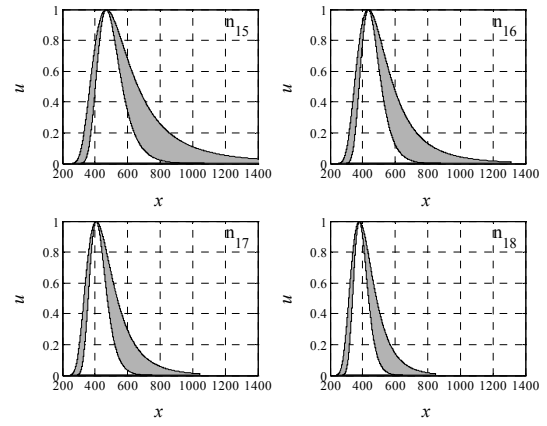


Fig. E.11 CFF de puntos n_{15} - n_{18}
(Z_f número fuzzy gaussiano tipo 2).

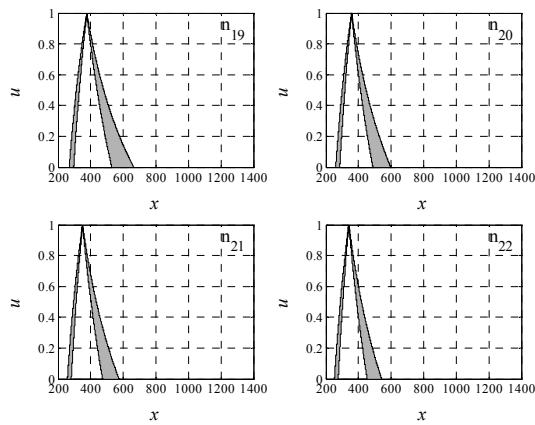


Fig. E.12 CFF de puntos n_{19} - n_{22}
(Z_f número fuzzy triangular tipo 2).

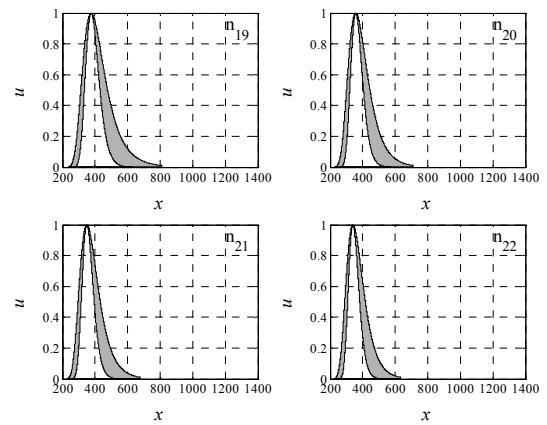


Fig. E.13 CFF de puntos n_{19} - n_{22}
(Z_f número fuzzy gaussiano tipo 2).

ANEXO F

F Glosario.

F.1 Abreviaturas.

A	: Amperio
AMR	: Automated Meter Reading
AM/FM	: Automated Mapping / Facilities Management
AT	: Alta Tensión
BT	: Baja Tensión
BMS	: Business Management System
CFF	: Corrientes de Falla Fuzzy
CIS	: Customer Information System
CL	: Calificador Lingüístico
CO	: Configuración Operativa
CO _{TR}	: Configuración Operativa de Tiempo Real
CO _{TRE}	: Configuración Operativa de Tiempo Real Extendido
COS	: Center Of Sets
CSE	: Calidad del Servicio Eléctrico
CSR	: Customer Services Representative
DA	: Distribution Automation
DFR	: Digital Fault Recorder
DMS	: Distribution Management System
EE	: Estimación de Estado o Estimador de Estado
EMS	: Energy Management System
FPS	: Función de Pertenencia Secundaria
FORTRAN	: Formula Translation
FOU	: Footprint Of Uncertainty
GD	: Generación Distribuida
GHz	: Giga Herz
GIS	: Geographic Information Systems
IAF	: Inferencia Abductiva Fuzzy
IGU	: Interfaz Gráfica de Usuario
IVR	: Interactive Voice Response
IR	: Incertidumbre Relativa
kV	: Kilovoltio
kVAR	: Kilovoltamperio Reactivo
kW	: Kilovatio
MATLAB	: Matrix Laboratory
MT	: Media Tensión
OMS	: Outage Management Systems
PSCT	: Parsimonious Set Covering Theory
s	: Segundos
SCADA	: Supervisory Control and Data Acquisition
SDEE	: Sistema de Distribución de Energía Eléctrica
SE AT/MT	: Subestación Transformadora de Alta Tensión a Media Tensión
SGEE	: Sistema de Generación de Energía Eléctrica
SSEE	: Sistema de Suministro de Energía Eléctrica
STEE	: Sistema de Transmisión de Energía Eléctrica

SVD	: Singular Value Decomposition
T1-FLS	: Type-1 Fuzzy Logic Systems
T2-FLS	: Type-2 Fuzzy Logic Systems
T2-TSK-FLS	: Type-2 Takagi-Sugeno-Kang Fuzzy Logic Systems
TL	: Término Lingüístico
TR	: Tiempo Real (segundos)
TRE	: Tiempo Real Extendido (minutos)
V	: Voltio
VRP	: Vector de Referencia de Potencia Activa

F.2 Simbología.

F.2.1 Letras latinas.

$\tilde{A}$	: Conjunto fuzzy tipo 2
$\tilde{A}_e$	: Conjunto fuzzy incrustado tipo 2
A_e	: Conjunto fuzzy incrustado tipo 1
$augres$	: Residuo aumentado
B_α	: Corte alfa de B
c_{ij}	: Probabilidad de ocurrencia de m_j cuando solamente d_i está presente
$c_{\tilde{G}_i}$	: Centroides de conjunto fuzzy tipo 2
C_{avg}^l	: Centroides promedio de la l -ésima regla
C	: Relación de causalidad crisp del distribuidor
D	: Conjunto de desórdenes posibles
D_s	: s -ésima explicación del problema de diagnóstico
d_i	: i -ésimo dispositivo de protección o i -ésimo desorden
div	: División
$f_x(u)$	: Grado de pertenencia secundario
$F(D_I, M^+)$	: Medida de probabilidad relativa
F_{elas}	: Factor de elasticidad de la demanda
F_i^O	: Índice de operación de frecuencia de operación de d_i
$\tilde{F}_q$	: q -ésimo conjunto fuzzy tipo 2 del consecuente
F^O	: Índices de operación de frecuencia de operación del distribuidor
G_I	: Generadores (PSCT)
G	: Conjuntos generadores (PSCT)
I_{sc}	: Corriente de falla registrada en la SE AT/MT
$I_{sc1\phi}$	: Corriente de falla monofásica registrada en la SE AT/MT
$I_{sc3\phi}$	: Corriente de falla trifásica registrada en la SE AT/MT
I_k	: Corriente de falla calculada en el k -ésimo punto del distribuidor
I_i^P	: Índice de operación de potencia de d_i
I_{iL}^P	: Límite inferior de I_i^P
I_{iU}^P	: Límite superior de I_i^P
I_i^I	: Índice de operación de corriente de falla de d_i
I_{iL}^I	: Límite inferior de I_i^I

I_{iU}^I	: Límite superior de I_i^I
I_k^I	: Índice de operación de corriente de falla del k -ésimo punto
I_{kL}^I	: Límite inferior de I_k^I
I_{kU}^I	: Límite superior de I_k^I
I_i^Q	: Índice de operación de corriente de falla del k -ésimo punto
I_{iL}^Q	: Límite inferior de I_i^Q
I_{iU}^Q	: Límite superior de I_i^Q
$I_f^{1\varphi}$	: Corriente de falla monofásica calculada (crisp)
$I_f^{3\varphi}$	: Corriente de falla trifásica calculada (crisp)
$\tilde{I}_{pf}$	: Corriente de carga de pre-falla
$\tilde{I}_{jk}$	: CFF calculada en el k -ésimo punto del distribuidor
$\tilde{I}_k$	: CFF total tipo 1 o tipo 2 calculada en el k -ésimo punto del distribuidor
$I_{sc1\varphi}$	: Magnitud de corriente de falla monofásica medida en la SE AT/MT
$\mathbf{I}^P$	: Índices de operación de potencia del distribuidor
$\mathbf{I}^I$	: Índices de operación de corrientes de falla del distribuidor
$\mathbf{I}^Q$	: Índices de operación de CSE del distribuidor
J_x	: Pertenencia primaria
m	: Media aritmética
m_j	: j -ésima zona de protección o j -ésima manifestación
$\max$	: Máximo
$\min$	: Mínimo
$\mathbf{M}$	: Conjunto de manifestaciones posibles
$\mathbf{M}^+$	: Conjunto crisp de manif. Observadas
$\mathcal{M}^+$	: Conjunto fuzzy de manif. “más o menos” ciertamente presentes
$\mathcal{M}^-$	: Conjunto fuzzy de manif. “más o menos” ciertamente ausentes
n	: Número de dispositivos de protección y zonas del distribuidor
n_e	: Número de expertos
n_k	: k -ésimo punto del distribuidor
p	: Número de puntos protegidos por d_i
P_A	: Flujo de potencia activa suministrada al distribuidor A
P_a	: Flujo de potencia activa suministrada de pre-falla
P_b	: Flujo de potencia activa suministrada de pos-falla
P_{Cu0s}	: Pérdidas en el cobre de SE MT/BT (nominal)
P_{Cus}	: Pérdidas en el cobre de SE MT/BT (corregida)
P_{Fe0s}	: Pérdidas en el hierro de SE MT/BT (nominal)
P_{Fes}	: Pérdidas en el hierro de SE MT/BT (corregida)
p_i	: Probabilidad previa de ocurrencia del d_i
P_i	: Flujo de potencia activa a través de d_i
$\tilde{P}_i$	: Número fuzzy tipo 1 o tipo 2 que modela a P_i
P_L	: Pérdidas totales activas del distribuidor
P_M	: Potencia activa medida en la cabecera del distribuidor
P_N	: Potencia activa de demanda nodal de BT (inicial)

P_s	: Potencia activa de demanda nodal de MT
P_{scorr}	: Potencia activa de demanda nodal de BT (corregida)
$P(\mathbf{D}_s)$	: Plausibilidad de la s -ésima explicación
$\mathbf{P}$	: Problema de diagnóstico
$\mathbf{P}_d$	: Flujos de potencia activa a través de los d_i del distribuidor
Q_M	: Potencia reactiva medida en la cabecera del distribuidor
Q_L	: Pérdidas totales reactivas del distribuidor
Q_s	: Potencia reactiva de demanda nodal de MT
Q_N	: Potencia reactiva de demanda nodal de BT (inicial)
Q_{scorr}	: Potencia reactiva de demanda nodal de BT (corregida)
$\mathbf{Q}_I$	: Generadores (PSCT)
$\mathbf{Q}$	: Conjuntos generadores (PSCT)
res	: Residuo
$revise$	: Revisión
R_{Tk}^+	: Resistencia de secuencia positiva del k -ésimo punto
R_{Tk}^0	: Resistencia de secuencia cero del k -ésimo punto
R_{fk}	: Resistencia de falla del k -ésimo punto
$\sup$	: Suprema
$\mathbf{S}_D$	: Conjunto de desórdenes
t	: Tiempo
t_f	: Tiempo de ocurrencia de falla
T_i^M	: Índice de operación de mantenimiento de d_i
$\mathbf{T}^M$	: Índices de operación de mantenimiento del distribuidor
U_{pfk}	: Tensión de pre-falla en el k -ésimo punto del distribuidor
U_N	: Tensión nominal
W_i	: Índice de operación de clima de d_i
$\mathbf{W}$	: Índices de operación de clima del distribuidor
X_{Tk}^+	: Reactancia de secuencia positiva del k -ésimo punto
X_{Tk}^0	: Reactancia de secuencia cero del k -ésimo punto
Z_f	: Impedancia de falla
$\tilde{Z}_f$	: Número fuzzy tipo 1 o tipo 2 que modela a Z_f
Z_{fk}	: Impedancia de falla del k -ésimo punto del distribuidor

F.2.2 Letras griegas.

α	: Coeficiente de potencia activa de demanda en función de la tensión
β	: Coeficiente de potencia reactiva de demanda en función de la tensión
Δ	: Intervalo de incertidumbre
ΔP	: Potencia activa desconectada
$\Delta P_{1\varphi}$	: Potencia activa monofásica desconectada medida en la SE AT/MT
$\Delta P_{3\varphi}$	: Potencia activa trifásica desconectada medida en la SE AT/MT
ε	: Error de medición
φ	: Fases
Π	: Productoria

Ω	: Ohmio
ρ	: Fracción de incertidumbre
σ	: Desviación estándar
Σ	: Unión sobre todos los puntos o sumatoria (dependiendo del caso)
$\mu_{\tilde{A}}(x)$	: Función de pertenencia secundaria de conjunto fuzzy tipo 2
$\bar{\mu}_{\tilde{A}}(x)$	: Función de pertenencia superior de conjunto fuzzy tipo 2
$\underline{\mu}_{\tilde{A}}(x)$	: Función de pertenencia inferior de conjunto fuzzy tipo 2
$\mu c_{i\min}^+$	: Valor de decisión
μc_i^+	: Certeza de operación de d_i
μc_{iL}^+	: Límite inferior de μc_i^+
μc_{iU}^+	: Límite superior de μc_i^+
μc_{iC}^+	: Valor defuzzificado de μc_i^+
μc_{ij}^+	: Certeza de presencia de m_j cuando d_i está presente
μc_{ij}^-	: Certeza de ausencia de m_j cuando d_i está presente
$\mu_{m_j}^+$	: Certeza de presencia de m_j
$\mu_{m_j}^-$	: Certeza de ausencia de m_j
μC^+	: Certezas de operación o relación de causalidad fuzzy del distribuidor
μC^-	: Relación de causalidad fuzzy del distribuidor

F.2.3 Símbolos.

$\approx$	: Aproximadamente igual
$=$	: Igualdad
$\neq$	: Desigualdad
$<$	: Menor
$>$	: Mayor
$\leq$	: Menor o igual
$\geq$	: Mayor o igual
$[]$	: Notación de intervalo, vector o matriz
$\{\}$	: Notación de conjunto
$\cup$	: Unión
$\cap$	: Intersección
$\subseteq$	: Inclusión
$\emptyset$	: Conjunto vacío
$\forall$	: Para todo
$ $	: Dado
$\%$	: Porcentaje
$\in$	: Pertenencia
$\notin$	: No-pertenencia
$\vee$	: t-conorma
$\wedge, \star, T$	: t-norma

$\times$	: Producto cartesiano
$\cdot$	: Producto algebraico
$\rightarrow$	: Implicación lógica
$\sqcap$	: <i>Meet</i> de conjuntos fuzzy tipo 2
$\sqcup$	: <i>Join</i> de conjuntos fuzzy tipo 2
$\int$	: Unión sobre todos los puntos

Biografía.

Julio Enrique Romero Agüero nació en Jinotega, Nicaragua, el 25 de Abril de 1974. En 1996 obtuvo el grado de Ingeniero Electricista Industrial otorgado por la Universidad Nacional Autónoma de Honduras. De 1995 a 2000 fue parte de la Empresa Nacional de Energía Eléctrica de Honduras, en la que ocupó diversos cargos. Fue responsable de la operación y mantenimiento de la red de distribución y de la comercialización de la energía eléctrica en las regiones oriente y sur de Honduras. Asimismo, estuvo a cargo de la operación de la red de distribución de la ciudad capital, Tegucigalpa y de sus municipios vecinos. En 2000 fue distinguido con una beca del Servicio Alemán de Intercambio Académico (DAAD) para realizar estudios de Doctorado en Ingeniería Eléctrica en el Instituto de Energía Eléctrica de la Universidad Nacional de San Juan, Argentina. En 2005 obtuvo el grado de Doctor en Ingeniería otorgado por la Universidad Nacional de San Juan, Argentina. Sus áreas de interés son: análisis de funcionamiento y operación de sistemas de distribución de energía eléctrica, calidad de servicio e inteligencia computacional. El Dr. - Ing. Romero Agüero es miembro de: Colegio de Ingenieros Mecánicos, Eléctricos y Químicos de Honduras (CIMEQH), Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE), IEEE Power Engineering Society (PES), IEEE Industry Applications Society (IAS) e IEEE Computational Intelligence Society (CIS).

Como resultado de la desregulación de los mercados eléctricos, las distribuidoras latinoamericanas se enfrentan a un ambiente de crecientes exigencias, en el que uno de sus principales objetivos es satisfacer los requerimientos impuestos por las regulaciones de calidad de servicio eléctrico, particularmente aquellos referidos a la frecuencia y duración de las interrupciones. El incumplimiento de estos requisitos implica penalizaciones y pérdidas económicas para las distribuidoras. Debido a las características de los sistemas de distribución de energía eléctrica, sus costos asociados y a la existencia de variables incontrolables (e.g., clima), no es posible garantizar un servicio sin interrupciones. Sin embargo, tanto los organismos reguladores como los clientes continúan aumentando sus exigencias respecto a la calidad de servicio eléctrico. Para cumplir con estas demandas y restricciones, las distribuidoras están moviéndose hacia la implementación e integración de sistemas de información que permitan ejecutar estrategias más eficientes de operación y control de la red. Esto ha motivado un creciente interés en la gestión de interrupciones y la estimación de estado de sistemas de distribución. Para la implementación de estas funciones de los modernos DMS / OMS es de fundamental importancia conocer la Configuración Operativa (CO) de la red de distribución de media tensión, la cual se define como el estado operativo de los dispositivos de protección y maniobra de media tensión.

En este trabajo se presenta una novedosa metodología de inferencia de la CO de la red de distribución de media tensión, de arquitectura modular, capaz de integrar los datos cuantitativos y cualitativos suministrados en tiempo real (segundos) y tiempo real extendido (minutos) por los sistemas de información de la distribuidora y los expertos. La metodología modela las incertidumbres asociadas a los datos de tiempo real y tiempo real extendido y aprovecha la sinergia de los mismos para obtener soluciones dinámicamente, a medida que el volumen de datos aumenta. La metodología es suficientemente flexible para ser utilizada como paso inicial en la gestión de interrupciones y estimación de estado de sistemas de distribución. Asimismo sus resultados son muy importantes para el mantenimiento de una base de datos actualizada de la cronología de operación de la red, la cual es fundamental para el cálculo de los índices de calidad de servicio y confiabilidad y para la planificación del sistema de distribución.

La metodología obtiene una solución inicial mediante análisis de flujo de potencia, teoría de conjuntos fuzzy tipo 2, cálculo de corrientes de falla fuzzy y sistemas de lógica fuzzy tipo 2 (T2-FLS). En esta etapa, se logra integrar de forma eficiente y sistemática el conocimiento experto y los datos cuantitativos y cualitativos disponibles en tiempo real (flujos de potencia activa, magnitudes de corrientes de falla, clima, datos históricos de operación relacionados con la frecuencia de interrupciones y mantenimiento). Posteriormente se mejora la solución inicial, mediante un procedimiento basado en ecuaciones relacionales e inferencia abductiva fuzzy. En esta etapa se incorporan al proceso de inferencia los datos disponibles en tiempo real extendido (llamadas telefónicas de los clientes), hasta alcanzar una solución final. Este modelo permite vincular las etapas de tiempo real y tiempo real extendido y extender la metodología para la inferencia de la CO en presencia de interrupciones múltiples. En cada etapa se calculan todas las alternativas plausibles de solución del problema, ordenadas de acuerdo a su certeza, a fin de obtener una perspectiva general del estado operativo del sistema de distribución.

La modelación matemática propuesta facilita la implementación inicial de la metodología, ya que permite la utilización de los datos inciertos y conocimiento experto usualmente disponibles en los sistemas de distribución. Este trabajo es la primera aplicación de la teoría de conjuntos fuzzy tipo 2 y T2-FLS para la solución de problemas operativos en sistemas eléctricos de potencia, específicamente en sistemas de distribución. La metodología ha sido evaluada en un distribuidor real de la ciudad de San Juan, Argentina. Los resultados demuestran sus beneficios, ventajas y potencialidad de implementación práctica.