

1-1-2016

Evaluación cualitativa de la confiabilidad en sistemas generación-transmisión empleando lógica difusa

Luisangelis María Toussaint López

Cesar Augusto Peña Castro

Follow this and additional works at: https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_electrica

Citación recomendada

Toussaint López, L. M., & Peña Castro, C. A. (2016). Evaluación cualitativa de la confiabilidad en sistemas generación-transmisión empleando lógica difusa. Retrieved from https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_electrica/107

This Trabajo de grado - Pregrado is brought to you for free and open access by the Facultad de Ingeniería at Ciencia Unisalle. It has been accepted for inclusion in Ingeniería Eléctrica by an authorized administrator of Ciencia Unisalle. For more information, please contact ciencia@lasalle.edu.co.

**EVALUACIÓN CUALITATIVA DE LA CONFIBILIDAD EN SISTEMAS
GENERACIÓN-TRANSMISIÓN EMPLEANDO LÓGICA DIFUSA**



**LUISANGELIS MARÍA TOUSSAINT LOPEZ
CESAR AUGUSTO PEÑA CASTRO**

**UNIVERSIDAD DE LA SALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
BOGOTÁ D.C.
2016**

**EVALUACIÓN CUALITATIVA DE LA CONFIBILIDAD EN SISTEMAS
GENERACIÓN-TRANSMISIÓN EMPLEANDO LÓGICA DIFUSA**

**LUISANGELIS MARÍA TOUSSAINT LOPEZ
CESAR AUGUSTO PEÑA CASTRO**

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de
Ingeniero Electricista**

**Director
Andrés Felipe Paneso Hernandez, M.Sc.
Profesor Asistente**

**UNIVERSIDAD DE LA SALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
BOGOTÁ D.C.
2016**

Nota de Aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá D.C., Diciembre de 2016.

Luisangelis Toussaint

Dedicado a mis padres, pilar fundamental de mi vida, que con su apoyo incondicional me han guiado para enfrentar el diario vivir, a mi novio, compañero de este proyecto, por su compromiso, entrega y apoyo durante el ciclo de estudio y desarrollo de nuestro proyecto.

Cesar Augusto Peña

Dedicado a mis padres quienes creyeron en mí y me apoyaron en todo momento, a mi novia y compañera de este proyecto, quien me acompañó y ayudó en cada paso de este proceso y a todas las personas que nos guiaron en este proceso porque hicieron parte de un gran logro propuesto y alcanzado.

AGRADECIMIENTOS

Luisangelis Toussaint

Primeramente, agradecer a Dios porque sin él, nada hubiera sido posible, cada día regalado, junto a la fe que le tenemos, ha servido para forjarnos como futuros profesionales. Al ingeniero Andrés Panesso, por su dedicación, esfuerzo, conocimientos y experiencia, logrando que podamos culminar este proyecto y estudios con éxito. Por último, agradecer a la Universidad de La Salle por darme la oportunidad de estudiar y ser un profesional y a los profesores que durante la carrera brindaron su granito de arena en mi formación.

Cesar Augusto Peña Castro

Gracias a Dios inicialmente porque nos dió la oportunidad de sacar adelante este proyecto y día a día superar los obstáculos que se presentaron mientras se desarrollaba el mismo, y en segundo lugar, al ingeniero Andrés Felipe Panesso quien nos orientó y apoyó para terminar el proyecto con éxito y a la Universidad de La Salle por permitirme formarme como un buen profesional en sus instalaciones y culminar esta etapa académica con éxito.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
I. Introducción	9
II. Metodología	10
A. Recopilación de datos	10
B. Selección y acople de información	10
C. Simulación	10
D. Resultados.....	10
III. Simulaciones y análisis de resultados	10
IV. Conclusiones	13
V. Recomendaciones	15
Referencias	15
<i>ANEXO A</i>	16
<i>ANEXO B</i>	17

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Rangos cualitativos.	10
Tabla 2. Datos de confiabilidad de las unidades generadoras.	11
Tabla 3. Datos de confiabilidad de líneas.	12
Tabla 4. Datos de confiabilidad de barras.	12
Tabla 5. Resultados.	13
Tabla 6. Resumen de las estadísticas de magnitud de la tensión en p.u. Obtenidas de la simulación de Montecarlo.	16
Tabla 7. Resumen de las estadísticas de magnitud de la tensión en p.u. Obtenidas de los arreglos ortogonales de Taguchi (TOAT).	16
Tabla 8. Resumen de las estadísticas de magnitud de la tensión en p.u. Obtenidas de la estimación de dos puntos.	16

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Función de pertenencia triangular: rangos y gráfica característica	11
Figura 2. Sistema de prueba	11
Figura 3. Ilustración de la ventana del Toolbox Fuzzy.....	12
Figura 4. Entrada Generación en la ventana del Toolbox Fuzzy.....	13
Figura 5. Entrada Regulación en la ventana del Toolbox Fuzzy.....	13
Figura 6. Entrada ASIFI en la ventana del Toolbox Fuzzy.....	13
Figura 7. Salida Rangos Cualitativos en la ventana del Toolbox Fuzzy.....	13
Figura 8. Diagrama de flujo de la simulación.....	14

Evaluación cualitativa de la confiabilidad en sistemas Generación-Transmisión empleando lógica difusa

Luisangelis María Toussaint López, Cesar Augusto Peña Castro

Universidad de La Salle, Bogotá, Colombia

Resumen— Éste trabajo tiene como finalidad realizar una evaluación de la confiabilidad en sistemas Generación- Transmisión relacionando el término cualitativo. Para el desarrollo de éste proyecto, se realizó una interpretación de información y normas que ayudaron a establecer rangos que permiten ubicar un resultado de prueba entre malo, regular, bueno o muy bueno, para poder incidir cualitativamente en la evaluación de la confiabilidad. Se tuvo en cuenta que el índice de confiabilidad obtenido fue de forma cuantitativa, es aquí donde se incluyó la lógica difusa, la cual ayudó a esclarecer el resultado permitiendo de esta manera definir qué tan confiable es el sistema eléctrico de prueba. Con un algoritmo generado a partir del método de simulación de Montecarlo en la herramienta computacional Matlab® se comprueban los rangos establecidos inicialmente.

Palabras clave— Confiabilidad, evaluación cualitativa, lógica difusa, simulación de Montecarlo.

Abstract — The purpose of this paper is to perform an evaluation of reliability in Generation-Transmission systems relating the qualitative term. For the development of this project, was performed an interpretation of information and standards norms which helped establish ranges that allow to locate a test result between bad, regular, good or very good, to be able to influence qualitatively in the reliability evaluation. It was taken into account that the reliability index obtained was in quantitative form, it was here that the fuzzy logic was included, which helped to clarify the result allowing in this way to define how reliable is the electrical test system. With an algorithm generated from the Monte Carlo simulation method in the Matlab® computational tool, the established ranges are checked.

Keywords— Reliability, quality evaluation, fuzzy logic, Montecarlo simulation.

I. INTRODUCCIÓN

ES un hecho que día a día se necesita de sistemas eléctricos más seguros y para ello es necesario realizar una evaluación permanente del funcionamiento de los mismos, y establecer medidas de mejoramiento en sus índices de confiabilidad. Por ende, la confiabilidad en sistemas eléctricos se evalúa para conocer su desempeño en un determinado lapso o ante diversos eventos en el sistema.

Una muy buena forma de definir algunos conceptos básicos sobre confiabilidad de sistemas de potencia se relacionan en el documento disponible en [1]:

“La confiabilidad de un sistema de potencia eléctrico se relaciona con la habilidad del sistema para realizar su función de entregar energía, cuando y donde sea requerida, en los niveles de voltaje y frecuencia apropiados. El termino habilidad es usado para indicar la combinación de tasas con respecto a la carga (económico y climático) y al sistema generación/transmisión, disponibilidad aleatoria de hidroenergía, salida de unidades y componentes de la red. Los efectos de esas tasas combinadas deben ser adecuadamente cuantificados por el planificador del sistema. La evaluación del nivel de confiabilidad es indispensable para el planeamiento y la operación del sistema de potencia.

La adecuación se define como la habilidad de suministrar la potencia de energía eléctrica que requieren los consumidores dentro de los límites aceptables; teniendo en cuenta imprevistos de salidas planeados y no planeados de los componentes y asumiendo condiciones estáticas de los mismos.

La seguridad se define como una medida de la habilidad de un sistema de potencia para resistir imprevistos específicos tales como cortocircuitos o pérdidas no anticipadas del sistema. También se puede definir como la habilidad del sistema de sobreponerse a disturbios entre dos estables”.

Para este proyecto, se realizó el uso del concepto de lógica difusa en el análisis cualitativo del sistema generación-transmisión [2]. La lógica difusa permite utilizar lenguajes ordinarios como un lenguaje descriptivo en un ordenador, introduciendo de ésta manera la imprecisión y la subjetividad propia de una persona en un procedimiento automatizado, es decir, se razonará con incertidumbre.

En ocasiones puede ser importante establecer el estado del sistema cualitativamente a partir de descriptores simples que usualmente el ser humano puede realizar fácilmente. Pero para una máquina no es tan simple determinar el estado de un sistema, más allá de valores que restringen una decisión o un valor en forma determinista. De esta manera surge la idea de

utilizar la lógica difusa, para la interpretación de datos del sistema y las normas que establecen los rangos de operación.

En los últimos años se ha estado notando una relación entre estos aspectos, la evaluación de la confiabilidad y la lógica difusa como método de clasificación del estado del sistema eléctrico.

Por ejemplo, en [3] se hace un análisis de un sistema eléctrico a partir de la simulación de Montecarlo y un algoritmo difuso, realizando comparaciones con el flujo de carga para corriente alterna para diferentes escenarios. En [4] se evalúa la confiabilidad en sistemas interconectados, redes de distribución con suministro de potencia activa mediante paneles fotovoltaicos y su impacto a nivel de transmisión, enfocados en la seguridad cibernética para las Smart Grid. Y recientemente en [5] se propone “una nueva metodología de análisis de vulnerabilidad de sistemas de potencia incluyendo incertidumbre en algunas variables. [...] Se utiliza la lógica difusa para modelar la incertidumbre tanto en variables lingüísticas como en variables numéricas. Las variables lingüísticas modelan los factores del entorno geográfico mientras que las variables numéricas modelan los parámetros del sistema de potencia”.

Es claro entonces que ha ganado importancia el uso de la lógica difusa para ayudar a relacionar los diversos parámetros que componen los modelos del sistema de potencia. En cuanto a la utilización de la lógica difusa para este trabajo, en la selección de una adecuada función de pertenencia se tiene en cuenta que el índice de confiabilidad obtenido mediante el método de simulación de Montecarlo será cuantitativo, permitiendo de esta manera definir qué tan confiable es un sistema eléctrico de potencia mediante una defusificación de los resultados numéricos de la evaluación de confiabilidad.

Finalmente, se realizan pruebas con un algoritmo generado a partir del método de simulación de Montecarlo en la herramienta computacional Matlab®, al que se somete el sistema eléctrico de prueba y se obtienen los respectivos resultados, los cuales se ubicaron en los rangos ya establecidos con la ayuda del Toolbox Fuzzy (también de Matlab®), y que por defecto tiene definido el concepto de fusificación y defusificación.

II. METODOLOGÍA

Para realizar este trabajo de grado se consideraron los siguientes ítems.

A. Recopilación de datos

- Se realiza una revisión bibliográfica conexas a información base sobre la reglamentación de la confiabilidad a nivel

generación-transmisión, adicionalmente se indaga sobre las funciones de pertenencia más adecuadas para la evaluación de confiabilidad.

- Se establece una relación entre la lógica difusa y la confiabilidad para poder llevar a cabo el proyecto, se reconocen los conceptos que ayuden a comprender mejor el proceso que tiene el realizar la evaluación cualitativa de la confiabilidad en sistemas eléctricos de generación-transmisión.

B. Selección y acople de información

- Se procede a identificar los rangos cualitativos para evaluar la confiabilidad y así mismo se selecciona una función de pertenencia adecuada para la utilización de la lógica difusa.
- Se analiza el sistema de prueba seleccionado, identificando y caracterizando cada uno de sus componentes.
- Se realiza el estudio del sistema eléctrico, desglosando los componentes y estableciendo los datos de funcionalidad que correspondan al correcto desarrollo del mismo.

C. Simulación

- Se adecua el método de simulación de Montecarlo para la realización de las pruebas en el sistema eléctrico de prueba seleccionado (ver figura 1).
- Se modela en el Toolbox Fuzzy de Matlab®, los resultados obtenidos.

D. Resultados

- Se comprueban los rangos cualitativos de confiabilidad.
- Se organizan los resultados obtenidos.
- Se analizan y comparan los resultados obtenidos.

III. SIMULACIONES Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Inicialmente se realiza la revisión bibliográfica mediante la búsqueda de documentos relacionados con confiabilidad en sistemas de generación-transmisión, entre ellos se encuentran la Ley 142 de 1994 [6] y la Ley 143 del mismo año [7], la Resolución 097 de 2008 de la CREG [8] y el proyecto de grado en [9], para lograr establecer rangos cualitativos que se puedan tomar como referencia para realizar el análisis de sistemas de generación-transmisión, donde se utiliza el sistema de prueba dado en [10].

TABLA I. RANGOS CUALITATIVOS.

Cualidad	Min	Medio	Max
Malo	0	0,96	0,97
Regular	0,96	0,97	0,98
Bueno	0,97	0,98	0,99
Muy bueno	0,98	0,99	1

Fuente propia.

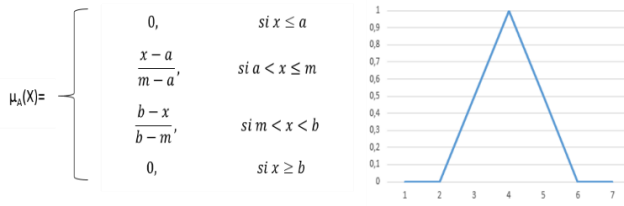


Figura 1. Función de pertenencia triangular: rangos y gráfica característica

Elaboración propia basada en [11].

De los resultados obtenidos en [9], se establecieron los rangos cualitativos de la Tabla 1. Para más detalles se recomienda ver el Anexo A.

La Tabla 1, describe la operación del sistema de Generación-Transmisión por medio de índices cuantitativos de 0 a 1, donde el cero describe al sistema como inservible en su totalidad y 1, como un sistema en perfecta operación.

Para relacionar el concepto de evaluación cualitativa, se requiere de una interpretación sobre la información que puede suministrar el sistema y las normas que establecen los rangos de operación, y que juntos permitieron ubicar la operación del sistema eléctrico en descriptores como: malo, regular, bueno o muy bueno, en cuanto a confiabilidad se refiere. Es así como para simular el razonamiento humano se utiliza la lógica difusa, procurando establecer el estado del sistema cualitativamente en los descriptores nombrados anteriormente.

Debido a que la lógica difusa no trabaja valores exactos (en este caso 0 o 1), sino valores intermedios (0, 0.1, 0.2, ..., 0.9, 1.0, 1.1, ..., etc.), esta característica conlleva a utilizar funciones de pertenencia, la cual fue seleccionada a partir de los rangos obtenidos de estudios realizados, mostrados en la Tabla 1. Esta función de pertenencia seleccionada es llamada función triangular la cual es una función definida entre un valor inferior a , uno superior b y un valor intermedio m el cual se encuentra entre a y b , y no necesariamente la función debe ser simétrica [11]. Gráficamente está representada por la Figura 1.

Función que inicialmente se seleccionó a partir de la salida a utilizar, en este caso los rangos cualitativos mencionados en la tabla 1. Cabe mencionar que para estas evaluaciones se pueden obtener índices de confiabilidad menores a 0.96, restringiendo el uso de la función de pertenencia triangular, por lo tanto, se requirió utilizar la función de pertenencia trapezoidal [10] y así mismo cubriendo cualquier posible resultado.

Adicionalmente para representar las entradas, se seleccionó las funciones de pertenencia triangular y trapezoidal, las cuales se adaptaron de forma eficiente a los valores establecidos para éstas entradas.

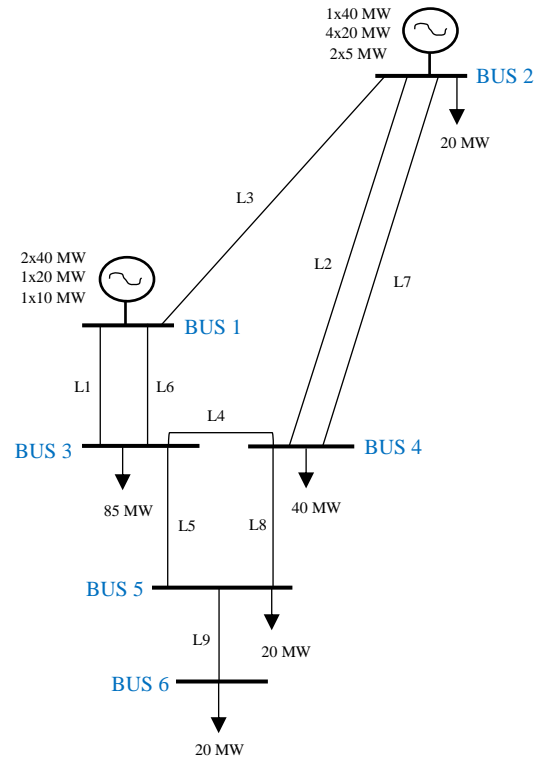


Figura 2. Sistema de prueba

Elaboración propia basada en [10].

En la Figura 2 se presenta el diagrama unifilar del sistema de prueba utilizado, el cual consta de: 2 barras con generación (la barra 1 es asumida como *slack* y la 2 como *PV*), 4 barras de carga (asumidas como *PQ*) y 9 líneas que conectan las barras del sistema; éste es tomado del sistema eléctrico generación-transmisión presentado en [10].

Para el estudio del sistema de prueba, se tuvo en cuenta su funcionalidad, a partir de las tasas de fallas y tiempo de reparación de los generadores, las líneas y barras, mostradas en la Tabla 2, 3 y 4.

TABLA 2. DATOS DE CONFIABILIDAD DE LAS UNIDADES GENERADORAS.

MW	Tipo	MTTF [h]	TFPA	MTTR [h]	TRPA
40	Termo	1460	6	45	194
40	Termo	1460	6	45	194
20	Termo	1752	5	45	195
10	Termo	2190	4	45	196
40	Hidro	2920	3	60	147
20	Termo	1752	5	45	195
20	Termo	1752	5	45	195
20	Termo	1752	5	45	195
20	Termo	1752	5	45	195
5	Hidro	4380	2	45	198
5	Hidro	4380	2	45	198

Fuente propia. Información tomada de [10].

TABLA 3. DATOS DE CONFIABILIDAD DE LÍNEAS.

Línea	Longitud [km]	Tasa de interrupción permanente [fallas/año]	Duración de la salida [h]	Indisponibilidad transitoria [eventos/año]
1	75	1.5	10	3.75
2	250	5	10	12.50
3	200	4	10	10.00
4	50	1	10	2.50
5	50	1	10	2.50
6	75	1.5	10	3.75
7	250	5	10	12.50
8	50	1	10	2.50
9	50	1	10	2.50

Fuente propia. Información tomada de [10].

TABLA 4. DATOS DE CONFIABILIDAD DE BARRAS.

Barra	TFPA	Duración de salida [h]
1, 2, 3, 4, 5, 6	0.22	10

Fuente propia. Información tomada de [10].

Obteniendo de esta forma, todos los datos necesarios para iniciar la simulación de Montecarlo. El procedimiento que se siguió para esta simulación se muestra en el diagrama de flujo de la Figura 8, donde adicionalmente a la simulación del método de Montecarlo, se muestra los respectivos pasos para el análisis del flujo de potencia del sistema y el análisis cualitativo que se realizó en el Toolbox Fuzzy de Matlab®.

La funcionalidad del método de simulación de Montecarlo para este proyecto, es generar fallas aleatorias dentro del sistema, haciendo uso de las funciones de distribución de probabilidad exponencial y tomando como entradas los datos de las tablas 2, 3 y 4. En [12], se observa cómo la distribución exponencial es ventajosa para estudios con simulaciones como la que se presenta en este trabajo, adaptándose adecuadamente a la realidad.

Es importante destacar que a la salida de la simulación de Montecarlo, solo se tuvo en cuenta los elementos en falla, para cuando se realizó el flujo de carga, suministrando valores de regulación, generación y potencia sin los elementos en falla, y así mismo, dichos valores, se sometieron al Toolbox Fuzzy, que emitió finalmente el concepto de estado del sistema de prueba.

El Toolbox Fuzzy de Matlab®, viene definido con conceptos prácticos para el análisis difuso, comenzando por el concepto de lógica difusa y las funciones de pertenencia para distintos comportamientos de modelos de sistemas, en este caso, eléctrico. La Figura 3 muestra la ventana del Toolbox Fuzzy utilizada para el proyecto.

En esta ventana, se establecen las variables de entrada, es decir, la capacidad de generación (Figura 4), regulación de

tensión (Figura 5) y el índice de indisponibilidad del sistema – ASIFI por sus siglas en inglés [13] (Figura 6). Así mismo la salida (Figura 7), ya definida anteriormente y que está representada con los rangos cualitativos de la Tabla 1.

En función del tipo de regla difusa se utilizó tipo Mamdani, debido a que tanto el antecedente como el consecuente se manejan con variables lingüísticas, es decir cualitativas. Mientras que tipo TSK (Takagi, Sugeno y Kang) su consecuente siempre será una función matemática, es decir cuantitativa.

El *toolbox* tiene definido los conceptos de fusificación y defusificación, teniendo en cuenta que éstas interfaces convierten una entrada puntual en un valor difuso y luego de un proceso de razonamiento, para estimar la salida en función de la entrada, convierten la salida difusa a un valor determinado, respectivamente.

El proceso de defusificación, se realizó por centroide, dado el polígono de la salida por el proceso de inferencia, donde se calcula en centro de gravedad a partir de la ecuación dada en [14].

La capacidad de sobrecarga de los generadores del sistema de prueba se definió a partir de información obtenida en [15], donde se estipula un 10%, siendo válido para una hora cada 12 horas. La regulación de tensión se parametrizó bajo la NTC 1340 de 2013 [16], la cual estipula los porcentajes de subtensión y sobretensión en líneas de nivel 4 (alta tensión).

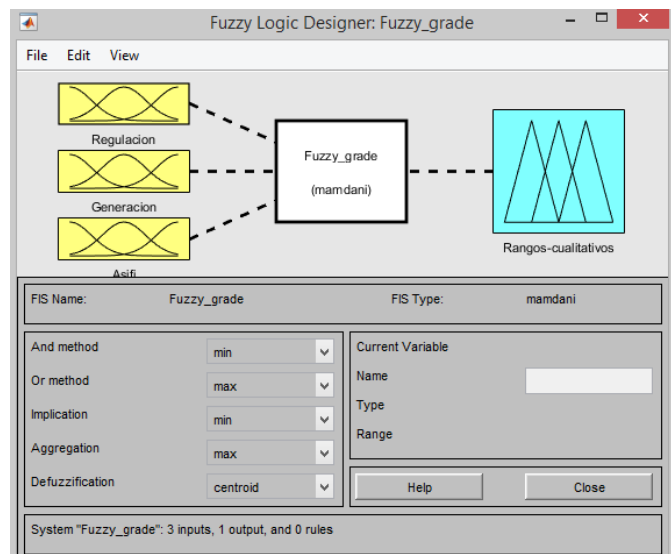


Figura 3. Ilustración de la ventana del Toolbox Fuzzy.

Fuente: Tomado de Matlab®.

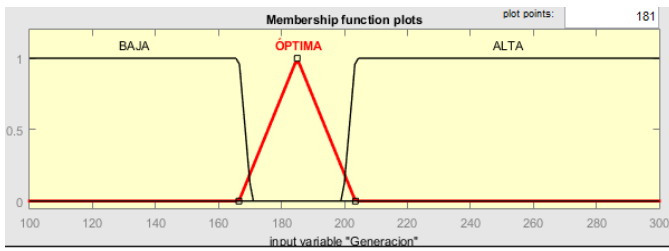


Figura 4. Entrada Generación en la ventana del Toolbox Fuzzy.
Fuente: Imagen tomada de Matlab®. Elaboración propia.

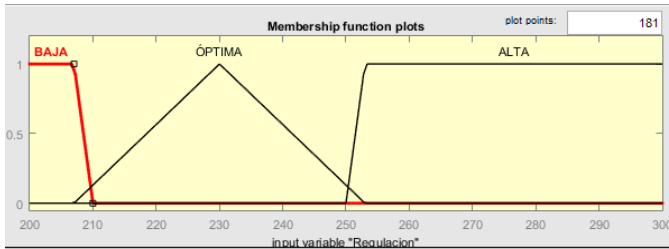


Figura 5. Entrada Regulación en la ventana del Toolbox Fuzzy.
Fuente: Imagen tomada de Matlab®. Elaboración propia.

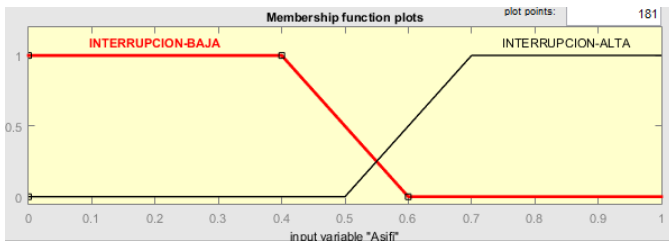


Figura 6. Entrada ASIFI en la ventana del Toolbox Fuzzy.
Fuente: Imagen tomada de Matlab®. Elaboración propia.

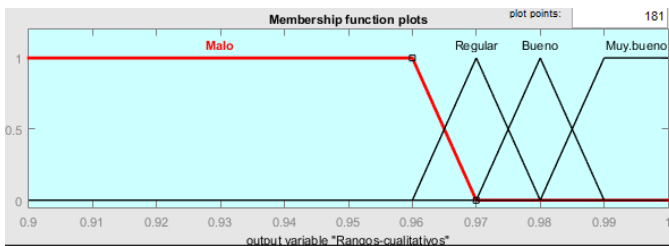


Figura 7. Salida Rangos Cualitativos en la ventana del Toolbox Fuzzy.

Fuente: Imagen tomada de Matlab®. Elaboración propia.

Como último parámetro a definir en el Toolbox Fuzzy, se encuentran las reglas (ver Anexo B). Como se observa en las figuras 4, 5 6 y 7, se requirió un total de 12 funciones de pertenencia, las cuales fueron construidas a partir de las entradas (8 funciones de pertenencia) y salidas del sistema (4 funciones de pertenencia). Haciendo la combinación de cada una de las entradas se encontraron 18 reglas, como medidas de restricción y simplificación de la solución.

La Tabla 5 muestra los resultados obtenidos de los flujos de carga, luego de simular algunas fallas y habiendo calculado el índice ASIFI.

TABLA 5. RESULTADOS.

Tensión promedio [kV]	Capacidad de generación [MW]	ASIFI	Estado del sistema
230	107.73	0.4595	0.98 = Bueno
230	170.54	0.1081	0.991= Muy bueno
230	193.36	0	0.992= Muy bueno

Fuente propia.

En la primera fila de valores suministrados por el software, ocurre una falla en la barra 3 donde la carga que queda desconectada es de 85 MW, la segunda cuando existe una falla en la barra 6 desconectando una carga de 20 MW y el último caso, cuando no existe interrupción.

Para los tres casos se puede observar que el estado del sistema se encuentra entre bueno y muy bueno, debido a su alto nivel de confiabilidad, por lo tanto, difícilmente puede ocurrir un caso extremo donde su estado se encuentre entre malo y regular. Los valores obtenidos principalmente en generación, se encuentran entre el valor establecido de sobrecarga [15] en el Toolbox Fuzzy, para una demanda de 185 MW y las reglas también parametrizadas en el mismo.

El estado del sistema depende únicamente de las entradas; esto se acopló y estableció en las reglas de activación donde un valor (de las tres entradas) entre su rango es regular, dos bueno, tres muy bueno y por ende, ningún valor entre su rango establecido su estado será malo.

Finalmente, el valor del índice de indisponibilidad, indica la frecuencia de interrupciones del sistema [13]; para los tres casos se observa que el nivel de interrupción es bajo, en un rango establecido entre 0 y 1, permitiendo de esta manera un buen funcionamiento del sistema.

IV. CONCLUSIONES

Los rangos cualitativos se identificaron exclusivamente de proyectos de grado, donde sus resultados se basaron en el estudio de distintos métodos probabilísticos [9]. El establecimiento adecuado de estos rangos, se observó al momento de someter en ellos los resultados obtenidos en los flujos de carga, que entregaron datos que sirvieron para definir el estado del sistema de prueba. Para este trabajo se tuvo en cuenta, la tensión y la generación, y de forma indirecta las potencias en VA, donde dependía únicamente de la potencia activa, ya que se asumió que todas las cargas tenían factor de potencia unitario, valores que permitieron, dentro de los criterios utilizados para este trabajo, definir que el sistema resultó en estado *bueno* y *muy bueno* acorde a los criterios aplicados en lógica difusa, aun cuando presentó fallas en algunos elementos.

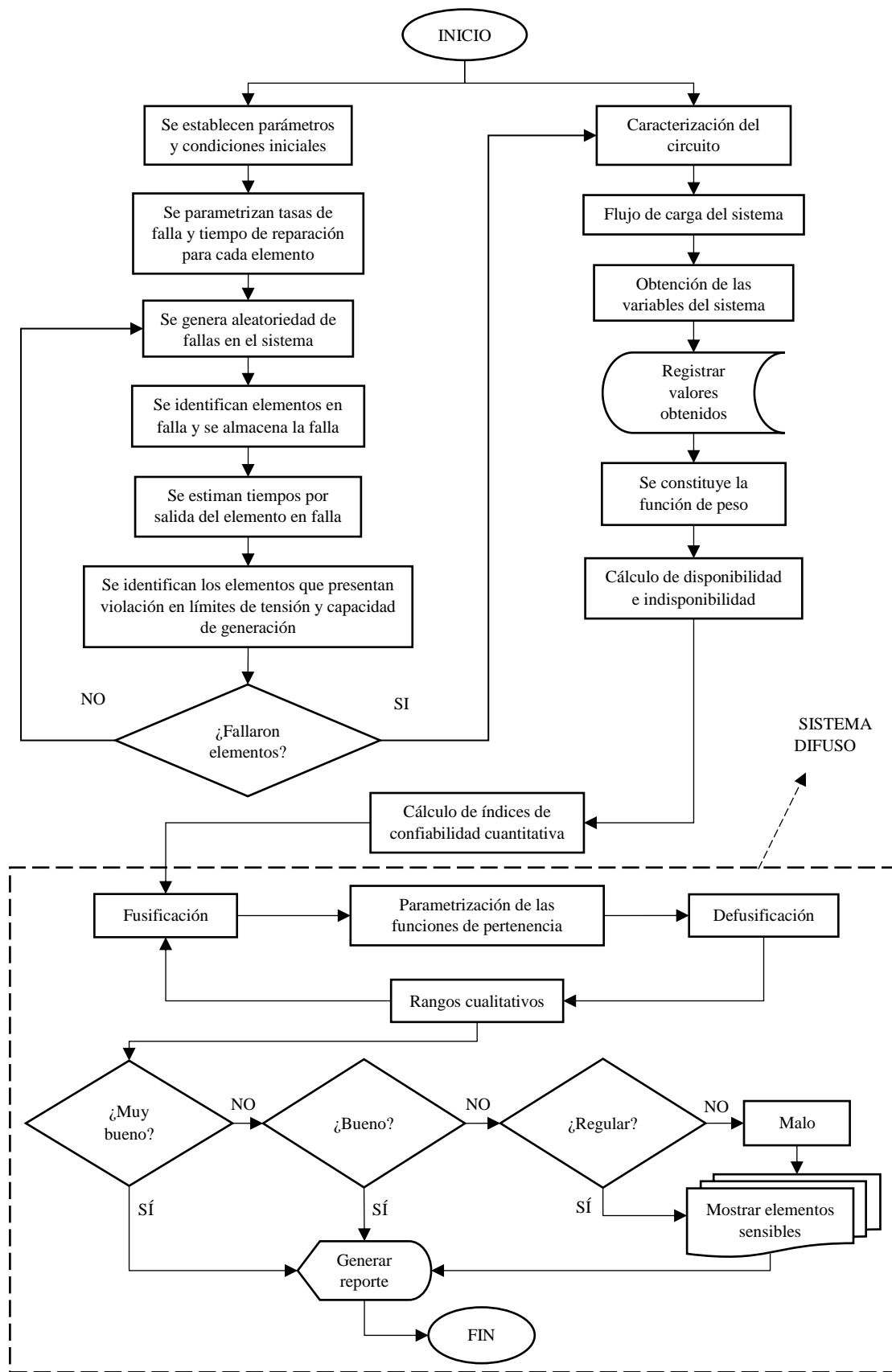


Figura 8. Diagrama de flujo de la simulación.

Fuente: Elaboración propia.

Para establecer adecuadas funciones de pertenencia, como se observó en este proyecto, se realizó bajo las condiciones que presentaron los datos de entrada y salida de los sistemas generación-transmisión. Estas funciones de pertenencia triangular y trapezoidal, debieron cubrir en su totalidad la necesidad para la que se requirieron, ya que en el momento de aplicar los resultados y someterlos a estas funciones no pudieron quedar fuera de las mismas, esto pudo implicar que el procedimiento no convergiera.

Para la evaluación cualitativa de la confiabilidad en sistemas generación-transmisión, se utilizó el Toolbox Fuzzy que facilitó de manera ambiciosa comprender el concepto de la lógica difusa. Esto permitió la interpretación de información que suministró la simulación de Montecarlo en conjunto con los flujos de carga. Cada uno de los parámetros (generación, regulación y ASIFI), tienen funciones de probabilidad, que a partir de la simulación de Montecarlo se analiza probabilísticamente, con ayuda del algoritmo difuso, esto se transformó en variables lingüísticas, evitando el uso de funciones de distribución de probabilidad multivariable, y mediante el proceso de fusificación – defusificación, se ubicó la operación del sistema.

V. RECOMENDACIONES

Para la entrada de la capacidad de generación se tuvo en cuenta la generación total demandada del sistema y no por máquina. Se recomienda para próximos estudios la definición de esta entrada tomando las generaciones por elemento. Así como también para la regulación de tensión, se recomienda tener en cuenta cada barra del sistema a trabajar, en este caso el nivel de tensión de las seis barras.

REFERENCIAS

- [1] J. A. Rincón, «Confiabilidad en sistemas de generación y transmisión de energía - Universidad de Los Andes,» 01 2001. [En línea]. Available: <http://wwwprof.uniandes.edu.co/dependencias/Departamentos/ingenieria-electrica/arch/tm00204.pdf>. [Último acceso: 20 02 2017].
- [2] IEEE Task Force Report, «Common Mode Forced Outages of Overhead Transmission Lines,» IEEE, 1976.
- [3] B. Alinejad, M. Fotuhi-Firouzabad y M. Parvania, «Composite system well-being analysis using Monte Carlo simulation and fuzzy algorithm,» 7th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO), Bursa, December 2011.
- [4] P. Zhang, W. Li, S. Li, Y. Wang y W. Xiao, «Reliability assessment of photovoltaic power systems: Review of current status and future perspectives,» 2013.
- [5] J. A. Melo y C. A. Cortés, «Análisis de vulnerabilidad de sistemas de potencia incluyendo incertidumbre en las variables con lógica difusa tipo 2,» *Revista Tecnura*, vol. 20, n° 49, pp. 100 - 119, 2016.
- [6] Congreso de Colombia, «Ley 142 de 1994: Por la cual se establece el régimen de los servicios públicos domiciliarios y se dictan otras disposiciones,» Diario Oficial 41.433 del 11 de julio de 1994, Bogotá, 1994.
- [7] Congreso de Colombia, «Ley 143 de 1994: Se establece el régimen para la generación, interconexión, transmisión, distribución y comercialización de electricidad en el territorio nacional, se conceden unas autorizaciones y se dictan otras disposiciones en materia energética,» Diario Oficial 41434 del 12 de julio de 1994, Bogotá, 1994.
- [8] Comisión de Regulación de Energía y Gas - CREG, «Resolución CREG 097 de 2008: Por la cual se aprueban los principios generales y la metodología para el establecimiento de los cargos por uso de los Sistemas de Transmisión Regional y Distribución Local,» Bogotá, 2008.
- [9] J. Beltran y D. Moreno, «Análisis comparativo de métodos probabilísticos y determinísticos incorporando la incertidumbre de la generación eólica en sistemas de potencia,» Universidad de La Salle, Bogotá, 2014.
- [10] R. Billinton, S. Kumar, N. Chowdhury, K. Chu, K. Debnath, L. Goel, E. Khan, P. Kos, G. Nourbakhsh y J. Oteng-Adjei, «A reliability test system for educational purposes,» Basic data. IEEE Transactions on Power Systems, Canadá, 1989.
- [11] A. Jiménez, «Introducción a la lógica difusa,» http://www.dma.fi.upm.es/recursos/aplicaciones/logica_borro sa/web/tutorial_fuzzy/contenido3.html, 2010.
- [12] F. A. Imbarack, Elaboración de una herramienta computacional para la evaluación de la confiabilidad de sistemas de transmisión eléctricos, Santiago de Chile: Trabajo de grado en Ingeniería Civil Industrial, 2006.
- [13] «IEEE Trial-Use Guide for Electric Power Distribution Reliability Indices,» IEEE-SA Standards Board , 1998.
- [14] U. d. Piura, «Sección defusificación,» de *Control difuso*, Lima. Perú.
- [15] Industria Broadcrown, «Catálogo de generadores,» <http://www.broadcrown.com/cmsAdmin/uploads/bc-60hz-broch-lo.pdf>.
- [16] ICONTEC, «Norma Técnica Colombiana 1340,» 2013.

ANEXO A

Resultado de la aplicación de los métodos para la evaluación de las incertidumbres en el sistema Generación-Transmisión. Resumen estadístico

TABLA 6. RESUMEN DE LAS ESTADÍSTICAS DE MAGNITUD DE LA TENSIÓN EN P.U. OBTENIDAS DE LA SIMULACIÓN DE MONTECARLO.

Barra	Media	Mediana	Moda	Desviación estándar	Varianza	Asimetría	Coficiente de Variabilidad	Valor Mínimo	Valor Máximo	Media de Error
1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0
2	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0
3	0.98	0.98	0	0	0	-0.0547	0.0032	0.97	0.98	0
4	0.98	0.98	0	0	0	-0.0171	0.0036	0.97	0.99	0
5	0.98	0.98	0	0	0	-0.0036	0.0036	0.96	0.99	0
6	0.97	0.97	0	0	0	-0.0040	0.0040	0.96	0.98	0

TABLA 7. RESUMEN DE LAS ESTADÍSTICAS DE MAGNITUD DE LA TENSIÓN EN P.U. OBTENIDAS DE LOS ARREGLOS ORTOGONALES DE TAGUCHI (TOAT).

Barra	Media	Mediana	Moda	Desviación estándar	Varianza	Asimetría	Coficiente de Variabilidad	Valor Mínimo	Valor Máximo	Media de Error
1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0
2	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0
3	0.98	0.98	0	0.1	0	-0.01418	0.0057	0.97	0.98	0
4	0.98	0.98	0	0.1	0	-0.0727	0.0064	0.97	0.99	0
5	0.98	0.98	0	0.1	0	-0.1288	0.0065	0.96	0.99	0
6	0.97	0.97	0	0.1	0	-0.1349	0.0072	0.96	0.98	0

TABLA 8. RESUMEN DE LAS ESTADÍSTICAS DE MAGNITUD DE LA TENSIÓN EN P.U. OBTENIDAS DE LA ESTIMACIÓN DE DOS PUNTOS.

Barra	Media	Mediana	Moda	Desviación estándar	Varianza	Asimetría	Coficiente de Variabilidad	Valor Mínimo	Valor Máximo	Media de Error
1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0
2	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0
3	0.98	0.98	0	0	0	-0.0495	0.0031	0.98	0.99	0
4	0.98	0.98	0	0	0	-0.0709	0.0035	0.97	0.99	0
5	0.98	0.98	0	0	0	-0.0853	0.0036	0.97	0.98	0
6	0.97	0.97	0	0	0	-0.0889	0.0040	0.96	0.98	0

ANEXO B

Reglas de activación para el Toolbox Fuzzy

1. Si (Regulacion is BAJA) y (Generacion is BAJA) y (Asifi is INTERRUPCION-ALTA) entonces (Rangos-cualitativos is Malo) (1)
2. Si (Regulacion is BAJA) y (Generacion is ALTA) y (Asifi is INTERRUPCION-ALTA) entonces (Rangos-cualitativos is Malo) (1)
3. Si (Regulacion is BAJA) y (Generacion is ÓPTIMA) y (Asifi is INTERRUPCION-ALTA) entonces (Rangos-cualitativos is Regular) (1)
4. Si (Regulacion is BAJA) y (Generacion is ÓPTIMA) y (Asifi is INTERRUPCION-BAJA) entonces (Rangos-cualitativos is Bueno) (1)
5. Si (Regulacion is BAJA) y (Generacion is BAJA) y (Asifi is INTERRUPCION-BAJA) entonces (Rangos-cualitativos is Regular) (1)
6. Si (Regulacion is BAJA) y (Generacion is ALTA) y (Asifi is INTERRUPCION-BAJA) entonces (Rangos-cualitativos is Malo) (1)
7. Si (Regulacion is ÓPTIMA) y (Generacion is ALTA) y (Asifi is INTERRUPCION-BAJA) entonces (Rangos-cualitativos is Bueno) (1)
8. Si (Regulacion is ÓPTIMA) y (Generacion is BAJA) y (Asifi is INTERRUPCION-BAJA) entonces (Rangos-cualitativos is Bueno) (1)
9. Si (Regulacion is ÓPTIMA) y (Generacion is ÓPTIMA) y (Asifi is INTERRUPCION-BAJA) entonces (Rangos-cualitativos is Muy.bueno) (1)
10. Si (Regulacion is ÓPTIMA) y (Generacion is BAJA) y (Asifi is INTERRUPCION-ALTA) entonces (Rangos-cualitativos is Regular) (1)
11. Si (Regulacion is ÓPTIMA) y (Generacion is ALTA) y (Asifi is INTERRUPCION-ALTA) entonces (Rangos-cualitativos is Regular) (1)
12. Si (Regulacion is ÓPTIMA) y (Generacion is ÓPTIMA) y (Asifi is INTERRUPCION-ALTA) entonces (Rangos-cualitativos is Bueno) (1)
13. Si (Regulacion is ALTA) y (Generacion is ÓPTIMA) y (Asifi is INTERRUPCION-ALTA) entonces (Rangos-cualitativos is Regular) (1)
14. Si (Regulacion is ALTA) y (Generacion is BAJA) y (Asifi is INTERRUPCION-ALTA) entonces (Rangos-cualitativos is Malo) (1)
15. Si (Regulacion is ALTA) y (Generacion is ALTA) y (Asifi is INTERRUPCION-ALTA) entonces (Rangos-cualitativos is Malo) (1)
16. Si (Regulacion is ALTA) y (Generacion is ALTA) y (Asifi is INTERRUPCION-BAJA) entonces (Rangos-cualitativos is Regular) (1)
17. Si (Regulacion is ALTA) y (Generacion is BAJA) y (Asifi is INTERRUPCION-BAJA) entonces (Rangos-cualitativos is Regular) (1)
18. Si (Regulacion is ALTA) y (Generacion is ÓPTIMA) y (Asifi is INTERRUPCION-BAJA) entonces (Rangos-cualitativos is Bueno) (1)