



**IMPLEMENTACION DEL METODO DE ARBOL DE FALLAS PARA LA
CONFIABILIDAD DE SUBESTACIONES DE ALTA TENSION MODELADO
EN MATLAB**

CARLOS ANDRES BARBOSA CUBILLOS

Asesor:

ING. OSCAR DAVID FLÓREZ CEDIEL M.Sc.



**UNIVERSIDAD DE LA SALLE
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA
BOGOTÁ, D.C.
2008**



**IMPLEMENTACION DEL METODO DE ARBOL DE FALLAS PARA LA
CONFIABILIDAD DE SUBESTACIONES DE ALTA TENSION MODELADO
EN MATLAB**

CARLOS ANDRES BARBOSA CUBILLOS

Trabajo de Grado para optar al Título de Ingeniero Electricista

**Asesor:
Ing. OSCAR DAVID FLÓREZ CEDIEL M.Sc.**



**UNIVERSIDAD DE LA SALLE
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA
BOGOTÁ, D.C.
2008**



TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN

1.	CONCEPTOS GENERALES	1
1.1	CONFIABILIDAD	1
1.1.1	Atributos	2
1.1.2	Adecuación	2
1.1.3	Seguridad	2
1.2	Métodos de análisis	2
1.2.1	Teoría de Redes	3
1.2.2	Árbol de Fallas	3
1.2.3	Analysis fault tree analysis (FTA) y failure modes and effects analysis (FMEA)	3
1.2.4	Modelos de espacio de estados	3
1.3	SUBESTACIONES ELECTRICAS	4
1.3.1	Barra sencilla	4
1.3.2	Barra principal y transferencia	5
1.3.3	Doble barra	6
2.	MÉTODOS DE ANALISIS	8
2.1	METODO FAULT TREE ANALYSIS (FTA)	8
2.2	Tipos de fallas	12
2.2.1	Fallas primarias	12
2.2.2	Fallas secundarias	13
2.2.3	Fallas operativas	13
2.3	METODO FAILURE MODES AND EFFECTS ANALYSIS (FMEA)	13
2.3.1	Metodología	14
2.4	METODO FAILURE MODES AND EFFECTS CRITICAL Y ANALYSIS (FMECA)	15
2.4.1	Índices de severidad	16
2.4.2	Categorías de probabilidad	16
2.4.3	Diagrama de Flujo de la aplicación desarrollada	17
2.5	SIMULACION DE MONTECARLO	18
3.	MODELAMIENTO DEL SISTEMA	19
3.1	CAUSAS DE LAS FALLAS	19
3.2	CONFIABILIDAD DE LOS ELEMENTOS CONSTITUTIVOS	21
3.3	MODELAMIENTO SUBESTACIÓN BARRA SENCILLA	22
3.3.1	Cálculo de la confiabilidad	23
3.4	MODELAMIENTO SUBESTACIÓN BARRA PRINCIPAL Y TRANSFERENCIA	34
3.4.1	Cálculo de la confiabilidad	36
3.5	MODELAMIENTO SUBESTACIÓN DOBLE BARRA	45



3.5.1	Cálculo de la confiabilidad	47
4.	ENERGÍA NO SUMINISTRADA	56
5.	CONCLUSIONES	57
6.	BIBLIOGRAFIA	58
7.	ANEXOS	60
*	INDICE DE TABLAS	
**	INDICE DE FIGURAS	

***INDICE DE TABLAS**

Tabla 1	Características subestación típica	19
Tabla 2	Causas típicas de falla para cada módulo de la subestación	20 - 21
Tabla 3	Confiabilidad de los elementos constitutivos	21
Tabla 4	Simulación para módulo de línea y barraje (fallas) barraje sencillo	26
Tabla 5	Simulación para módulo de línea y barraje (recuperación) barraje sencillo	27
Tabla 6	Simulación para módulo de transformador (falla) barraje sencillo	28
Tabla 7	Simulación para módulo de transformador (recuperación) barraje sencillo	29
Tabla 8	Simulación para módulo de circuitos (fallas) barraje sencillo	30
Tabla 9	Simulación para módulo de circuitos (recuperación) barraje sencillo	31
Tabla 10	Resultados de elementos de falla	32
Tabla 11	Total tiempo barraje sencillo	33
Tabla 12	Confiabilidad subestación barraje sencillo	33
Tabla 13	Simulación para módulo de línea y barraje (fallas) barra principal y transferencia	38
Tabla 14	Simulación para módulo de línea y barraje (recuperación) barra principal y transferencia	39
Tabla 15	Simulación para módulo de transformador (fallas) barra principal y transferencia	40
Tabla 16	Simulación para módulo de transformador (recuperación) barra principal y transferencia	41
Tabla 17	Simulación para módulo de circuitos (fallas) barra principal y transferencia	42
Tabla 18	Simulación para módulo de circuitos (recuperación) barra	



	principal y transferencia	43
Tabla 19	Total tiempo barra principal y transferencia	44
Tabla 20	Confiabilidad subestación barra principal y transferencia	44
Tabla 21	Simulación para módulo de línea y barraje (fallas) doble barra	49
Tabla 22	Simulación para módulo de línea y barraje (recuperación) doble barra	50
Tabla 23	Simulación para módulo de transformador (fallas) doble barra	51
Tabla 24	Simulación para módulo de transformador (recuperación) doble barra	52
Tabla 25	Simulación para módulo de circuitos (fallas) doble barra	53
Tabla 26	Simulación para módulo de circuitos (recuperación) doble barra	54
Tabla 27	Total tiempo doble barra	55
Tabla 28	Confiabilidad subestación doble barra	55
Tabla 29	Cálculo Energía No suministrada (ENS)	56

****INDICE DE FIGURAS**

		Pagina
Figura 1.1	Subestación Barra sencilla	5
Figura 1.2	Subestación Barra Principal y Transferencia	6
Figura 1.3	Subestación doble barra	7
Figura 2.1	Símbolos lógicos de un árbol de fallas	9
Figura 2.2	Árbol de fallas de una subestación simple	10
Figura 2.3	Árbol de fallas de un canal de datos y/o control	12
Figura 3.1	Diagrama unifilar subestación barra sencilla	22
Figura 3.2	FTA barra sencilla	23
Figura 3.3	Diagrama unifilar subestación barra principal y transferencia	34
Figura 3.4	FTA subestación tipo barra principal y transferencia	35
Figura 3.5	Diagrama unifilar subestación doble barra	45
Figura 3.6	FTA subestación tipo doble barra	46



AGRADECIMIENTOS

Quiero dar gracias a Dios, por la darme la oportunidad de haber culminado ésta carrera;

por entregarme los padres que tengo ya que con su entrega y dedicación han hecho de mí una persona integra, a mis hermanos, novia, amigos; agradezco la colaboración que también me brindaron en este proceso.

En especial quiero agradecerle a mi director de proyecto el Ing. Oscar David Flores Cediel, quien estuvo con constancia durante el desarrollo de éste, entregándome su asesoría y supervisión desinteresada.

De igual manera expreso mis agradecimientos a la Universidad de La Salle y a todos los profesores de la facultad de ingeniería eléctrica, por la formación integral que me fue transmitida durante todo este tiempo de educación.



INTRODUCCIÓN

Debido a que las subestaciones de alta tensión son elementos fundamentales en un sistema eléctrico de potencia; se hace necesario evaluar la confiabilidad en la operación de la misma, para que de esta forma se reduzcan los tiempos de indisponibilidad, mejorando la prestación del servicio.

Es muy importante estimar de manera cuantitativa los índices de falla y la confiabilidad de la subestación para diferentes fallas ya sean originadas internamente o en forma externa.

Para los análisis de confiabilidad de los diferentes sistemas eléctricos están el método de Monte Carlo, el método de cortes mínimos, y el método de procesos de Markov; entre los más utilizados. El objeto de este trabajo de grado es analizar la confiabilidad de una subestación de alta tensión mediante el método de árboles de falla el cual es un diagrama lógico que presenta las interrelaciones entre el evento no deseado de un sistema (efecto) y las razones para que se presente (causas). Las razones son de diferente tipo, como errores humanos, condiciones ambientales, vida útil de los componentes, etc. De esta manera un árbol de fallas indicará las diferentes combinaciones de fallas y otros eventos que afectarán la operación de la subestación.

Los resultados esperados de este trabajo son la determinación de la confiabilidad y la comparación de la energía no suministrada (ENS) para las diferentes configuraciones de subestaciones.



1. CONCEPTOS GENERALES

1.1 CONFIABILIDAD

La probabilidad p de que un sistema o componente esté funcionando en el tiempo t , es una función de p conocida como confiabilidad $R(p)$ y se identifica con la probabilidad sobrevivir hasta el tiempo t ¹.

La confiabilidad, establecida en otros términos, es la capacidad de un sistema o componente para realizar una función específica, bajo ciertas condiciones de operación en un determinado intervalo de tiempo. La confiabilidad se expresa en términos numéricos como un valor entre cero (0) y uno (1).

La confiabilidad, dentro del marco de referencia de los sistemas eléctricos, está definida por el **North American Electric Reliability Council (NERC)** como una medida que determina el grado en que el desempeño de los elementos del sistema permite que la potencia eléctrica sea entregada a los consumidores dentro de las normas aceptadas y en las cantidades deseadas².

La confiabilidad busca ante todo resguardar al sistema manteniéndolo en forma adecuada, integrado y seguro, así como limitar la aparición de fallas y, si se presentan, que el sistema pueda despejarlas lo más pronto posible, restaurando la prestación del servicio.

¹ Torres, A. Probabilidad, Procesos Estocásticos y Confiabilidad. Universidad de Los Andes. 2002

² Torres, A. Curso Confiabilidad. Universidad de Los Andes. 2005



1.1.1 Atributos

Siendo los sistemas eléctricos de características dinámicas presentan los atributos de adecuación y seguridad en relación con la confiabilidad³:

1.1.2 Adecuación

Habilidad de un sistema para operar de acuerdo con los requerimientos, en todo momento. En el caso de los sistemas de potencia, la adecuación implica que existen suficientes recursos disponibles de generación y transmisión para satisfacer las necesidades proyectadas y las reservas para contingencias o emergencias que se puedan presentar en determinado momento de operación del mismo. A esto se le conoce también como confiabilidad estática.

1.1.3 Seguridad:

Capacidad de un sistema para soportar las perturbaciones inesperadas. La seguridad implica que el sistema como tal permanecerá intacto inclusive después de salidas o fallas ocurridas en el sistema o en los equipos. A esto se le conoce también como confiabilidad dinámica.

1.2 Métodos de análisis

Para evaluar la confiabilidad de sistemas o componentes se tienen los métodos de teoría de redes, árboles de falla, **fault tree analysis (FTA)** y **failure modes and effects analysis (FMEA)** y los modelos de espacio de estados.

³ Torres, A. Curso Confiabilidad. Universidad de Los Andes. 2005



1.2.1 Teoría de Redes

Se consideran los sistemas como estructuras complejas coherentes o no coherentes y se utiliza la teoría de redes (conjuntos de corte mínimo, etc.) para obtener las soluciones de confiabilidad a través de métodos analíticos o de simulaciones de Monte Carlo (SMC).

1.2.2 Árbol de Fallas

Permite cuantificar las fallas de un sistema utilizando una aproximación de arriba hacia abajo (“**top-down**”) para determinar de manera sistemática las condiciones de falla de un sistema.

1.2.3 **Analysis fault tree analysis (FTA) y failure modes and effects analysis (FMEA)**

Estos son aproximaciones de abajo hacia arriba (“**bottom-up**”) para identificar, de manera estructurada y sistemática, los modos de falla y los efectos y criticidad de estos modos con respecto a la seguridad y misión del sistema y/o elementos.

1.2.4 Modelos de espacio de estados

Permiten describir los diferentes posibles estados del sistema y sus transiciones, así como las funciones probabilísticas que las describen. Los más conocidos y trabajados son el modelo de Markov y los modelos No- Markovianos

1.3 SUBESTACIONES ELÉCTRICAS

Una subestación es la manifestación física de un nodo de un sistema eléctrico de potencia, en el cual la energía es transformada en niveles correspondientes de tensión que permitan su transporte, distribución y consumo. La subestación está conformada por un conjunto de equipos que controlan el flujo de energía y garantizan la seguridad del sistema por medio de dispositivos automáticos de protección⁴.

La configuración de una subestación es el arreglo de los equipos electromecánicos constitutivos de un patio de conexiones que estén referenciados a un mismo nivel de tensión. Entre las principales configuraciones están barra sencilla, barra principal y transferencia y doble barra.

1.3.1 Barra sencilla

Cuenta con una sola barra en la cual se conectan los diferentes equipos a un mismo nivel de tensión. Este tipo de configuración es muy económica, simple en cuanto a las protecciones se refiere y no presenta muchas posibilidades de una incorrecta operación. Una característica muy importante es la baja confiabilidad, flexibilidad y seguridad; debido a la suspensión del servicio totalmente para realizar una reparación o mantenimiento de la subestación.

En la figura 1.1 se muestra el diagrama unifilar de una subestación de barra sencilla.

⁴ Ramírez, C. Subestaciones de Alta y Extra Alta Tensión. 2003

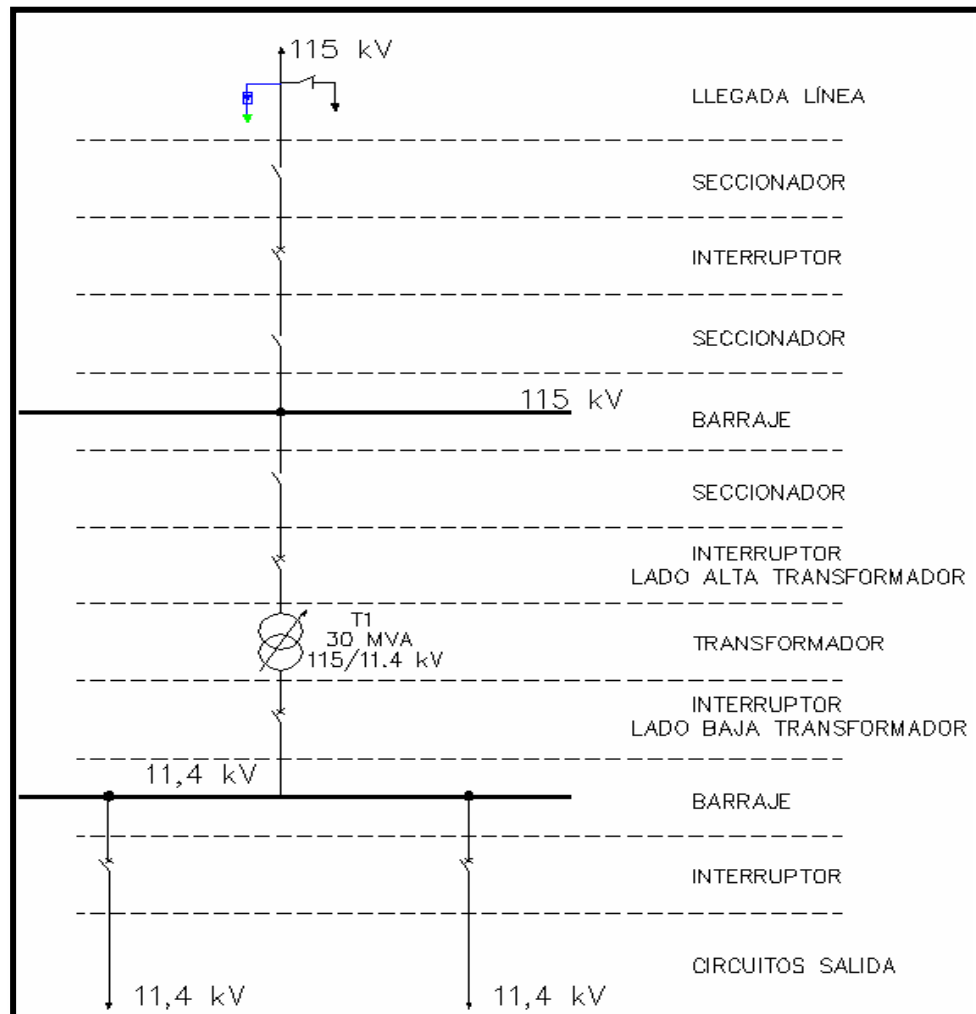


Figura 1.1 Subestación Barra Sencilla

1.3.2 Barra principal y transferencia

Esta configuración presenta mayor confiabilidad que la de barra sencilla, debido a que cada circuito se puede conectar mediante un interruptor (con sus seccionadores asociados) de transferencia, manteniendo el suministro de energía durante el mantenimiento o fallas de un interruptor de los circuitos de llegada de línea o de salida. En la figura 1.2 se muestra el diagrama unifilar de una subestación de barra principal y transferencia.

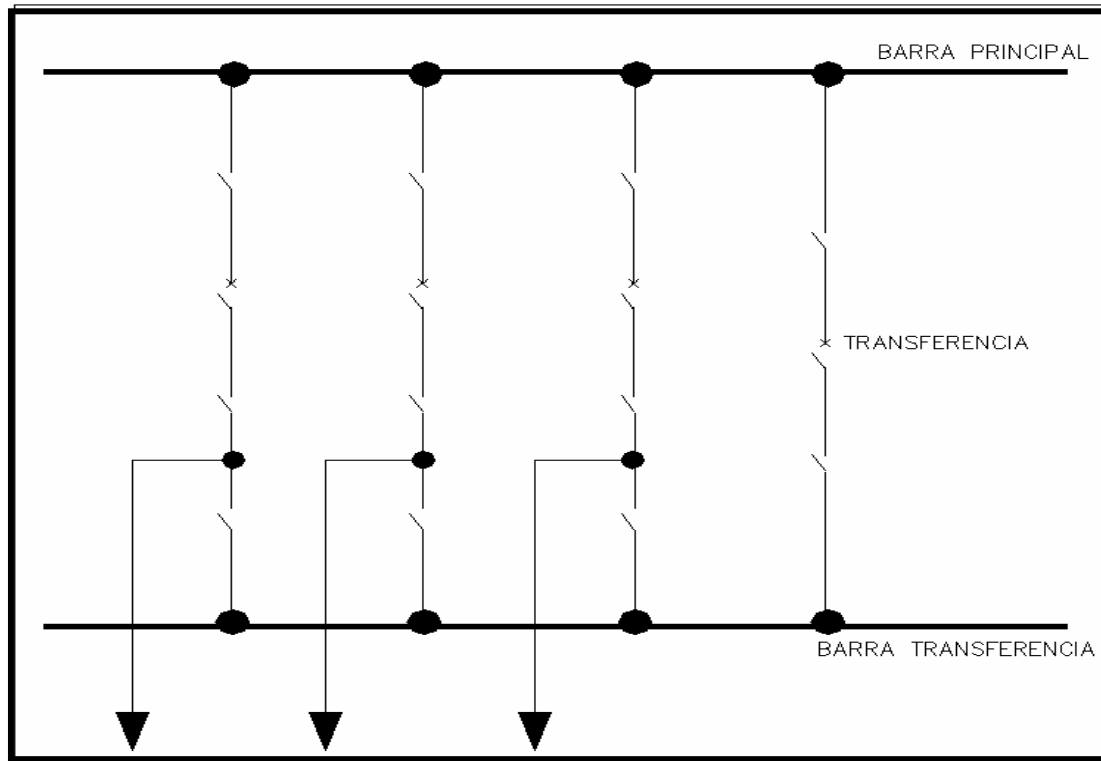


Figura 1.2 Subestación barra principal y transferencia

1.3.3 Doble Barra

Para aumentar la flexibilidad de la configuración barra sencilla, se adiciona una segunda barra principal y un interruptor para el acoplamiento de las dos barras, logrando la configuración de doble barra. Las características de esta configuración son la separación de circuitos en cada una de las barras, logrando dividir sistemas; es muy confiable en caso de falla en barras e interruptores; como también facilita el mantenimiento de las barras sin necesidad de interrumpir, siendo ideal para áreas con alta contaminación ambiental.

Es muy importante que las dos barras tengan la misma capacidad y a su vez la capacidad total de la subestación, así como también los interruptores y equipos asociados. En la figura 1.3 se muestra el diagrama unifilar de una subestación de doble barra.

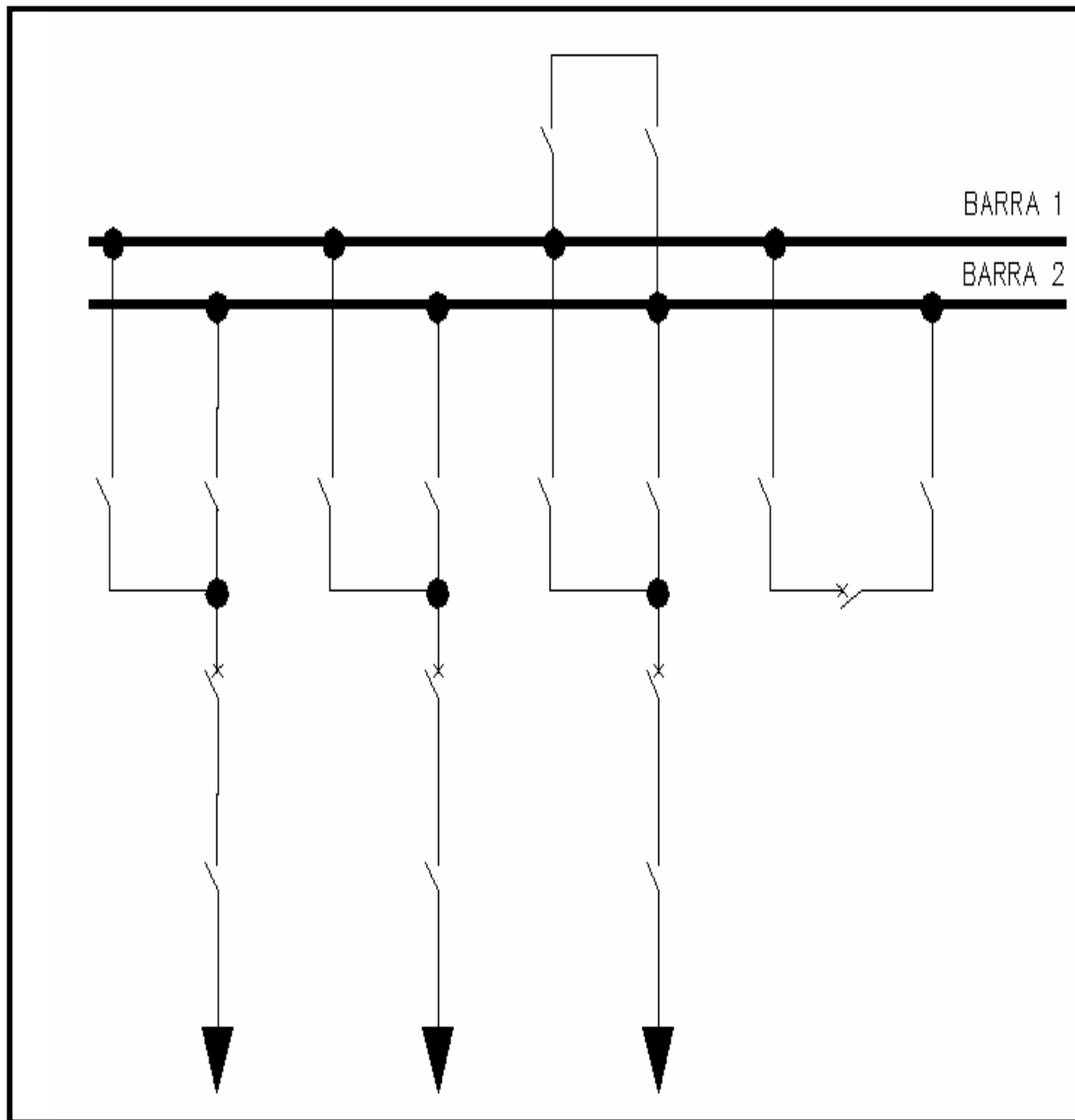


Figura 1.3 Subestación doble barra



2. METODOS DE ANALISIS

Para analizar los eventos que producen fallas en las subestaciones de alta tensión existen dos modelos básicos: el modelo *deductivo*, el cual ante un problema, en principio muy complejo, se divide en varios subproblemas que a su vez pueden ser divididos en otros problemas mucho más sencillos de tratar. En el caso de una falla esto se traducirá en la división del sistema completo en módulos, cada uno de los cuales con una fallas características. A su vez, estos módulos, dependiendo siempre de la complejidad del sistema, se pueden dividir en otros módulos hasta llegar a los componentes básicos del mismo. A este modelo también se le conoce como "**Top-Down**", siendo el método **fault tree analysis (FTA)** el más representativo del modelo *deductivo*.

El otro modelo es el modelo *inductivo*, el cual realiza la descripción del sistema que se pretende analizar, empezando por describir los componentes más pequeños del sistema para, más adelante, agruparlos en diferentes módulos, y estos a su vez en otros módulos hasta llegar a uno solo que representa el sistema completo. A este modelo se le conoce también como "**Bottom-Up**" (abajo hacia arriba), siendo los métodos **failure modes and effects analysis (FMEA)** y **failure modes and effects critically analysis (FMECA)**, los más representativos del modelo *inductivo*.

2.1 METODO FAULT TREE ANALYSIS (FTA)⁵

Este método permite realizar un análisis precedente que permite anticiparse a una(s) posible(s) fallas antes que realmente se presenten. El análisis inicia por la parte superior del árbol, en la cual estará ubicado el evento no deseado (falla). En un nivel inferior se establecerán los eventos y factores que son causantes de la falla mediante

⁵ Jaimes, A. Seguridad en los Sistemas de Potencia Industriales. Proyecto de grado. Universidad de Los Andes. 2004

un diagrama lógico conformado por compuertas lógicas de tipo AND y OR, en donde las entradas de las mismas son los factores que generarán la falla.

Dependiendo de la complejidad del sistema, esta serie de relaciones van conformando una especie de árbol, razón por la cual toma su nombre. En la figura 2.1 se muestran los símbolos básicos de un árbol de falla

Mediante la utilización de herramientas computacionales se podrán apreciar las debilidades o fortalezas del sistema tanto en el momento del diseño como en la operación del mismo, ya que los puntos débiles o fuertes se notarán claramente en una gráfica que modela el sistema.

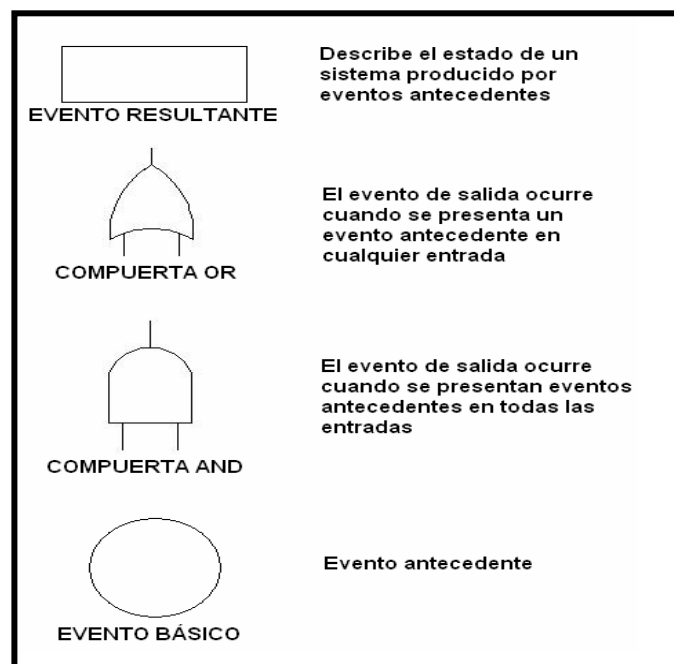


Figura 2.1. Símbolos lógicos básicos de un árbol de fallas

Tomando una configuración básica de una subestación, como por ejemplo el de la figura 1.1; el evento no deseado es la falla de la subestación, el cual se representa como el bloque en el nivel superior del árbol. Se pueden considerar cuatro eventos

básicos para que una subestación simple pueda fallar: falla en el módulo de la línea de transmisión, falla en el módulo del transformador, falla en el módulo de barraje y falla en el módulo de los circuitos.

Ante la ocurrencia de cualquiera de estos eventos básicos de falla, esta representado por una compuerta de tipo OR. Este tipo de compuerta habilita la salida cuando se presenta un evento en cualquiera de sus entradas, siendo las entradas de la misma uno de los eventos antes mencionados. Para esta compuerta en el caso de presentarse simultáneamente en las entradas los eventos, la salida también estaría habilitada. Por esto se conoce como compuerta OR, ya que es una *o* cualquier entrada. La representación del árbol de falla se presenta en la figura 2.2.

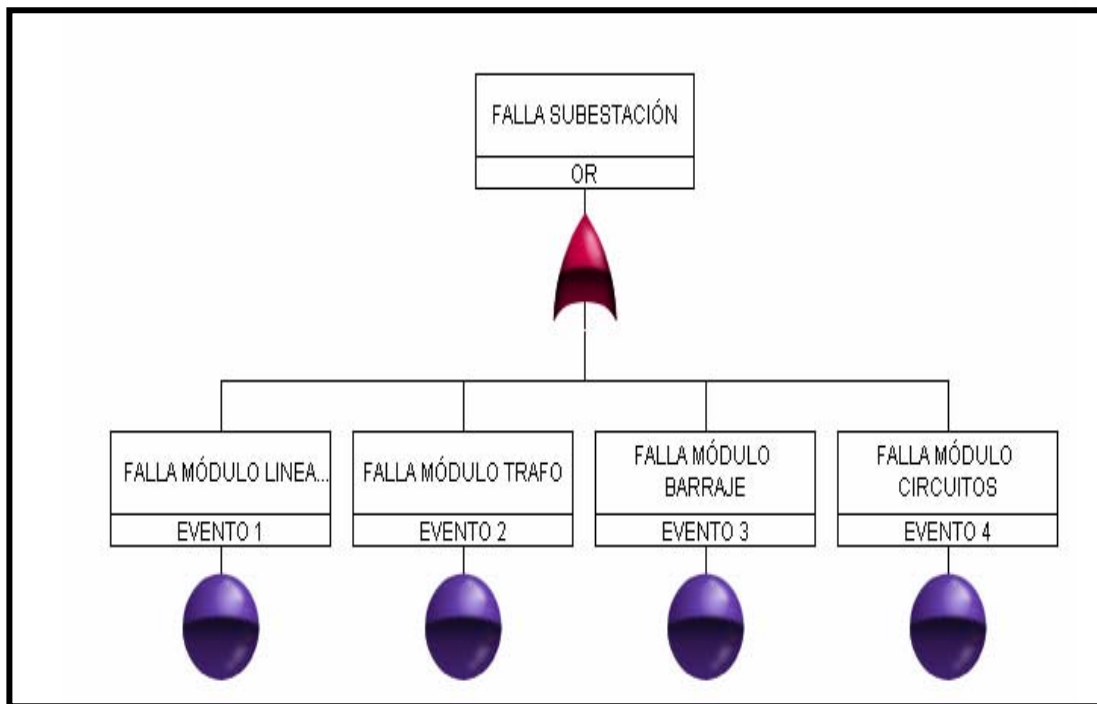


Figura 2.2 Árbol de fallas de una subestación simple



No en todos los casos las fallas solo se representan con compuertas de tipo OR. Para el siguiente caso⁶, presentado en la figura 2.3; en donde el sistema a analizar es el canal de comunicaciones para las protecciones, se aprecia la redundancia que tiene el microprocesador del relé y el repetidor (**IED subsystem**), los cuales están duplicados. Para el análisis en árbol de fallas se tiene que presentar que tanto el principal como la suplencia fallen; es decir, si solo falla uno de los dos el otro respalda al sistema y no habría ningún problema. En el caso de presentarse que los dos fallen, se representa mediante una compuerta lógica AND.

Analizando el sistema se tiene que si falla el sistema IED principal y el respaldo o falla en el canal (**gateway fails**) o falla en el repetidor de red (**repeater network fails**) o falla del relé de red (**realy fails network**) o falla la conexión maestra principal y la de respaldo; el evento no deseado es la no disponibilidad de canal para datos o control del sistema.

Matemáticamente, mediante algebra booleana, el sistema estaría descrito de la siguiente forma:

No disponibilidad de canal para datos y/o control del sistema= (IED principal \times IED respaldo) + falla en el canal (**gateway fails**) + falla en el repetidor de red (**repeater network fails**) + falla del relé de red (**realy fails network**) + (falla conexión maestra principal \times falla conexión maestra de respaldo).

Lo anterior debido a que las compuertas AND son representadas por multiplicación, mientras las compuertas OR son representadas por suma; todo dentro del marco de referencia de operaciones lógicas.

⁶ Dolezilek, D. Case study of a large transmission and distribution substation automation project. SEL Inc. 1999

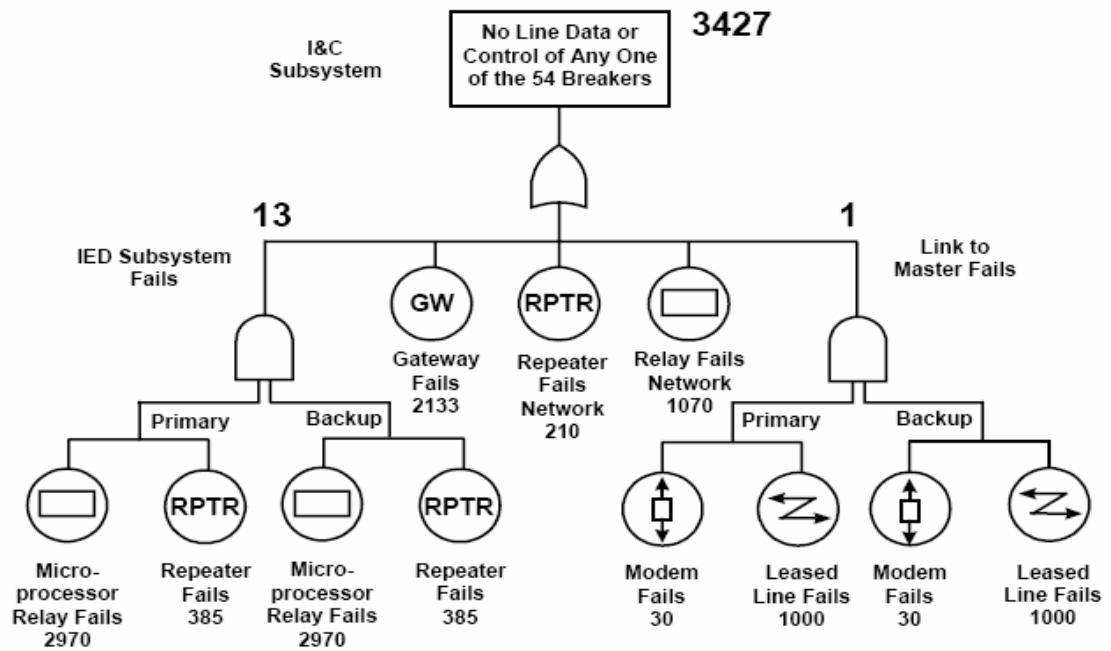


Figura 2.3 Árbol de fallas de un canal de datos y/o control⁷

2.2 Tipos de fallas⁸

En el FTA, las fallas de los componentes se clasifican de la siguiente manera:

2.2.1 Fallas primarias

Se presentan por las características propias del componente. Generalmente asociadas a la terminación de la vida útil, ya sea por cumplimiento de su ciclo operativo o incidencias ambientales que incurren en el mismo.

⁷ Dolezilek, D. Case study of a large transmission and distribution substation automation project. SEL Inc. 1999

⁸ Lopez, M. Rico, J. Seguridad en Sistemas de Potencia Industrial. Proyecto de grado. Universidad de Los Andes. 2003



2.2.2 Fallas secundarias

Se presentan cuando el componente no trabaja bajo las condiciones operativas propias, sino que es exigido más allá de sus propios límites de diseño y fabricación. En la mayoría de los casos, una falla primaria conlleva a una falla secundaria, ya que otro componente del sistema asume las funciones del que presentó la falla primaria.

2.2.3 Fallas operativas

Estas ocurren cuando se presentan fallas en el control del sistema o se denomina así a las perturbaciones internas o externas del mismo. No implica fallas en los componentes en sí, sino en el gobierno y operación del sistema.

2.3 METODO FAILURE MODES AND EFFECTS ANALYSIS (FMEA)

El método FMEA es un análisis de tipo *inductivo*, el cual tiene en cuenta las fallas presentadas por los componentes ubicados en el nivel inferior del sistema, para posteriormente ir escalando en la jerarquía del mismo. Este método tiene en cuenta la probabilidad de encontrar fallas (detectabilidad), el grado de importancia de la falla presentada (severidad) y la cantidad de veces que se presenta la falla (frecuencia).

Para aplicar FMEA es muy importante tener definido claramente el sistema mediante gráficas del (los) proceso (s), documentación, etc.; tener una codificación clara y completa de todos los componentes del sistema, así como la división del mismo teniendo por supuesto en cuenta la arquitectura; y buscar sin pasar por alto ningún detalle registrando debidamente lo encontrado en los formatos correspondientes.



2.3.1 Metodología⁹

La metodología recomendada para estructurar FMEA es la siguiente:

1. Identificar y marcar los componentes del sistema.
2. Describir las funciones que presenta cada componente.
3. Tener en cuenta cualquier tipo de falla que se pueda presentar, así tenga una mínima probabilidad de presentarse.
4. Analizar los efectos o repercusiones que se puedan presentar ante la falla de cualquiera de los elementos del sistema; es decir, analizar la severidad.
5. Se debe registrar lo más detalladamente todas las causas y/o factores que hace que un componente del sistema presente una falla.
6. Calcular el número de prioridad de riesgo (NPR), el cual es el producto de los índices de ocurrencia, severidad y probabilidad de no detección de la falla. Este NPR debe ser calculado para todas las causas de falla que se puedan presentar. Las fallas con valores superiores a los preestablecidos y con mayor índice de severidad deben tener prioridad para la búsqueda de soluciones.
7. Descripción de las posibles soluciones si se presenta una falla. Dentro de esta descripción se debe aclarar los responsables de estas acciones a ejecutar, como también los plazos máximos para concluir las mismas.

⁹ Jaimes, A. Seguridad en los Sistemas de Potencia Industriales. Proyecto de grado. Universidad de Los Andes. 2004



8. Recalcular los índices teniendo presente las modificaciones que se presenten con presencia de fallas, verificando que estén dentro de los valores deseados.

Los datos deben ser registrados en los formatos correspondientes¹⁰, los cuales incluyen la información general del sistema, codificación de los componentes, nivel de operación de los diferentes componentes, modo de falla, causa de falla, efecto de falla, estimación de los índices de severidad, detectabilidad, frecuencia y la acción a realizar.

No se debe olvidar que FMEA recomienda las acciones preventivas para tomar, de manera que se reduzcan las fallas que un sistema pueda presentar. No obstante los riesgos asociados por errores o fallas operativas humanas o debidas a las acciones del medio ambiente, no están directamente relacionadas con este método.

De acuerdo a lo complejo del sistema será necesario utilizar herramientas computacionales especializadas en este tipo de análisis, que además será un complemento a un análisis de tipo FTA.

2.4 METODO FAILURE MODES AND EFFECTS CRITICALY ANALYSIS (FMECA)

El método failure modes and effects criticaly analysis (FMECA), es muy similar al FMEA difiriendo en una análisis de criticidad, en el cual se calcula un factor de riesgo que determina el índice de severidad y la probabilidad vinculada al componente del sistema. Generalmente se utilizan los cálculos de tasas de falla (λ) que se obtienen de los pronósticos probabilísticos que puedan indicar la presencia de fallas tanto de componentes como del mismo sistema.

¹⁰ Mohr, R. Failures Modes and Effects Analysis. Jacobs Sverdrup Octava Edición. 2002



Los índices de severidad y las categorías de probabilidad se presentan a continuación.¹¹

2.4.1 Índices de severidad

Los índices de severidad están clasificados de la siguiente forma:

Categoría 1: Es de tipo despreciable ya que sus características no afectan al sistema de ninguna manera.

Categoría 2: Es de tipo marginal ya que sus características afectan al sistema con un daño de clase menor.

Categoría 3: Es de tipo crítico, debido a que el sistema presenta un daño severo.

Categoría 4: Es de tipo catastrófico, ya que se pierde totalmente el sistema.

2.4.2 Categorías de probabilidad

Las categorías de probabilidad están catalogadas de la siguiente manera:

Categoría 1: Es de imposible ocurrencia, ya que es físicamente imposible que afecte al sistema de alguna manera.

Categoría 2: Es extremadamente improbable que se presente y su probabilidad es cercana a cero (0).

Categoría 3: Es típicamente remoto que se presente y se asume que no sucede habitualmente.

Categoría 4: Es de tipo ocasional que se presente y se asume que posiblemente suceda.

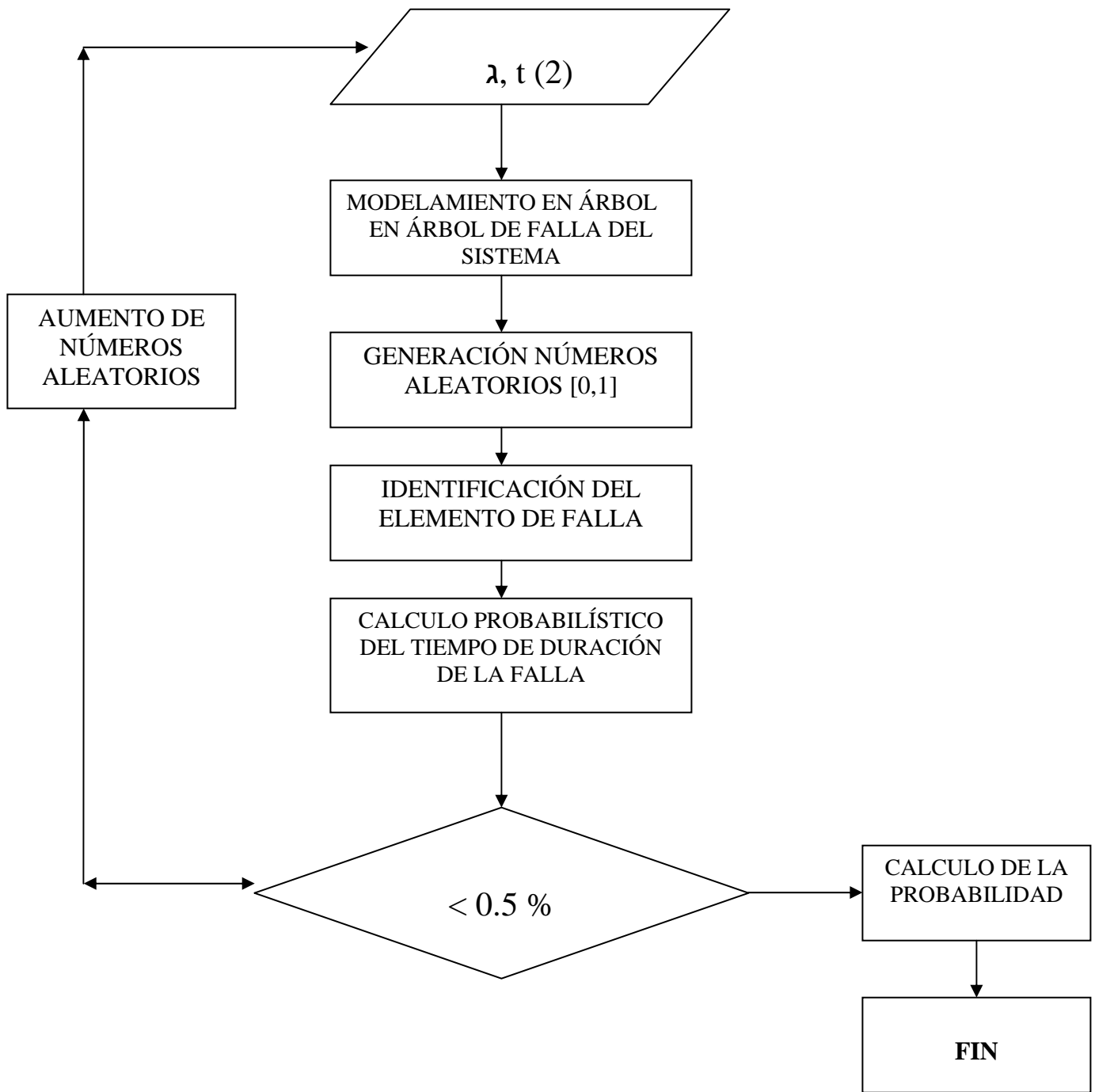
Categoría 5: Es razonablemente probable que se presente y se asume que acontecerá varias veces.

Categoría 6: Es de tipo frecuente que se presente y ocurre habitualmente.

¹¹ Jaimes, A. Seguridad en los Sistemas de Potencia Industriales. Proyecto de grado. Universidad de Los Andes. 2004



DIAGRAMA DE LA APLICACIÓN DESARROLLADA





2.5 SIMULACION DE MONTECARLO

Está basado en la generación de números aleatorios y el procedimiento es simular el comportamiento aleatorio del sistema para obtener en forma artificial los índices de confiabilidad de los puntos de carga.

Este es un método de análisis versátil dado que:

- Permite utilizar cualquier distribución para modelar los tiempos para salida y restauración de los componentes.
- Permite resolver sistemas en los cuales no existe una solución analítica.
- Permite obtener las distribuciones de probabilidad de los índices de confiabilidad de los puntos de carga, lo cual es muy útil para valorar el riesgo de que ocurran diferentes valores de los índices.
- Los cambios en el sistema se realizan en la base de datos sin que sea necesario realizar cambios en el software.¹²

¹² Zapata C, et al. El método de simulación de montecarlo en estudios de confiabilidad de sistemas de distribución de energía eléctrica. scientia et technica año x, no 24, mayo 2004. utp. issn 0122-1701



3. MODELAMIENTO DEL SISTEMA

Para modelar el sistema se tomará una subestación típica con las siguientes características, variando su configuración (barra sencilla, transferencia y doble barra) de manera que se pueda estimar para cada una de ellas su confiabilidad.

Tabla 1. Características subestación típica

ELEMENTO	DESCRIPCION
Módulo línea	Línea de llegada Línea de salida
Módulo de barraje alta tensión	Capacidad 300 A
Módulo transformador	12 MVA 115/11,4 kV
Módulo de barraje media tensión	Capacidad 3.040 A
Módulo de circuitos	Cantidad 3 de 200 A aprox. cada uno

3.1 CAUSAS DE LAS FALLAS

Para que se produzca una falla en cada módulo se pueden presentar diversas causas tanto internas como externas. Un motivo de este trabajo es identificar cada posible causa de estas fallas de manera que se puedan recomendar soluciones que minimicen las mismas. A continuación se presentan las causas típicas de falla para cada módulo de la subestación.

Tabla 2 Causas típicas de falla para cada módulo de la subestación.¹³

MÓDULO SUBESTACIÓN	TIPO DE FALLA	CAUSA
Línea	Eléctrica	<ul style="list-style-type: none">• Flameo inverso• Sobrecarga• Corto circuito (presencia pájaros o árboles)• Falla en el apantallamiento.
	Mecánica	<ul style="list-style-type: none">• Acercamiento de fases (acción del viento)• Perforación de aisladores• Rotura del conductor• Falla en la cimentación de la estructura de la torre.
Transformador	Eléctrica	<ul style="list-style-type: none">• Mal estado del aislamiento• Sobrecarga• Sobretensión mayor al tiempo límite• Falla a tierra.
	Mecánica	<ul style="list-style-type: none">• Mal estado del aceite• Falla de las protecciones mecánicas.
Barraje	Eléctrica o Mecánica	<ul style="list-style-type: none">• Sobrecarga.• Animales (corto circuito entre fases o estas a tierra).• Falta de mantenimiento (muy común en zonas con alto nivel de contaminación por gases o errores operativos).

¹³ Guzmán, S. Energy Computer Graphics. Entrevista Personal. Junio 2007. Bogotá.

Circuitos	Eléctrica	<ul style="list-style-type: none"> • Corto circuito (presencia de árboles o pájaros en las estructuras). • Sobrecarga. • Sobretensión.
	Mecánica	<ul style="list-style-type: none"> • Falla estructural (ya sea propia o inducida por accidente, terrorismo, etc.). • Rotura en el conductor.

3.2 CONFIABILIDAD DE LOS ELEMENTOS CONSTITUTIVOS

La confiabilidad de los elementos constitutivos de la subestación se presenta en la tabla 3 a continuación.

Tabla 3. Confiabilidad de los elementos constitutivos*

MÓDULO	EVENTO	TASA DE FALLA λ Fallas/año	SALIDA FORZADA $\lambda * \Gamma$
Línea	Falla en el flujo de potencia	0,00000001	2,582
Línea	Falla de los relés de protección	0,0006	0,0030
Línea	Falla en el interruptor	0,0036	0,2992
Barraje	Falla en el aislamiento	0,34	0,911
Transformador	Falla en el aislamiento	0,0061	0,0220
Transformador	Falla interna	0,0030	1,0260
Transformador	Falla en el interruptor	0,0061	0,0220
Transformador	Falla en los conductores	0,0018	0,0450
Circuitos	Falla en los interruptores	0,0002	0,0008
Circuitos	Falla en los conductores	0,0004	0,0044
Circuitos	Falla en el barraje	0,0024	0,0576

*Tomado de IEEE. Recommended practice for the design of reliable industrial and comercial systems. Standard 493- 1997

3.3 MODELAMIENTO SUBESTACIÓN BARRA SENCILLA

Para una configuración de subestación tipo barra sencilla, el FTA se presenta en la figura No. 3.2; el diagrama unifilar de la misma se presenta en la figura No. 3.1 Para el desarrollo del presente trabajo se tendrá un transformador, una línea de llegada y otra de salida, dos barrajes uno de alta tensión (115 kV) y otro de media tensión (11,4 kV) y tres (3) circuitos de salida a las cargas del sistema.

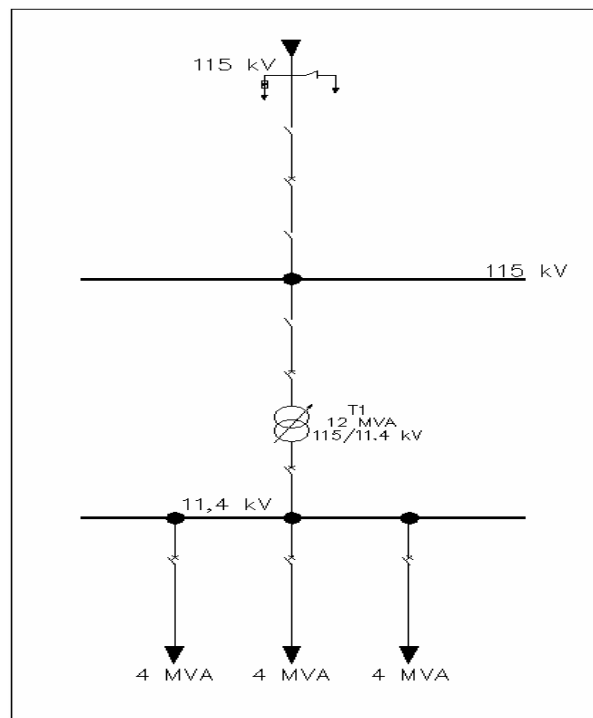


Figura No. 3.1 Diagrama unifilar subestación barra sencilla

Para el análisis FTA, el evento no deseado ubicado en la parte superior del diagrama (falla) de la subestación, se calculará a partir de las tasas de falla de cada uno de los elementos que la constituyen de acuerdo a lo establecido por el standard 493-1997 IEEE **Recomended Practice for the Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems**, documento el cual es referencia para estudios de

confiabilidad de sistemas eléctricos, el cual en este por tener una carga 12 MVA se considera industrial.

Para el análisis FTA, estas fallas se presentan en la figura No. 3.2

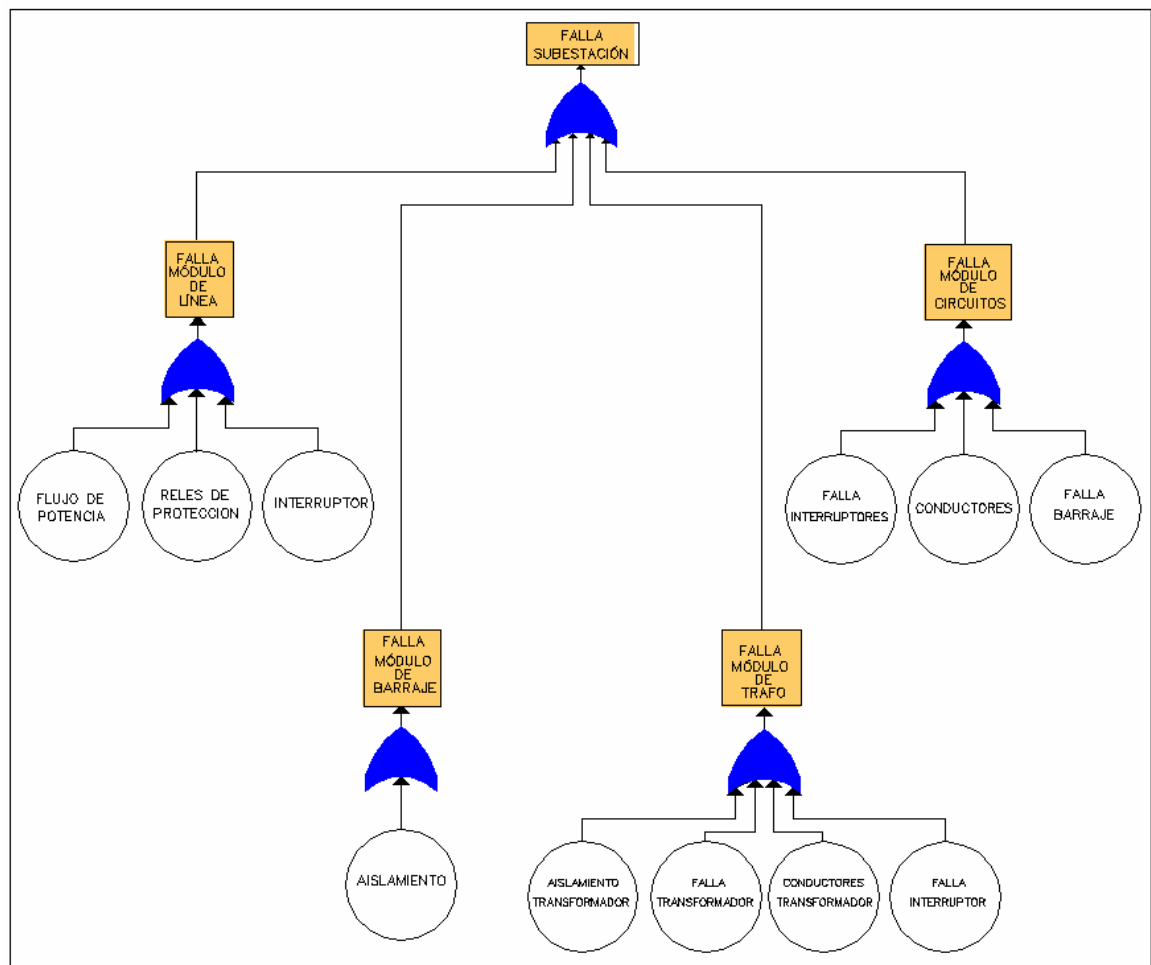


Figura No. 3.2 FTA barra sencilla

3.3.1 Cálculo de la confiabilidad

De acuerdo al FTA presentado en la figura No. 3.2, la expresión lógica es la siguiente:

$$Y = Flínea + Fbarraje + Ftransformador + Fcircuitos$$

donde:

Y: Evento no deseado (falla Subestación)

Flínea: Falla en el módulo de línea

Fbarraje: Falla en el módulo de barraje

Ftransformador: Falla en el módulo de transformador

Fcircuitos: Falla en el módulo de circuitos

La expresión lógica toma la suma de los módulos debido a que se trabaja con el operador OR (mencionado en el capítulo 2, pág. 11; del presente documento) lo que significa que si falla cualquiera de los módulos es suficiente para que se presente la falla de la subestación.

El algoritmo para el cálculo de la confiabilidad es el siguiente:

1. Obtención de las tasas de falla λ y tiempo de duración de la misma para todos los componentes de la subestación.
2. Análisis de árbol de falla del sistema.
3. Simulación de Montecarlo. Generación de números aleatorios uniformes entre 0 y 1; ya que todos tienen la misma probabilidad de ocurrencia. (Estos representan la probabilidad de falla que cada elemento va a tener).
4. Determinación del elemento causante de la falla, a partir de la comparación de tiempo de ocurrencia de la falla para todos los elementos.
5. Tiempo de duración de la falla, según el elemento causante de la misma.
6. Repetición de los pasos 5 y 6 para cada simulación.
7. Determinación de probabilidad de falla del sistema para cada uno de los elementos y la confiabilidad del sistema. (S/E)



Para el desarrollo del cálculo de confiabilidad se utilizó el programa Matlab 6.5 el cual entregó los siguientes resultados, para un total de 1000 simulaciones. Es importante resaltar que sólo se muestran las primeras filas de las simulaciones.

Para determinar el elemento causante de la falla, se comparan el tiempo de ocurrencia de la falla para todos los elementos, de la siguiente manera:

$$SI(D8=MIN(D8;F8;H8;L8;N8;P8;R8;V8;X8;Z8);1;0)$$

En donde:

D8= Falla relés de protección

F8= Falla en el interruptor de potencia

H8= Falla del aislamiento en el barraje

L8= Falla en el aislamiento en el transformador

N8= Falla interna en el transformador

P8= Falla en el interruptor del transformador

R8= Falla en los conductores del transformador

V8= Falla en el interruptor de circuitos

X8= Falla en los conductores de circuitos

Z8= Falla en el barraje del módulo de circuitos

Tabla 4. Simulación para módulo de línea y módulo de barraje (fallas) barraje sencillo

D8	F8	H8
2	3	4
7.1445e+003	1.8903e+002	9.3193e-001
7.1436e+003	1.8810e+002	9.3193e-001
7.1426e+003	1.8717e+002	6.8769e+000
7.1392e+003	1.8370e+002	3.4094e+000
7.1357e+003	1.8029e+002	2.2743e+000
7.1335e+003	1.7801e+002	7.1367e-001
7.1328e+003	1.7730e+002	4.4449e+000
7.1283e+003	1.7286e+002	2.1862e+000
7.1261e+003	1.7067e+002	5.6624e+000
7.1205e+003	1.6501e+002	4.5145e+000
7.1160e+003	1.6049e+002	2.2935e+000
7.1137e+003	1.5820e+002	1.1962e-002
7.1136e+003	1.5819e+002	4.2757e+000
7.1094e+003	1.5391e+002	8.3552e-001
7.1085e+003	1.5308e+002	3.2207e+000
7.1053e+003	1.4986e+002	3.3905e-001
7.1050e+003	1.4952e+002	1.6993e-001
7.1048e+003	1.4935e+002	5.6183e-001
7.1042e+003	1.4878e+002	7.2863e-001

...continúan las filas hasta 1.000



Tabla 5. Simulación para módulo de línea y barraje (recuperación) barraje sencillo

2	3	4
4.2212e-001	6.6067e+001	2.5000e-001
1.7940e+000	1.6582e+002	2.5000e-001
9.9240e-001	5.0683e+001	2.5000e-001
6.2968e+000	1.0362e+002	2.5000e-001
7.8095e+000	3.3218e+001	2.5000e-001
2.0123e+000	4.4667e+001	2.5000e-001
7.6075e+000	1.7553e+001	2.5000e-001
7.4953e+000	1.4785e+002	2.5000e-001
5.5295e-001	1.6875e+002	2.5000e-001
1.9948e+000	7.9943e+001	2.5000e-001
1.5130e+000	1.0261e+001	2.5000e-001
2.4584e+000	7.7872e+001	2.5000e-001
1.1383e+001	4.7646e+001	2.5000e-001
7.2788e+000	4.7132e+001	2.5000e-001
1.4005e+000	8.3355e+001	2.5000e-001
3.0316e+000	7.5350e+001	2.5000e-001
1.5897e+000	3.4050e+001	2.5000e-001
2.7511e+000	1.9684e+001	2.5000e-001
6.0029e+000	4.8292e+001	2.5000e-001
8.5032e+000	2.5967e+001	2.5000e-001

...continúan las filas hasta 1.000

Tabla 6. Simulación para módulo de transformador (falla) barraje sencillo

L8	N8	P8	R8
5	6	7	8
2.8239e+002	5.3314e+000	5.1616e+001	2.3665e+002
2.8146e+002	4.3994e+000	5.0684e+001	2.3572e+002
2.8053e+002	3.4675e+000	4.9752e+001	2.3479e+002
2.7706e+002	5.5793e+002	4.6285e+001	2.3132e+002
2.7365e+002	5.5452e+002	4.2876e+001	2.2791e+002
2.7138e+002	5.5225e+002	4.0601e+001	2.2564e+002
2.7066e+002	5.5154e+002	3.9888e+001	2.2492e+002
2.6622e+002	5.4709e+002	3.5443e+001	2.2048e+002
2.6403e+002	5.4491e+002	3.3256e+001	2.1829e+002
2.5837e+002	5.3924e+002	2.7594e+001	2.1263e+002
2.5386e+002	5.3473e+002	2.3080e+001	2.0811e+002
2.5156e+002	5.3244e+002	2.0786e+001	2.0582e+002
2.5155e+002	5.3242e+002	2.0774e+001	2.0581e+002
2.4727e+002	5.2815e+002	1.6498e+001	2.0153e+002
2.4644e+002	5.2731e+002	1.5663e+001	2.0070e+002
2.4322e+002	5.2409e+002	1.2442e+001	1.9748e+002
2.4288e+002	5.2375e+002	1.2103e+001	1.9714e+002
2.4271e+002	5.2358e+002	1.1933e+001	1.9697e+002
2.4215e+002	5.2302e+002	1.1371e+001	1.9641e+002
2.4142e+002	5.2229e+002	1.0643e+001	1.9568e+002

...continúan las filas hasta 1.000

Tabla 7. Simulación para módulo de transformador (recuperación) barraje sencillo

5	6	7	8
2.6647e-001	7.5560e+002	8.9926e-001	4.7766e+000
3.0528e+000	3.9344e+002	1.2779e-001	1.3216e+001
1.2890e+001	3.7009e+002	3.5000e-001	1.4485e+001
5.2056e-001	1.1991e+002	1.9181e-001	1.2863e+002
1.8656e+000	3.6192e+002	1.4544e-002	7.6183e+001
1.5059e+000	6.0011e+000	1.3730e-002	7.4197e+001
3.3257e+000	3.6771e+002	9.9218e-001	4.9531e-001
8.8620e-001	4.0527e+002	5.2547e-002	2.5845e+001
1.0131e-001	6.2504e+002	1.2313e+000	3.7916e+000
1.7348e+000	8.7485e+001	8.0203e-001	1.1052e+001
2.5888e+000	9.7500e+002	2.9094e-001	2.4951e+001
2.5846e-001	3.9751e+002	4.7443e-001	2.7284e+001
4.1428e+000	6.8392e+002	5.1509e-002	3.0839e+001
1.9532e-001	1.5362e+002	6.1753e-001	5.9639e+001
9.7593e-001	7.0782e+002	8.1114e-002	6.2212e+001
2.8010e-001	1.3560e+003	2.1425e+000	2.1524e+001
6.4405e+000	3.9217e+002	1.8606e-001	1.4571e+001
1.2155e+000	1.6140e+001	1.1131e-001	5.1022e+000
1.4528e-001	3.0202e+002	3.5873e-001	1.3753e+001
5.9998e+000	3.8971e+002	3.6628e-001	1.8983e+001

...continúan las filas hasta 1.000



Tabla 8. Simulación para módulo de circuitos (fallas) barraje sencillo

9	10	11
V8	X8	Z8
8.1509e+001	1.9092e+003	9.6675e+002
7.8042e+001	1.9057e+003	9.6328e+002
7.4632e+001	1.9023e+003	9.5987e+002
7.2358e+001	1.9001e+003	9.5760e+002
7.1644e+001	1.8993e+003	9.5688e+002
6.7200e+001	1.8949e+003	9.5244e+002
6.5013e+001	1.8927e+003	9.5025e+002
5.9351e+001	1.8870e+003	9.4459e+002
5.4836e+001	1.8825e+003	9.4007e+002
5.2543e+001	1.8802e+003	9.3778e+002
5.2531e+001	1.8802e+003	9.3777e+002
4.8255e+001	1.8759e+003	9.3349e+002
4.7420e+001	1.8751e+003	9.3266e+002
4.4199e+001	1.8719e+003	9.2944e+002
4.3860e+001	1.8716e+003	9.2910e+002
4.3690e+001	1.8714e+003	9.2893e+002
4.3128e+001	1.8708e+003	9.2837e+002
4.2400e+001	1.8701e+003	9.2764e+002

...continúan las filas hasta 1.000



Tabla 9. Simulación para módulo de circuitos (recuperación) barraje sencillo

9	10	11
2.7642e+000	1.0667e+000	2.0772e+000
3.3103e+000	2.2985e+001	1.9380e+001
1.3515e+001	3.6253e+000	4.2532e+000
1.2006e+000	1.0911e+001	1.4484e+001
5.7410e+000	2.0896e+001	1.6681e+001
6.8045e-001	4.1512e-001	3.4151e+000
3.4228e+000	1.2132e+001	2.6154e+001
1.2833e+000	3.5530e+000	1.0706e+001
2.1974e+000	7.2632e+000	3.1330e+001
3.0399e+000	1.8210e+001	5.0815e+001
5.8820e-001	1.1486e+000	1.6145e+000
6.6293e+000	3.0089e+001	2.8681e+000
2.0823e-001	1.0713e+001	1.3169e+001
7.2799e+000	4.7151e+000	1.0656e+001
5.6905e+000	2.1409e+001	2.4042e+001
1.6459e+000	1.3235e+000	1.0057e+001
7.1642e+000	1.9321e+001	6.6238e+000
1.9147e+000	4.7400e+000	1.8252e+001
6.3632e+000	1.5031e+001	2.1768e+000
1.1474e+000	1.0199e+000	4.3662e+000

...continúan las filas hasta 1.000

...continúan las filas hasta 1.000

Para esta simulación se encontró que de 1000 simulaciones 0 veces la subestación falla por problemas en el flujo de potencia; 1 vez por problemas en los relés de protección; 8 veces por problemas en el interruptor de potencia, 935 veces por falla del aislamiento en el barraje; 17 veces por falla en el aislamiento en el transformador; 14 veces por falla interna en el transformador, 15 veces por falla en el interruptor del transformador, 3 veces por falla en los conductores del transformador, 0 veces por falla en el interruptor, 0 veces por falla en los conductores y 7 veces por falla en el barraje en el módulo de circuitos.

Tabla 11. Total tiempos barraje sencillo

TIEMPO FUNCIONAMIENTO	TIEMPO FALLA	TIEMPO SIMULACION
HORAS	HORAS	HORAS
6,0223 e + 003	2,6797e + 003	5,2758e + 007

La confiabilidad de la subestación está determinada por la siguiente expresión:

$$C_{sub} = \left[1 - \frac{\text{tiempo no disponibilidad}}{\text{tiempo total}} \right] \times 100\%$$

La confiabilidad de la subestación en configuración barra sencilla es:

Tabla 12 Confiabilidad subestación barraje sencillo

	1
1	9.9992e+001

Aproximadamente, para la simulación realizada.

3.4 MODELAMIENTO SUBESTACIÓN BARRA PRINCIPAL Y TRANSFERENCIA

Para una configuración de subestación tipo barra principal y transferencia, el FTA se presenta en la figura No. 3.4; el diagrama unifilar de la misma se presenta en la figura No. 3.3.

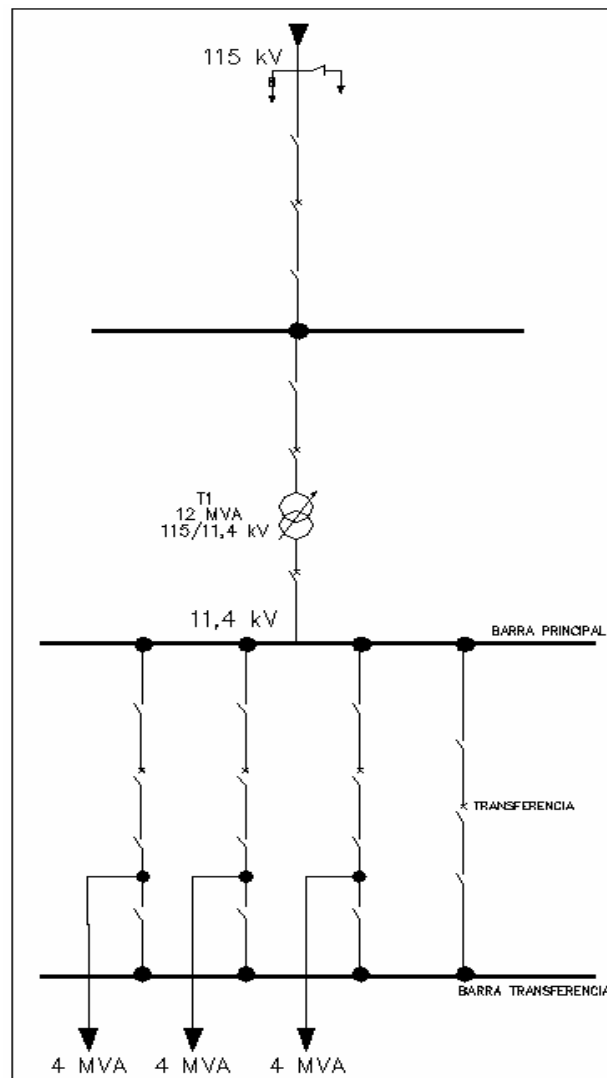


Figura No. 3.3 Diagrama unifilar subestación barra principal y transferencia

Para el análisis FTA de este tipo de configuración de subestación, al existir un barraje de respaldo, la condición de falla del módulo de barraje se afecta, debido a que tienen que fallar los dos barrajes para que se produzca la falla en el mismo. Esto se representa lógicamente por una compuerta AND, la cual se explica en la sección 2,1 del presente documento. Para el análisis FTA, estas fallas se presentan en la figura No. 3.4.

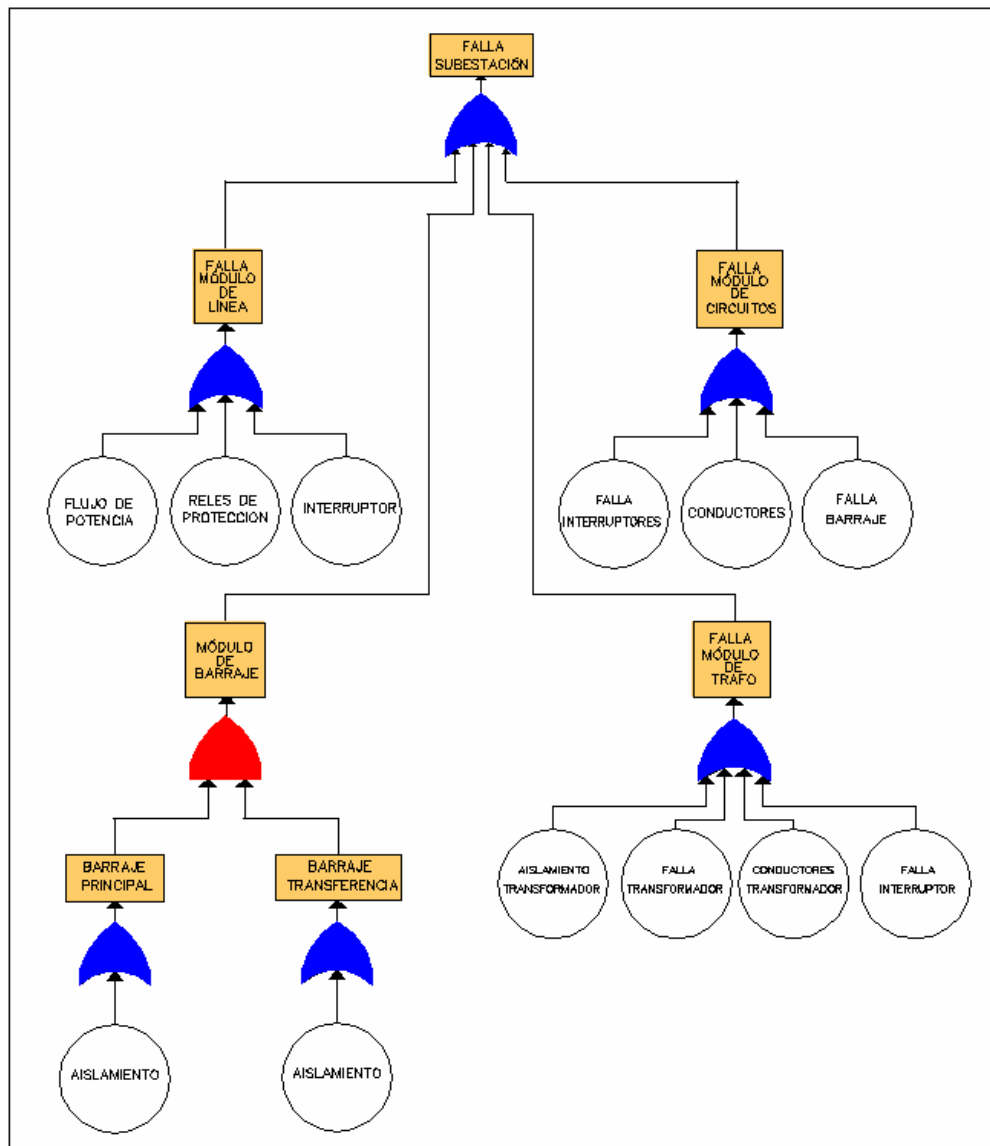


Figura No. 3.4 FTA subestación tipo barra principal y transferencia



3.4.1 Cálculo de la confiabilidad

De acuerdo al FTA presentado en la figura No. 3.4, la expresión lógica es la siguiente:

$$Y = Flínea + Fbarraje + Ftransformador + Fcircuitos$$

donde:

Y: Evento no deseado (falla Subestación)

Flínea: Falla en el módulo de línea
de barraje

Fbarraje: Falla en el módulo

Ftransformador: Falla en el módulo de transformador
módulo de circuitos

Fcircuitos: Falla en el

Considerando la falla en el módulo de barraje con la siguiente expresión:

$$Fbarraje = Fprincipal \times Ftransferencia$$

donde:

Fprincipal: Falla en el barraje principal

Ftransferencia: Falla en el barraje de transferencia

La expresión lógica toma la multiplicación de los barrajes debido a que se trabaja con el operador AND (mencionado en el capítulo 2, pág. 11; del presente documento) lo que significa que tienen que fallar los barrajes en forma simultánea para que se presente la falla en el módulo de barraje, lo que a su vez ocasiona la falla de la subestación.

El algoritmo para el cálculo de la confiabilidad es el siguiente:



1. Obtención de las tasas de falla λ y tiempo de duración de la misma para todos los componentes de la subestación.
2. Análisis de árbol de falla del sistema.
3. Simulación de Montecarlo. Generación de números aleatorios uniformes entre 0 y 1; ya que todos tienen la misma probabilidad de ocurrencia (Estos representan la probabilidad de falla que cada elemento va a tener).
4. Determinación del elemento causante de la falla, a partir de la comparación de tiempo de ocurrencia de la falla para todos los elementos.
5. Tiempo de duración de la falla, según el elemento causante de la misma.
6. Repetición de los pasos 5 y 6 para cada simulación.
7. Determinación de probabilidad de falla del sistema para cada uno de los elementos y la confiabilidad del sistema.

Para el desarrollo del cálculo de confiabilidad se utilizó programa Matlab 6.5 el cual entregó los siguientes resultados, para un total de 1000 simulaciones. Es importante resaltar que solo se muestran las primeras filas de las simulaciones.

** Es importante resaltar que el significado de cada una de las letras que se presentan a continuación en las tablas de simulación (falla), están explicadas en la pág. 24 del presente documento.



Tabla 13. Simulación para módulo de línea y barraje (fallas) barra principal y transferencia

D8	F8	H8
2	3	4
7.1445e+003	1.8903e+002	9.3193e-001
7.1436e+003	1.8810e+002	9.3193e-001
7.1426e+003	1.8717e+002	6.8769e+000
7.1392e+003	1.8370e+002	3.4094e+000
7.1357e+003	1.8029e+002	2.2743e+000
7.1335e+003	1.7801e+002	7.1367e-001
7.1328e+003	1.7730e+002	4.4449e+000
7.1283e+003	1.7286e+002	2.1862e+000
7.1261e+003	1.7067e+002	5.6624e+000
7.1205e+003	1.6501e+002	4.5145e+000
7.1160e+003	1.6049e+002	2.2935e+000
7.1137e+003	1.5820e+002	1.1962e-002
7.1136e+003	1.5819e+002	4.2757e+000
7.1094e+003	1.5391e+002	8.3552e-001
7.1085e+003	1.5308e+002	3.2207e+000
7.1053e+003	1.4986e+002	3.3905e-001
7.1050e+003	1.4952e+002	1.6993e-001
7.1048e+003	1.4935e+002	5.6183e-001
7.1042e+003	1.4878e+002	7.2863e-001
7.1035e+003	1.4806e+002	8.5350e-001

...continúan las filas hasta 1.000

Tabla 14. Simulación para módulo de línea y barraje (recuperación) barra principal y transferencia

2	3	4
4.2212e-001	6.6067e+001	8.7654e-001
1.7940e+000	1.6582e+002	2.8109e+000
9.9240e-001	5.0683e+001	5.5780e-001
6.2968e+000	1.0362e+002	4.2145e+000
7.8095e+000	3.3218e+001	1.7572e+000
2.0123e+000	4.4667e+001	3.3814e+000
7.6075e+000	1.7553e+001	3.8194e+000
7.4953e+000	1.4785e+002	1.0377e+001
5.5295e-001	1.6875e+002	3.3741e-001
1.9948e+000	7.9943e+001	4.9315e+000
1.5130e+000	1.0261e+001	5.8809e+000
2.4584e+000	7.7872e+001	1.3712e+000
1.1383e+001	4.7646e+001	4.0072e-001
7.2788e+000	4.7132e+001	2.6191e+000
1.4005e+000	8.3355e+001	4.4393e+000
3.0316e+000	7.5350e+001	4.2938e+000
1.5897e+000	3.4050e+001	7.5978e-001
2.7511e+000	1.9684e+001	1.5669e+000
6.0029e+000	4.8292e+001	8.0258e-001
8.5032e+000	2.5967e+001	2.8858e+000

...continúan las filas hasta 1.000

Tabla 15. Simulación para módulo de transformador (fallas) barra principal y transferencia

L8	N8	P8	R8
5	6	7	8
2.8239e+002	5.3314e+000	5.1616e+001	2.3665e+002
2.8146e+002	4.3994e+000	5.0684e+001	2.3572e+002
2.8053e+002	3.4675e+000	4.9752e+001	2.3479e+002
2.7706e+002	5.5793e+002	4.6285e+001	2.3132e+002
2.7365e+002	5.5452e+002	4.2876e+001	2.2791e+002
2.7138e+002	5.5225e+002	4.0601e+001	2.2564e+002
2.7066e+002	5.5154e+002	3.9888e+001	2.2492e+002
2.6622e+002	5.4709e+002	3.5443e+001	2.2048e+002
2.6403e+002	5.4491e+002	3.3256e+001	2.1829e+002
2.5837e+002	5.3924e+002	2.7594e+001	2.1263e+002
2.5386e+002	5.3473e+002	2.3080e+001	2.0811e+002
2.5156e+002	5.3244e+002	2.0786e+001	2.0582e+002
2.5155e+002	5.3242e+002	2.0774e+001	2.0581e+002
2.4727e+002	5.2815e+002	1.6498e+001	2.0153e+002
2.4644e+002	5.2731e+002	1.5663e+001	2.0070e+002
2.4322e+002	5.2409e+002	1.2442e+001	1.9748e+002
2.4288e+002	5.2375e+002	1.2103e+001	1.9714e+002
2.4271e+002	5.2358e+002	1.1933e+001	1.9697e+002
2.4215e+002	5.2302e+002	1.1371e+001	1.9641e+002
2.4142e+002	5.2229e+002	1.0643e+001	1.9568e+002

...continúan las filas hasta 1.000

Tabla 16. Simulación para módulo de transformador (recuperación) barra principal y transferencia

5	6	7	8
2.6647e-001	7.5560e+002	8.9926e-001	4.7766e+000
3.0528e+000	3.9344e+002	1.2779e-001	1.3216e+001
1.2890e+001	3.7009e+002	3.5000e-001	1.4485e+001
5.2056e-001	1.1991e+002	1.9181e-001	1.2863e+002
1.8656e+000	3.6192e+002	1.4544e-002	7.6183e+001
1.5059e+000	6.0011e+000	1.3730e-002	7.4197e+001
3.3257e+000	3.6771e+002	9.9218e-001	4.9531e-001
8.8620e-001	4.0527e+002	5.2547e-002	2.5845e+001
1.0131e-001	6.2504e+002	1.2313e+000	3.7916e+000
1.7348e+000	8.7485e+001	8.0203e-001	1.1052e+001
2.5888e+000	9.7500e+002	2.9094e-001	2.4951e+001
2.5846e-001	3.9751e+002	4.7443e-001	2.7284e+001
4.1428e+000	6.8392e+002	5.1509e-002	3.0839e+001
1.9532e-001	1.5362e+002	6.1753e-001	5.9639e+001
9.7593e-001	7.0782e+002	8.1114e-002	6.2212e+001
2.8010e-001	1.3560e+003	2.1425e+000	2.1524e+001
6.4405e+000	3.9217e+002	1.8606e-001	1.4571e+001
1.2155e+000	1.6140e+001	1.1131e-001	5.1022e+000
1.4528e-001	3.0202e+002	3.5873e-001	1.3753e+001
5.9998e+000	3.8971e+002	3.6628e-001	1.8983e+001

...continúan las filas hasta 1.000

Tabla 17. Simulación para módulo de circuitos (fallas) barra principal y transferencia

V8	X8	Z8
9	10	11
8.3373e+001	1.9111e+003	9.6861e+002
8.2441e+001	1.9101e+003	9.6768e+002
8.1509e+001	1.9092e+003	9.6675e+002
7.8042e+001	1.9057e+003	9.6328e+002
7.4632e+001	1.9023e+003	9.5987e+002
7.2358e+001	1.9001e+003	9.5760e+002
7.1644e+001	1.8993e+003	9.5688e+002
6.7200e+001	1.8949e+003	9.5244e+002
6.5013e+001	1.8927e+003	9.5025e+002
5.9351e+001	1.8870e+003	9.4459e+002
5.4836e+001	1.8825e+003	9.4007e+002
5.2543e+001	1.8802e+003	9.3778e+002
5.2531e+001	1.8802e+003	9.3777e+002
4.8255e+001	1.8759e+003	9.3349e+002
4.7420e+001	1.8751e+003	9.3266e+002
4.4199e+001	1.8719e+003	9.2944e+002
4.3860e+001	1.8716e+003	9.2910e+002
4.3690e+001	1.8714e+003	9.2893e+002
4.3128e+001	1.8708e+003	9.2837e+002
4.2400e+001	1.8701e+003	9.2764e+002

...continúan las filas hasta 1.000

Tabla 18. Simulación para módulo de circuitos (recuperación) barra principal y transferencia

9	10	11
2.5000e-001	1.0667e+000	2.0772e+000
2.5000e-001	2.2985e+001	1.9380e+001
2.5000e-001	3.6253e+000	4.2532e+000
2.5000e-001	1.0911e+001	1.4484e+001
2.5000e-001	2.0896e+001	1.6681e+001
2.5000e-001	4.1512e-001	3.4151e+000
2.5000e-001	1.2132e+001	2.6154e+001
2.5000e-001	3.5530e+000	1.0706e+001
2.5000e-001	7.2632e+000	3.1330e+001
2.5000e-001	1.8210e+001	5.0815e+001
2.5000e-001	1.1486e+000	1.6145e+000
2.5000e-001	3.0089e+001	2.8681e+000
2.5000e-001	1.0713e+001	1.3169e+001
2.5000e-001	4.7151e+000	1.0656e+001
2.5000e-001	2.1409e+001	2.4042e+001
2.5000e-001	1.3235e+000	1.0057e+001
2.5000e-001	1.9321e+001	6.6238e+000
2.5000e-001	4.7400e+000	1.8252e+001
2.5000e-001	1.5031e+001	2.1768e+000
2.5000e-001	1.0199e+000	4.3662e+000

...continúan las filas hasta 1.000

Se realiza un proceso similar al desarrollado en el cálculo de confiabilidad de la subestación barra sencilla, mencionado en el numeral 3.3.1 del presente documento. Los resultados encontrados son iguales, difiriendo en los tiempos de recuperación de interruptores, el cual se simuló de 15 minutos; es decir, 0,25 horas (Esta situación se puede evidenciar en las tablas No. 11 y 19 del presente documento). Lo anterior se



traduce en la disminución del tiempo de indisponibilidad de esta configuración de S/E.

Tabla 19. Total Tiempos Barra principal y transferencia

TIEMPO FUNCIONAMIENTO	TIEMPO FALLA	TIEMPO SIMULACION
HORAS	HORAS	HORAS
6,0192e + 003	2,6797e + 003	5,2771e + 007

La confiabilidad de la subestación está determinada por la siguiente expresión:

$$C_{sub} = \left[1 - \frac{\text{tiempo no disponibilidad}}{\text{tiempo total}} \right] \times 100\%$$

La subestación en configuración barra principal y transferencia tiene una confiabilidad del

Tabla 20 Confiabilidad subestación barra principal y transferencia

1
1 9.9995e+001

aproximadamente, para la simulación realizada.

3.5 MODELAMIENTO SUBESTACIÓN DOBLE BARRA

El diagrama unifilar de la misma se presenta en la figura No. 3.5. Se desarrollará un modelo similar al de los anteriores tipos de configuración de S/E.

Para el análisis FTA para este tipo de configuración de subestación, al existir un barraje de respaldo, la condición de falla del módulo de barraje se afecta, debido a que tienen que fallar los dos barrajes para que se produzca la falla en el mismo. Esto se representa lógicamente por una compuerta AND, la cual se explica en la sección 2,1 del presente documento. Para el análisis FTA, estas fallas se presentan en la figura No. 3.6.

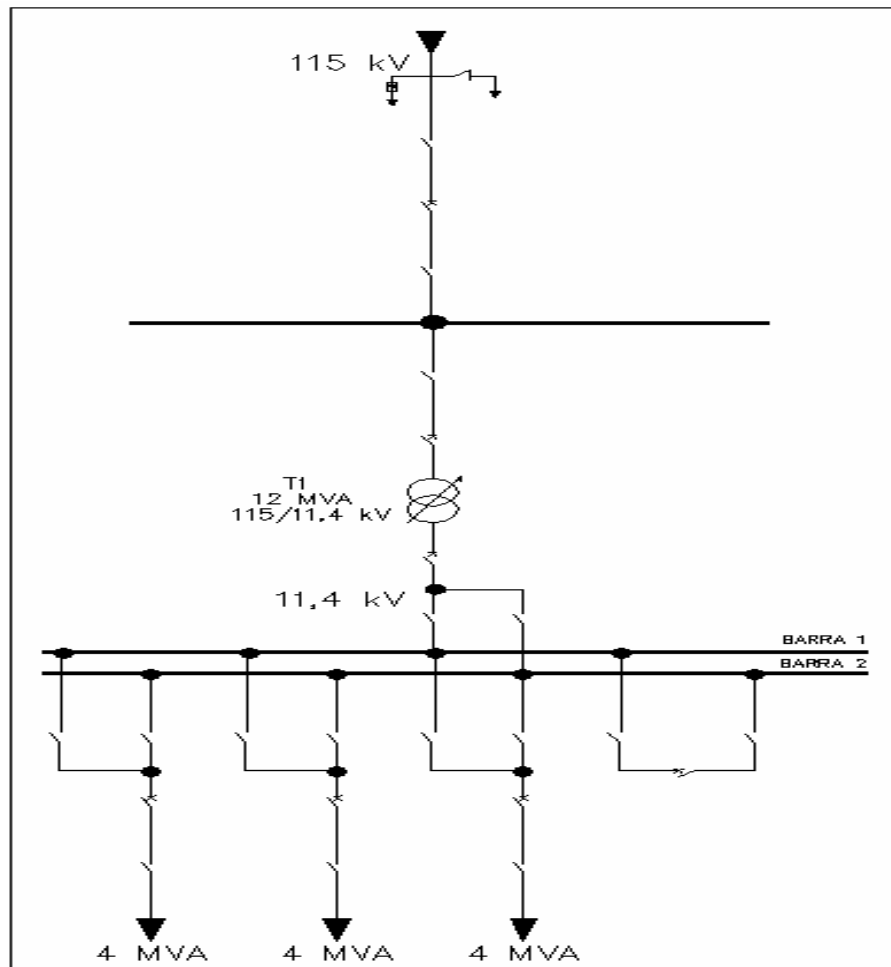


Figura No. 3.5 Diagrama unifilar subestación doble barra

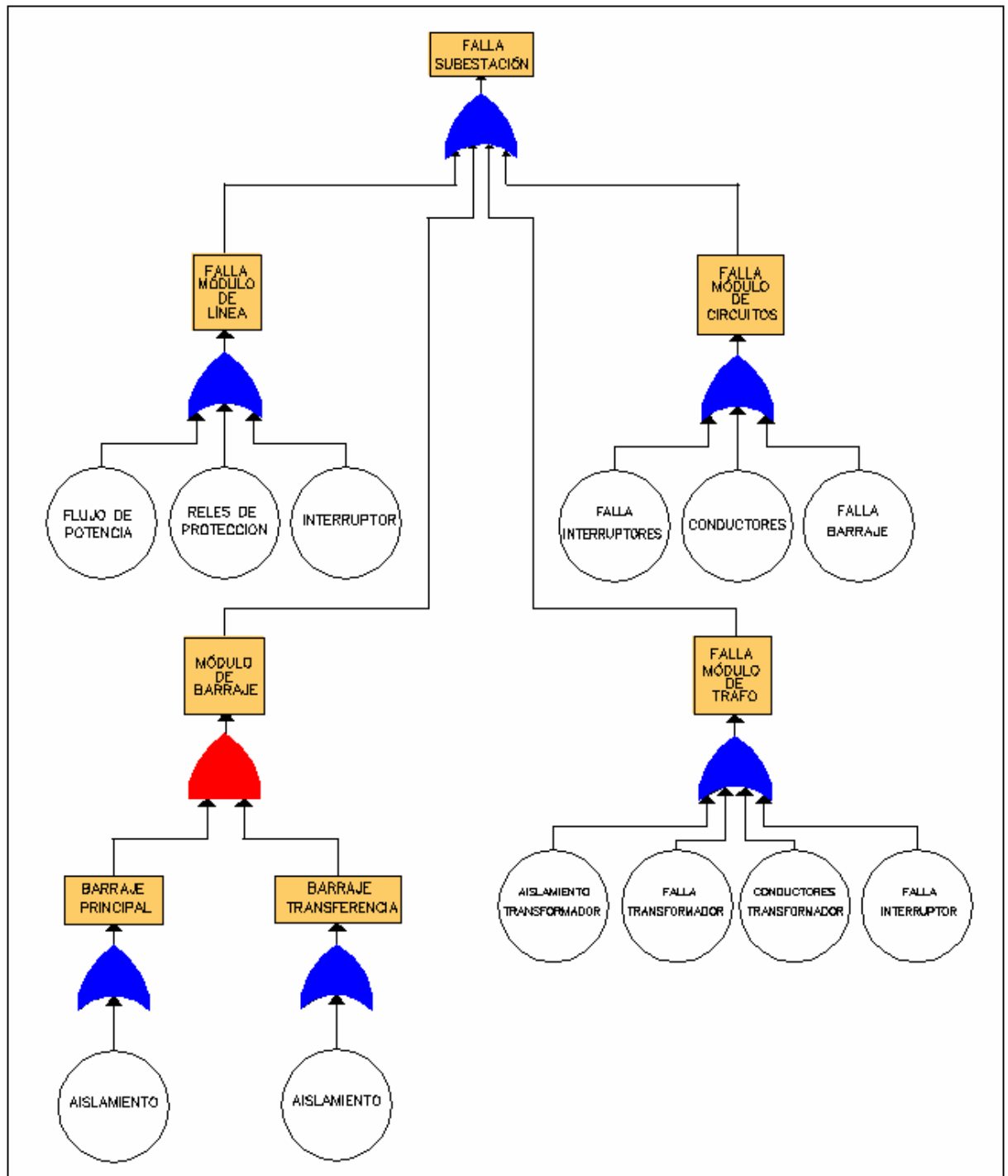


Figura No. 3.6 FTA subestación tipo doble barra



3.5.1 Cálculo de la confiabilidad

De acuerdo al FTA presentado en la figura No. 3.6, la expresión lógica es la siguiente:

$$Y = Flínea + Fbarraje + Ftransformador + Fcircuitos$$

donde:

Y: Evento no deseado (falla Subestación)

Flínea: Falla en el módulo de línea
de barraje

Fbarraje: Falla en el módulo

Ftransformador: Falla en el módulo de transformador
módulo de circuitos

Fcircuitos: Falla en el

Considerando la falla en el módulo de barraje con la siguiente expresión:

$$Fbarraje = Fprincipal \times Ftransferencia$$

donde:

Fprincipal: Falla en el barraje principal

Ftransferencia: Falla en el barraje de transferencia

La expresión lógica toma la multiplicación de los barrajes debido a que se trabaja con el operador AND (mencionado en el capítulo 2, pág. 11; del presente documento) lo que significa que tienen que fallar los barrajes en forma simultánea para que se presente la falla en el módulo de barraje, lo que a su vez ocasiona la falla de la subestación.

El algoritmo para el cálculo de la confiabilidad es el siguiente:



1. Obtención de las tasas de falla λ y tiempo de duración de la misma para todos los componentes de la subestación.
2. Análisis de árbol de falla del sistema.
3. Simulación de Montecarlo. Generación de números aleatorios uniformes entre 0 y 1; ya que todos tienen la misma probabilidad de ocurrencia. (Estos representan la probabilidad de falla que cada elemento va a tener).
4. Determinación del elemento causante de la falla, a partir de la comparación de tiempo de ocurrencia de la falla para todos los elementos.
5. Tiempo de duración de la falla, según el elemento causante de la misma.
6. Repetición de los pasos 5 y 6 para cada simulación.
7. Determinación de probabilidad de falla del sistema para cada uno de los elementos y la confiabilidad del sistema.

Para el desarrollo del cálculo de confiabilidad se utilizó programa Matlab 6.5 el entregó los siguientes resultados, para un total de 1000 simulaciones. Es importante resaltar que solo se muestran las primeras filas de las simulaciones.

** Es importante resaltar que el significado de cada una de las letras que se presentan a continuación en las tablas de simulación (falla), están explicadas en la pág. 24 del presente documento.

Tabla 21. Simulación para módulo de línea y barraje (fallas) doble barra

D8	F8	H8
2	3	4
7.1445e+003	1.8903e+002	9.3193e-001
7.1436e+003	1.8810e+002	9.3193e-001
7.1426e+003	1.8717e+002	6.8769e+000
7.1392e+003	1.8370e+002	3.4094e+000
7.1357e+003	1.8029e+002	2.2743e+000
7.1335e+003	1.7801e+002	7.1367e-001
7.1328e+003	1.7730e+002	4.4449e+000
7.1283e+003	1.7286e+002	2.1862e+000
7.1261e+003	1.7067e+002	5.6624e+000
7.1205e+003	1.6501e+002	4.5145e+000
7.1160e+003	1.6049e+002	2.2935e+000
7.1137e+003	1.5820e+002	1.1962e-002
7.1136e+003	1.5819e+002	4.2757e+000
7.1094e+003	1.5391e+002	8.3552e-001
7.1085e+003	1.5308e+002	3.2207e+000
7.1053e+003	1.4986e+002	3.3905e-001
7.1050e+003	1.4952e+002	1.6993e-001
7.1048e+003	1.4935e+002	5.6183e-001
7.1042e+003	1.4878e+002	7.2863e-001
7.1035e+003	1.4806e+002	8.5350e-001

...continúan las filas hasta 1.000



Tabla 22. Simulación para módulo de línea y barraje (recuperación) doble barra

2	3	4
4.2212e-001	6.6067e+001	2.5000e-001
1.7940e+000	1.6582e+002	2.5000e-001
9.9240e-001	5.0683e+001	2.5000e-001
6.2968e+000	1.0362e+002	2.5000e-001
7.8095e+000	3.3218e+001	2.5000e-001
2.0123e+000	4.4667e+001	2.5000e-001
7.6075e+000	1.7553e+001	2.5000e-001
7.4953e+000	1.4785e+002	2.5000e-001
5.5295e-001	1.6875e+002	2.5000e-001
1.9948e+000	7.9943e+001	2.5000e-001
1.5130e+000	1.0261e+001	2.5000e-001
2.4584e+000	7.7872e+001	2.5000e-001
1.1383e+001	4.7646e+001	2.5000e-001
7.2788e+000	4.7132e+001	2.5000e-001
1.4005e+000	8.3355e+001	2.5000e-001
3.0316e+000	7.5350e+001	2.5000e-001
1.5897e+000	3.4050e+001	2.5000e-001
2.7511e+000	1.9684e+001	2.5000e-001
6.0029e+000	4.8292e+001	2.5000e-001
8.5032e+000	2.5967e+001	2.5000e-001

...continúan las filas hasta 1.000

Tabla 23. Simulación para módulo de transformador (fallas) doble barra

L8	N8	P8	R8
5	6	7	8
2.8239e+002	5.3314e+000	5.1616e+001	2.3665e+002
2.8146e+002	4.3994e+000	5.0684e+001	2.3572e+002
2.8053e+002	3.4675e+000	4.9752e+001	2.3479e+002
2.7706e+002	5.5793e+002	4.6285e+001	2.3132e+002
2.7365e+002	5.5452e+002	4.2876e+001	2.2791e+002
2.7138e+002	5.5225e+002	4.0601e+001	2.2564e+002
2.7066e+002	5.5154e+002	3.9888e+001	2.2492e+002
2.6622e+002	5.4709e+002	3.5443e+001	2.2048e+002
2.6403e+002	5.4491e+002	3.3256e+001	2.1829e+002
2.5837e+002	5.3924e+002	2.7594e+001	2.1263e+002
2.5386e+002	5.3473e+002	2.3080e+001	2.0811e+002
2.5156e+002	5.3244e+002	2.0786e+001	2.0582e+002
2.5155e+002	5.3242e+002	2.0774e+001	2.0581e+002
2.4727e+002	5.2815e+002	1.6498e+001	2.0153e+002
2.4644e+002	5.2731e+002	1.5663e+001	2.0070e+002
2.4322e+002	5.2409e+002	1.2442e+001	1.9748e+002
2.4288e+002	5.2375e+002	1.2103e+001	1.9714e+002
2.4271e+002	5.2358e+002	1.1933e+001	1.9697e+002
2.4215e+002	5.2302e+002	1.1371e+001	1.9641e+002
2.4142e+002	5.2229e+002	1.0643e+001	1.9568e+002

...continúan las filas hasta 1.000

Tabla 24. Simulación para módulo de transformador (recuperación) doble barra

5	6	7	8
2.6647e-001	7.5560e+002	8.9926e-001	4.7766e+000
3.0528e+000	3.9344e+002	1.2779e-001	1.3216e+001
1.2890e+001	3.7009e+002	3.5000e-001	1.4485e+001
5.2056e-001	1.1991e+002	1.9181e-001	1.2863e+002
1.8656e+000	3.6192e+002	1.4544e-002	7.6183e+001
1.5059e+000	6.0011e+000	1.3730e-002	7.4197e+001
3.3257e+000	3.6771e+002	9.9218e-001	4.9531e-001
8.8620e-001	4.0527e+002	5.2547e-002	2.5845e+001
1.0131e-001	6.2504e+002	1.2313e+000	3.7916e+000
1.7348e+000	8.7485e+001	8.0203e-001	1.1052e+001
2.5888e+000	9.7500e+002	2.9094e-001	2.4951e+001
2.5846e-001	3.9751e+002	4.7443e-001	2.7284e+001
4.1428e+000	6.8392e+002	5.1509e-002	3.0839e+001
1.9532e-001	1.5362e+002	6.1753e-001	5.9639e+001
9.7593e-001	7.0782e+002	8.1114e-002	6.2212e+001
2.8010e-001	1.3560e+003	2.1425e+000	2.1524e+001
6.4405e+000	3.9217e+002	1.8606e-001	1.4571e+001
1.2155e+000	1.6140e+001	1.1131e-001	5.1022e+000
1.4528e-001	3.0202e+002	3.5873e-001	1.3753e+001
5.9998e+000	3.8971e+002	3.6628e-001	1.8983e+001

...continúan las filas hasta 1.000

Tabla 25. Simulación para módulo de circuitos (fallas) doble barra

V8	X8	Z8
9	10	11
8.3373e+001	1.9111e+003	9.6861e+002
8.2441e+001	1.9101e+003	9.6768e+002
8.1509e+001	1.9092e+003	9.6675e+002
7.8042e+001	1.9057e+003	9.6328e+002
7.4632e+001	1.9023e+003	9.5987e+002
7.2358e+001	1.9001e+003	9.5760e+002
7.1644e+001	1.8993e+003	9.5688e+002
6.7200e+001	1.8949e+003	9.5244e+002
6.5013e+001	1.8927e+003	9.5025e+002
5.9351e+001	1.8870e+003	9.4459e+002
5.4836e+001	1.8825e+003	9.4007e+002
5.2543e+001	1.8802e+003	9.3778e+002
5.2531e+001	1.8802e+003	9.3777e+002
4.8255e+001	1.8759e+003	9.3349e+002
4.7420e+001	1.8751e+003	9.3266e+002
4.4199e+001	1.8719e+003	9.2944e+002
4.3860e+001	1.8716e+003	9.2910e+002
4.3690e+001	1.8714e+003	9.2893e+002
4.3128e+001	1.8708e+003	9.2837e+002
4.2400e+001	1.8701e+003	9.2764e+002

...continúan las filas hasta 1.000



Tabla 26. Simulación para módulo de circuitos (recuperación) doble barra

9	10	11
2.7642e+000	1.0667e+000	2.0772e+000
3.3103e+000	2.2985e+001	1.9380e+001
1.3515e+001	3.6253e+000	4.2532e+000
1.2006e+000	1.0911e+001	1.4484e+001
5.7410e+000	2.0896e+001	1.6681e+001
6.8045e-001	4.1512e-001	3.4151e+000
3.4228e+000	1.2132e+001	2.6154e+001
1.2833e+000	3.5530e+000	1.0706e+001
2.1974e+000	7.2632e+000	3.1330e+001
3.0399e+000	1.8210e+001	5.0815e+001
5.8820e-001	1.1486e+000	1.6145e+000
6.6293e+000	3.0089e+001	2.8681e+000
2.0823e-001	1.0713e+001	1.3169e+001
7.2799e+000	4.7151e+000	1.0656e+001
5.6905e+000	2.1409e+001	2.4042e+001
1.6459e+000	1.3235e+000	1.0057e+001
7.1642e+000	1.9321e+001	6.6238e+000
1.9147e+000	4.7400e+000	1.8252e+001
6.3632e+000	1.5031e+001	2.1768e+000
1.1474e+000	1.0199e+000	4.3662e+000

...continúan las filas hasta 1.000

Se realiza un proceso similar al desarrollado en el cálculo de confiabilidad de la subestación barra sencilla, mencionado en el numeral 3.3.1 del presente documento. Los resultados encontrados son iguales, difiriendo en los tiempos de recuperación del barraje, el cual se simuló de 15 minutos, es decir, 0,25 horas. Lo anterior se traduce en la disminución del tiempo de indisponibilidad de esta configuración de S/E.

Tabla 27. Total Tiempos Barra Doble

TIEMPO FUNCIONAMIENTO	TIEMPO FALLA	TIEMPO SIMULACION
HORAS	HORAS	HORAS
6,0192e + 003	2,6797e + 003	5,2771e + 007

La confiabilidad de la subestación esta determinada por la siguiente expresión:

$$C_{sub} = \left[1 - \frac{\text{tiempo no disponibilidad}}{\text{tiempo total}} \right] \times 100\%$$

La subestación en configuración doble barra tiene una confiabilidad del:

Tabla 28. Confiabilidad subestación doble barra

	1
1	9.9997e+002

aproximadamente, para la simulación realizada.



4. ENERGIA NO SUMINISTRADA

La energía no suministrada (ENS) (**Expected Energy not Served**) se establece como el promedio de largo plazo de la energía no suministrada debido a las deficiencias del sistema de potencia¹⁴

$$ENS = \sum_{R-X>0} (X - R)p(R)t \quad \text{MWh}$$

Para un sistema modelado en horas, cuando $p(R) = 1/8760$, entonces $t = 8760$ horas

Para el cálculo de ENS, basados en las simulaciones realizadas para cada tipo de configuración se presenta a continuación. Tomando un factor de potencia de 0,95 y un factor de carga de 0,6 y un valor de \$200 kWh promedio¹⁵.

$$ENS = 12MVA \times f.p. \times f.c. \times 8.760 \times pfalla$$

donde:

$f.p.$: factor de potencia

$f.c.$: factor de carga

$pfalla$: porcentaje de falla

Tabla 29. Cálculo Energía No Suministrada

CONFIGURACIÓN	PORCENTAJE FUNCIONAMIENTO	PORCENTAJE FALLA	ENS MWh-AÑO	COSTO \$
BARRA SENCILLA	99,9244337511	0,0255662489	15,3189	3.063.777,46
BARRA PPAL Y TRANSFERENCIA	99,9544375938	0,0255624062	15,3166	3.063.316,95
DOBLE BARRA	99,9741725981	0,0158274019	9,4835	1.896.705,20

¹⁴ Torres, A. curso de confiabilidad. Universidad de los Andes. Bogotá. 2005.

¹⁵ www.creg.gov.co



Esta tabla muestra que al hacer el cálculo de Energía No suministrada el barraje de mayor confiabilidad es el de barra doble y éste es el que precisa menor costo debido a que el porcentaje de fallas de esta configuración es menor.

5. CONCLUSIONES

- Por medio del presente trabajo de grado, se logró analizar la confiabilidad de subestaciones de alta tensión mediante el método de árbol de fallas; de manera que se puede identificar la total confiabilidad del sistema conociendo los valores de cada componente en particular.
- Se resalta la importancia de minimizar la tasa de fallas λ para cada uno de los elementos que conforman una subestación de alta tensión o cualquier otro sistema, ya que se aprecia con los resultados obtenidos el elevado costo de la no disponibilidad de la energía.
- Aunque el desarrollo tecnológico ofrece nuevas perspectivas para la fabricación de equipos eléctricos, es necesario investigar sobre la confiabilidad y respuesta de estos nuevos equipos para evitar caer en errores operativos que afecten el funcionamiento normal de la subestación, que es lo que siempre se busca.
- Las simulaciones de Montecarlo (SMC) son una gran herramienta ya que permiten conocer de forma bastante aproximada la respuesta de un sistema, de modo que se infiera el comportamiento del mismo para establecer si responde a las expectativas inicialmente planteadas.
- El método de árbol de fallas ofrece analizar el comportamiento de un sistema, así como también sus principales falencias, permitiendo realizar un énfasis en las mismas de manera que estas se puedan minimizar.



6. BIBLIOGRAFIA

Allan, R et al. Reliability evaluation of power systems. Second edition. Plenum Press. New York. 1997.

Bono R. et al. Analyzing reliability – A simple yet rigorous approach. Vol 40. No. 4, July-August.2004.

Burke J. Power Distribution engineering. Marcel Dekker. (sine loco) 1994.

Dolezilek, D. Case study of a large transmission and distribution substation automation project. SEL Inc. 1999

Guzmán, S. Energy Computer Graphics. Ingeniero Electricista. Entrevista Personal. Junio 2007. Bogotá

Hernández, E. Comparación de métodos de análisis de confiabilidad aplicados a sistemas eléctricos industriales.1999. Bogotá. Disponible en: www.reliabilityweb.com/excerpts/excerpts_espanol/sistemas_electricos.pdf -

IEEE. Recommended practice for the design of reliable industrial and commercial systems. Standard 493-1997.

Jaimes, A. Seguridad en los sistemas de potencia industriales. Proyecto de grado Ingeniero Eléctrico. Universidad de los andes. Bogotá. 2004.

López, M. y Rico, J. Seguridad en sistemas de potencia industrial. Proyecto de grado. Universidad de Los Andes. Bogotá. 2003.

Mohr, R. Failure Modes and effects analysis. Jacobs Sverdrup. Octava edición. Febrero 2002.

Ramírez, C. Subestaciones de alta y extra alta tensión. Segunda edición. HVM Ing. Bogotá. 2005.

Torres, M. Probabilidad, procesos estocásticos y confiabilidad en ingeniería eléctrica. Especialización en sistemas de transmisión y distribución de energía. Universidad de Los Andes. Bogotá. 2002.



Wang, X. Modern power system planning. Second edition. Mc. Graw Hill Book Company- Koga. 1994.

www.creg.gov.co

Zapata C, et al. El método de simulación de montecarlo en estudios de confiabilidad de sistemas de distribución de energía eléctrica. scientia et technica año x, no 24, mayo 2004. utp. issn 0122-1701



7. ANEXOS

	Funcionamiento	Falla	Energia no Suministrada	Costo	
Barraje Sencillo	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	Factor de Carga <input type="text"/>
Barraje Principal y transferencia	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	Factor de Potencia <input type="text"/>
Barraje Doble	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	Costo en kWh <input type="text"/>





