

Artículo Científico

Ingeniería

Análisis de confiabilidad en alimentadores de distribución utilizando métodos simulativos

Analysis of reliability in distribution feeders using simulative methods

Byron Chere-Quiñónez ^I
cherokyfernando@hotmail.com

Alejandro Martínez-Peralta ^{II}
pipoperalta1990@hotmail.com

Raúl Ulloa de Souza ^{III}
raululloa88@gmail.com

Fredis R. Branda-Hurtado ^{IV}
freddyramiro1967@hotmail.com

Recibido: 2 de febrero de 2017 * **Corregido:** 28 de abril de 2017 * **Aceptado:** 7 de julio de 2017

- I. Universidad Técnica de Esmeraldas “Luis Vargas Torres”
- II. Universidad Técnica de Esmeraldas “Luis Vargas Torres”
- III. Universidad Técnica de Esmeraldas “Luis Vargas Torres”
- IV. Universidad Técnica de Esmeraldas “Luis Vargas Torres”

RESUMEN

En el presente proyecto se muestra el desarrollo de programación en Matlab con la finalidad de realizar un análisis a partir de la simulación de trenes de operación aleatorios para fallas en los componentes de un sistema de distribución en Media Tensión, específicamente en dos alimentadores primarios que parten de una misma subestación y se prestan respaldo entre sí mediante dos líneas de enlace conectadas a través de dos circuitos ubicados en posición estratégica, los mismos que cuentan con un interruptor y seccionador para facilitar la transferencia de carga.

El análisis de confiabilidad realizado mediante el código de programación realizado en el software Matlab está programado en forma general, es decir que ingresando los respectivos datos se puede adaptar a cualquier red; especialmente a dos alimentadores los cuales mantienen una línea de enlace para apoyo entre ambos, mejorando así su confiabilidad y reduciendo los tiempos de interrupción de servicio.

El código planteado en el presente proyecto técnico se aplica a los alimentadores Centro Olmedo y Centro Sucre, pertenecientes a la Corporación Nacional de Electricidad CNEL Unidad de Negocio Esmeraldas, donde se obtuvo como resultados índices de confiabilidad lo más cercano a lo establecido por las sugerencias detalladas en las normativas internacionales, de lo que resalta los valores obtenidos tanto en el índice medio de disponibilidad del servicio y la energía media no suministrada, de los cuales se obtuvo como resultado 0.99977 y 0.001 kWh/año respectivamente.

Palabras claves:

LOLP: probabilidad de déficit.

LOLE: valor esperado de duración anual de déficit.

EENS: valor esperado anual de energía no suministrada.

EIR: fracción esperada de la energía suministrada referida a la energía de la demanda.

ABSTRACT

The present project shows the development of programming in Matlab with the purpose of performing an analysis from the simulation of random operating trains for faults in the components of a distribution system in Medium Voltage, specifically in two starting primary feeders Of the same substation and provide support to each other via two connecting lines connected through two circuits

Análisis de confiabilidad en alimentadores de distribución utilizando métodos simulativos

located in strategic position, which have a switch and disconnecter to facilitate the transfer of charge.

The reliability analysis performed using the programming code made in the Matlab software is programmed in general, is that entering the respective data can be adapted to any network; Especially to two feeders which maintain a connection line for support between both, improving its reliability and reducing service interruption times.

The code presented in this technical project applies to the feeders Centro Olmedo and Centro Sucre, belonging to the National Electricity Corporation CNEL Esmeraldas Business Unit, where reliability indexes were obtained as close as possible to the detailed suggestions In international regulations, which highlights the values obtained in both the average service availability index and the average energy not supplied, from which 0.99977 and 0.001 kWh / year respectively were obtained.

Index terms: At least four key words (index terms) related to the Technical Paper must be provided for indexing purposes.

INTRODUCCIÓN.

Las técnicas de simulación de componentes futuros de un sistema de distribución son especialmente útiles para la resolución de medios complejos, para lo que se utilizan distribuciones de probabilidad dadas a partir de la tasa y tiempos de falla definidos determinísticamente para cada uno de los componentes. Estas simulaciones permiten obtener muestras experimentales del estado del sistema mediante el uso de modelos matemáticos que determinan las condiciones operativas.

Los procedimientos simulativos presentan grandes ventajas respecto a los procesos analíticos ya que permiten economizar recursos y tiempo de ejecución, así mismo otorgan flexibilidad en los experimentos y oportunidad de análisis bajo múltiples escenarios.

En el presente proyecto técnico se utiliza un modelo para n nodos de cualquier sistema de distribución de energía eléctrica que conste de dos alimentadores con transferencia entre sí. Se analiza el caso del alimentador Centro Olmedo y el Alimentador Centro Sucre, ambos parte de la subestación Santas Vainas de capacidad instalada igual a 12.5 MVA, de la Corporación Nacional de Electricidad Unidad de Negocio Esmeraldas, de los cuales se analiza una posible transferencia a través de dos líneas de enlace.

Se producen trenes de operación de ambos alimentadores con el fin de obtener los índices de confiabilidad más probables para el sistema que envuelven ambos. Estas funciones de probabilidad se obtienen a partir de la tasa de fallas el tiempo de simulación obtenido determinísticamente. El método planteado resulta sumamente conveniente ya que analiza la mejora de estos indicadores a partir de la utilización de las líneas de enlace, lo que permite obtener un Índice medio de Disponibilidad de Servicio de alrededor de 0.99988, acercándose a un valor óptimo.

Materiales y Métodos

Evaluación del Modelo de Confiabilidad

El análisis de confiabilidad de un sistema de distribución eléctrica se realiza mediante el uso de cualquiera de los métodos de análisis basados en el enfoque de enumeración contingencia o la simulación de Monte Carlo. El enfoque analítico basado en la numeración de contingencia puede identificar problemas de baja tensión y colapso de tensión, además de las sobrecargas térmicas [4].

El método de enumeración, sin embargo, no se puede modelar una amplia gama de condiciones de funcionamiento y por lo tanto está sujeta a diferentes supuestos simplificadores. La Simulación de Monte Carlo, por el contrario, es capaz de modelar toda la gama de condiciones de funcionamiento. Una desventaja de este modelo es que las limitaciones de recursos del ordenador limitan la precisión de solución a los problemas de flujo de potencia DC. En este caso, los índices de rendimiento simulados sólo reflejan problemas de sobrecarga del sistema. La importante, pero extremadamente baja probabilidad de interrupción de transmisión, así como problemas de baja tensión y colapso de tensión no pueden ser modelados en este método.

El modelo de flujo de potencia linealizado

Una aproximación muy usada del modelo de flujo de potencia no lineal es el conocido como flujo de potencia linealizado o flujo DC. Este modelo convierte las ecuaciones generales de flujo en ecuaciones lineales simples.

Análisis de confiabilidad en alimentadores de distribución utilizando métodos simulativos

Por lo general se acepta que la modelación del flujo DC se acerca mucho al comportamiento real del sistema bajo condiciones de estabilidad de tensión y control de reactivos. De allí, que su uso es muy frecuente en los modelos de planificación de la operación. Por otro lado una característica importante del modelo linealizado es el hecho de entregar una solución aún a los problemas que no podrían ser resueltos por los métodos convencionales del flujo de potencia no lineal [5].

En los estudios de planificación de la operación, además se requiere rapidez y convergencia para analizar diversos escenarios. El flujo DC es por excelencia un método muy rápido de converger.

Las aproximaciones adoptadas en el flujo linealizado son las siguientes:

$$V_i = V_k = 1$$

Las diferencias angulares θ_{ik} en las líneas son relativamente pequeñas; así se obtienen:

$$\cos \theta_{ik} \approx 1$$

$$\text{sen } \theta_{ik} \approx \theta_{ik}$$

Las resistencias en las líneas son muy pequeñas comparadas con las reactancias, $X_{ik} \gg R_{ik}$ y consecuentemente:

$$G_{ik} = \frac{R_{ik}}{R_{ik}^2 + X_{ik}^2} \approx 0$$

$$B_{ik} = \frac{-X_{ik}}{R_{ik}^2 + X_{ik}^2} \approx \frac{-1}{X_{ik}}$$

Las susceptancias Shunt pueden ser despreciadas:

$$B_{ik}' \approx 0$$

La aplicación de estas hipótesis a la expresión del flujo de potencia activa no lineal resulta en:

$$P_{ik} = B_{ik} * \theta_{ik}$$

La inyección de potencia activa en la barra es igual a la suma algebraica de los flujos que salen de la barra:

$$P_i = \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^N P_{ik} = \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^N B_{ik} * \theta_{ik}$$

El flujo de potencia lineal, o modelo DC, entonces se puede escribir en forma matricial como:

$$P = B' * \odot$$

Dónde:

P : es el vector de inyecciones netas de potencia activa nodales.

\odot : es el vector de ángulos nodales.

B' : es una matriz que depende de las características físicas de las líneas de transmisión y sus elementos son:

$$B_{ik}' = \frac{-1}{X_{ik}}$$

$$B_{ii}' = \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^N \frac{1}{X_{ik}}$$

La aplicación de las hipótesis simplificadoras en la ecuación de pérdidas de potencia activa lleva a despreciarlas. Como no hay pérdidas en el sistema, la suma de inyecciones netas de potencia es nula, lo que implica la singularidad de la matriz B' . Este problema se evita adoptando una barra de referencia s , que pasa a ser la referencia angular del sistema. La inyección de potencia en la barra de referencia está dada por el balance total de potencia del sistema:

$$P_s = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq s}}^N -P_i$$

Las variables P_s y θ_s son retiradas del conjunto de ecuaciones del modelo DC, que se transforma en un nuevo sistema:

$$P' = B'' * \odot'$$

Donde:

P' : Vector con dimensión $N-1$ de las inyecciones netas de potencia activa en todas las barras del sistema, excepto en la barra de referencia s .

\odot' : Vector con dimensión $N-1$ de los ángulos de tensión en todas las barras del sistema, excepto en la barra de referencia s .

B'' : Matriz resultante de la exclusión de la fila y columna s de la matriz B' .

Simulación de Monte Carlo

Análisis de confiabilidad en alimentadores de distribución utilizando métodos simulativos

La Simulación de Monte Carlo se aplica para los problemas que afectan a las variables aleatorias con distribuciones de probabilidad conocidos o supuestos. Este proceso de simulación utiliza un conjunto particular de valores de variables aleatorias generadas de acuerdo con las distribuciones de probabilidad correspondientes en cada simulación.

El proceso se repitió utilizando diferentes conjuntos de valores de variables aleatorias. Los resultados de la Simulación de Monte Carlo se presentan en la forma de histograma que es especialmente útil para una evaluación adicional estadística. El proceso de Monte Carlo es en realidad determinista para cada conjunto dado números al azar, generados por adelantado de distribuciones de probabilidad prescritos.

Como tal, la simulación se puede realizar ya sea analítica o numéricamente. Con el advenimiento de los ordenadores, la simulación se realiza numéricamente, y se ha convertido en una herramienta mucho más práctica, aplicada ampliamente para estudiar el rendimiento del sistema para fines de ingeniería. El proceso de simulación permite estimar un rendimiento específico con un conjunto dado de los parámetros del sistema.

La sensibilidad del rendimiento del sistema a la variación en los parámetros del sistema puede ser examinado a través de simulaciones repetidas. Simulación también se utiliza para comprobar diseños alternativos para así poder determinar el óptimo. [6]

Cuando se aplica a la fiabilidad del sistema de distribución, la Simulación de Monte Carlo normalmente analiza el comportamiento del sistema durante un periodo de tiempo específico, por ejemplo un año. Debido a que cada simulación producirá resultados diferentes, suele ser necesario la realización de muchas simulaciones; teóricamente el valor esperado de la simulación es igual a la

Análisis de confiabilidad en alimentadores de distribución utilizando métodos simulativos

media de los resultados, considerando que el número de simulaciones N se acerca al infinito, se puede decir que:

$$\bar{x} = \lim_{N \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \right)$$

Donde:

\bar{x} : es el valor esperado.

x_i : es el resultado de la simulación i .

N : es el número de simulaciones.

Una Simulación de Mote Carlo tiene varias ventajas cuando se compara con una simulación analítica; una es la capacidad para producir una distribución de posibles resultados más que el valor esperado solo; otra es la facilidad de obtener parámetros de componentes modelo como variable aleatoria caracterizada por funciones de distribución de probabilidad en lugar de valores como constantes. Una Simulación de Monte Carlo también puede modelar con mayor facilidad el comportamiento de del sistema complejo como eventos no exclusivos, fallos en cascada, probabilidades condicionales, y así sucesivamente.

La desventaja más importante de la Simulación de Monte Carlo frente a una simulación analítica es la necesidad de intensidad y fortaleza computacional; esto se debe a que en las simulaciones analíticas solo se necesita simular un año esperado mientras que la Simulación de Monte Carlo normalmente necesita simular varios cientos de años aleatorios. [7]

Procedimientos Simulatorios

Análisis de confiabilidad en alimentadores de distribución utilizando métodos simulativos

El comportamiento aleatorio de un sistema puede ser simulado por:

- Observación prolongada.
- Simulación numérica.

Ventajas de la simulación:

- Economía de tiempo y recursos.
- Gran flexibilidad de los experimentos.
- Análisis bajo múltiples escenarios posibles.

Desventajas de la simulación:

- Requiere de recursos de cómputo y programación intensivos.
- Modelación matemática compleja.
- Los modelos necesitan ser validados.

Los procedimientos analíticos pueden ser empleados siempre que sea posible una adecuada representación del sistema físico, es decir, una posible convergencia hacia una solución. Las técnicas de la simulación son especialmente útiles en sistemas complejos.

Para la simulación del comportamiento de los elementos se utiliza las distribuciones de probabilidad. Las simulaciones permiten obtener muestras experimentales del estado del sistema mediante el uso de modelos matemáticos que determinan las condiciones operativas; por ejemplo si

Análisis de confiabilidad en alimentadores de distribución utilizando métodos simulativos

se considera dos elementos independientes en paralelo, el sistema falla cuando los dos componentes fallan; la simulación permite crear un historial de operación y falla del sistema.

Las mediciones de confiabilidad son obtenidas mediante métodos estadísticos el comportamiento de los componentes es representado por distribución de probabilidad. El módulo matemático en este caso simple considera que si al menos un componente se encuentra operativo, el sistema opera.

Si a $t = 0$, el componente 1 se supone que está operando, usando un número aleatorio y la distribución de probabilidad del tiempo de operación de 1, se obtiene el tiempo al cual el componente 1 fallará. De forma similar se obtiene la duración del tiempo de reparación de 1.

Tren de operación de cada componente

Los trenes son ubicados en la misma referencia de tiempo, obteniéndose los tiempos de falla del sistema o tren de operación del sistema. Las medidas de confiabilidad son obtenidas desde el tren de operación del sistema utilizando métodos estadísticos. En las figuras 2.1 y 2.2, se muestra el comportamiento del tren de operación.



FIGURA 1 TREN DE OPERACIÓN

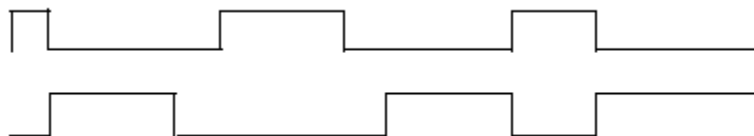


FIGURA 2. COMPORTAMIENTO DEL TREN DE OPERACIÓN

Generación de número aleatorios

La generación de números aleatorios es la base para todas las Simulaciones de Monte Carlo. Si el generador de números aleatorios no es verdaderamente aleatorio, los resultados de la Simulación de Monte Carlo no son válidos; para que un generador de números aleatorios sea válido debe producir la distribución ofrecida de números aleatorios; también debe evitar las tendencias al tiempo que genera esta distribución. [7]

Si se considera la posibilidad de un generador de números aleatorios que simula un lanzamiento de moneda; después de un gran número de simulaciones, un generador de números aleatorios válido producirá un número igual de “caras” y “sellos”; mientras hace esto, se evitará tendencias tales como la producción de 1000 “caras” en secuencia, 1000 “sellos” en secuencia, y así sucesivamente. En la figura 2.3 se muestra la función de distribución de un generador de números aleatorios.

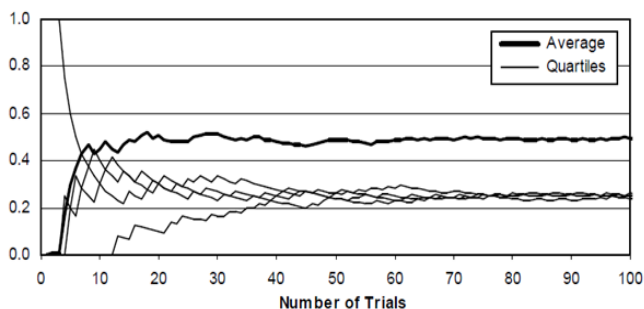


FIGURA 2 FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN DE UN GENERADOR DE NÚMEROS ALEATORIOS

El generador de números aleatorios más comúnmente utilizado es el generador de congruencia, que produce un número aleatorio uniformemente distribuido con un valor entre cero y uno. El generador de congruencia es el algoritmo predeterminado que se utiliza en la mayoría de los lenguajes de programación y algoritmos de cálculo. Se caracteriza por tener tres parámetros y calcular cada nuevo número basado en el número generado previamente. [6]

Un número inicial, se hace referencia como una semilla, se debe especificar o asignado de forma automático (una técnica común es asignar la semilla basado en la hora actual). Fórmulas asociadas con el generador de congruencia son:

$$x_{i+1} = [A * x_i + C] \text{mod } B$$

$$r_i = \frac{x_i}{B}$$

Donde:

A: multiplicador no negativo.

B: módulo no negativo.

C: incremento no negativo.

Xo: semilla no negativa.

La notación del módulo, $A \text{ mod } B$, se refiere a la división del resto del cociente de A y B , que también se puede representar como $A - B * \text{int}(A/B)$.

Los números aleatorios generados por las ecuaciones anteriores, de hecho se pueden demostrar que al repetir con un patrón no es mayor en longitud que en módulo. Si el módulo es menos que la cantidad de números requeridos, se garantiza la repetición del patrón. Los implementadores y usuarios de simulaciones de Monte Carlo deben tener cuidado de que esta repetición no ponga en peligro la integridad de los resultados.

Temporización

Existen dos métodos de representación de tiempo en programas computacionales de simulación:

- Método de intervalos fijos.
- Método de próximo evento.

En el método de intervalos fijos se escoge Δt dependiendo de las condiciones operativas del sistema. Partiendo un estado inicial del sistema, el programa determina si existe algún cambio en la condición operativa al tiempo Δt . La condición se actualiza o se mantiene al estado original dependiendo de las condiciones de los componentes al instante Δt .

En el método del próximo evento, el intervalo Δt es modificado según el programa encuentra un evento en los registros de los componentes. El programa avanza en el tiempo al instante inmediato posterior al evento y determina el estado del sistema. Este método evita posibles errores de deformación de Δt . [4]

En la figura 4 se muestra un ejemplo de los métodos de representación.

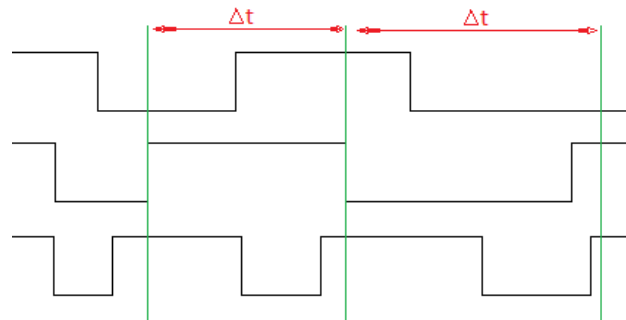


FIGURA 3 MÉTODOS DE REPRESENTACIÓN

Indicadores de confiabilidad

Los indicadores de confiabilidad más frecuentemente utilizados se obtienen mediante la comparación en términos probabilísticos de la demanda con la capacidad disponible. La obtención de estos indicadores se realiza en estado estacionario sin considerar los fenómenos transitorios que tienen lugar desde el momento en que se produce una contingencia hasta que alcanza un nuevo estado estacionario.

La probabilidad de ciertos estados de un sistema es una medida del comportamiento medio del mismo durante el periodo analizado, sin tener en cuenta si una determinada situación de falla se debe a una única salida de servicio prolongada o a varios eventos de menor duración.

Para tener en cuenta este último aspecto se introducen generalmente el valor esperado de la duración de determinados estados del sistema en el periodo considerado y la frecuencia con la que el sistema se encontrará en estos estados. [5]

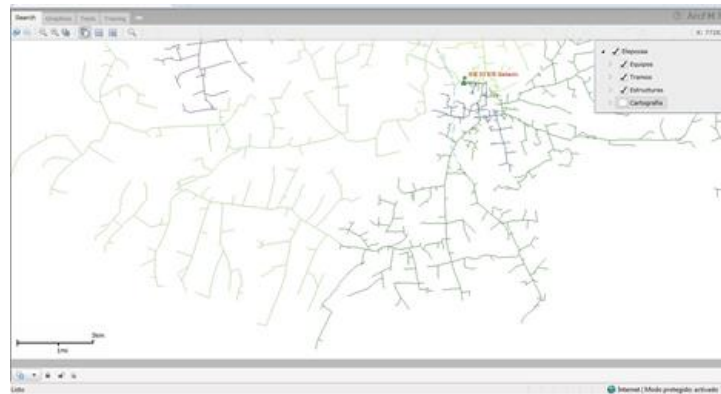
Análisis de confiabilidad en alimentadores de distribución utilizando métodos simulativos

Para cuantificar la magnitud de la deficiencia se suele determinar la potencia faltante para cubrir completamente la demanda, denominándola potencia de déficit. Combinando las potencias de déficit con las duraciones medias esperadas se pueden obtener los valores esperados de energía no suministrada en el periodo considerado. A continuación se presenta una lista de los índices de confiabilidad que pueden ser encontrados más frecuentemente en la literatura y que se refieren a la evaluación conjunta de confiabilidad de sistemas de generación y transporte.

- LOLP [pu]
- LOLE [h/año]
- EENS [MW/año]
- EIR [pu]
- FOI [1/año]
- EDOI [h]
- EENSI [MWh]
- ELCI [MW]

Alimentador centro olmedo y centro sucre

En la figura 5 se muestra el recorrido del alimentador en cuestión a partir de la base de datos y catastro obtenido del software computacional ArcGis.



***FIGURA 4 RECORRIDO ALIMENTADOR CENTRO OLMEDO Y CENTRO SUCRE, CNEL
ESMERALDAS***

Análisis del efecto de fallas

Los procedimientos analizados permiten calcular los parámetros de probabilidad, frecuencia y duración de los distintos estados de un sistema. Una parte esencial de todo estudio de confiabilidad es la clasificación, de acuerdo a criterios prefijados de los estados del sistema en estados de operación y estados de falla.

El análisis de los estados para determinar los que corresponden a la falla del sistema es la tarea denominada análisis del efecto de fallas. En la mayoría de los estudios se supone que los estados se pueden agrupar en estados de operación y estados de falla. En algunos casos, sin embargo, es necesario considerar estados de falla parcial. [5]

El análisis del efecto de fallas usa en general técnicas analíticas que permiten estudiar el funcionamiento del sistema. Luego de lo expuesto se puede resumir los parámetros de un estudio de confiabilidad utilizando los procedimientos del espacio de estados:

Análisis de confiabilidad en alimentadores de distribución utilizando métodos simulativos

- Se definen criterios de falla del sistema.
- Basándose en esos criterios se realiza el análisis del efecto de fallas de manera de poder clasificar los estados del sistema en los grupos: O (operación) y F (falla), tal como se muestra en la figura 2.6.

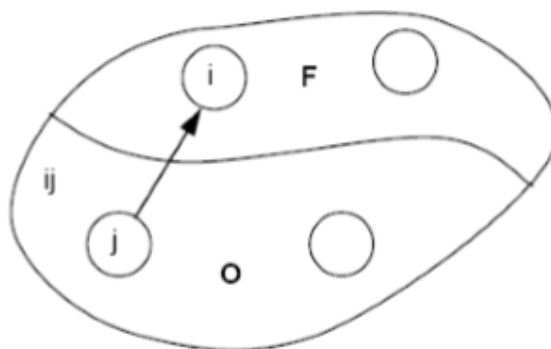


FIGURA 5 CLASIFICACIÓN DE LOS ESTADOS EN LOS GRUPOS O Y F

Se resuelve el modelo del espacio de estados determinando las probabilidades Pr_i , $i \in F$, y se obtiene la probabilidad de falla del sistema.

$$Pr(\bar{s}) = \sum_{i \in F} Pr_i$$

Se calcula la frecuencia de falla del sistema.

$$f_s = \sum_{i \in F} Pr_i * \sum_{j \in O} \lambda_{ji}$$

A partir de la probabilidad y la frecuencia se calcula la duración media del estado de falla.

$$T_s = \frac{Pr(\bar{s})}{f_s} = \frac{\sum_{i \in F} Pr_i}{\sum_{i \in F} Pr_i * \sum_{j \in O} \lambda_{ji}}$$

Procedimiento del árbol de fallas

El procedimiento de los árboles de falla básicamente consiste en un análisis sistemático que partiendo del estado de falla del sistema trata de determinar las combinaciones de eventos de fallas de componentes que conducen a ese estado del sistema.

Punto de partida de un estudio de confiabilidad utilizando el método del árbol de fallas es la definición del estado no deseado del sistema, por ejemplo, la imposibilidad de satisfacer la demanda en determinado nodo de la red, la incapacidad de funcionamiento de un sistema de protecciones, etc.

Objetivo del procedimiento es la determinación de todos los estados de falla de componentes y todas las combinaciones posibles de fallas que conducen al estado no deseado del sistema para calcular luego indicadores de confiabilidad, tal como se muestra en la figura 2.7.

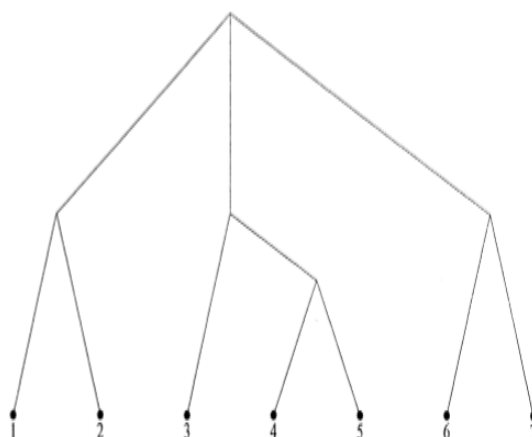


FIGURA 6 FALLAS DE COMPONENTES QUE CONDUCEN A LA FALLA DEL SISTEMA

Un árbol de fallas es un árbol lógico cuyas ramas representan eventos de fallas del sistema, de subsistemas o de componentes y cuyos vértices representan operaciones lógicas que relacionan los eventos entre entradas y salidas.

Las operaciones lógicas más utilizadas son AND y OR cuyos símbolos y tablas de verdad se muestran en la figura 8.

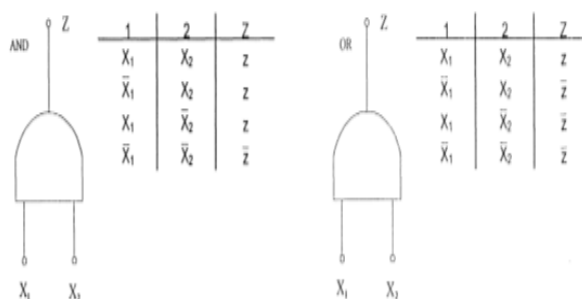


Figura 7 Tablas de verdad de las operaciones lógicas AND y OR

Cada posible ramificación del árbol termina siempre que se alcanza el evento falla de un componente; el método del árbol de fallas es particularmente adecuado para determinar los conjuntos de corte de un sistema.

En general conduce a una cantidad de conjuntos de corte, no todos los posibles, pero siempre están incluidos todos los conjuntos mínimos de corte; por lo tanto, luego de la construcción del árbol, el problema se reduce a identificar los conjuntos mínimos de corte. Luego se pueden calcular las probabilidades.

El procedimiento del árbol de fallas provee un método sistemático para establecer las relaciones causa-efecto entre las fallas en todos los niveles del sistema y para identificar las fallas

más importantes y los puntos débiles del sistema. Cada árbol de fallas tiene una estructura dual denominada árbol de éxito que se puede obtener partiendo del estado de operación del sistema identificando las combinaciones de componentes que deben estar en operación para que el sistema se encuentre en el estado considerado. [6]

Resultados y Discusión

Código de programación planteado

Para el desarrollo del código de programación planteado se utilizó el software Matlab como herramienta principal, en la cual se usaron 19 funciones que permiten optimizar la programación.

El script presentado es genérico ya que permite el análisis de dos alimentadores con transferencia de n nodos, con fines demostrativos de la capacidad del mismo se utiliza el sistema definido anteriormente, para lo cual el ingreso de datos se realiza a través de dos archivos .xlsx u hojas de Excel, en las cuales se ingresan los parámetros de los tramos que conectan cada nodo y la carga concentrada instalada en los mismos.

La simulación empieza por la obtención de la matriz de conectividad de los nodos y el desarrollo de un Flujo de Potencia DC que se actualice constantemente cada que ocurre desconexión de nodos provocada por las fallas que aparecen a partir de la simulación de fallas a partir de la búsqueda de las mismas en los trenes de operación de cada uno de los componentes, los que fueron mediante la relación entre números aleatorios generados y las características determinísticas ingresadas tales como tasa de falla y tasa de generación. En la figura 3.1 se muestra el tren de falla obtenido en una de las tantas simulaciones realizadas.

Análisis de confiabilidad en alimentadores de distribución utilizando métodos simulativos

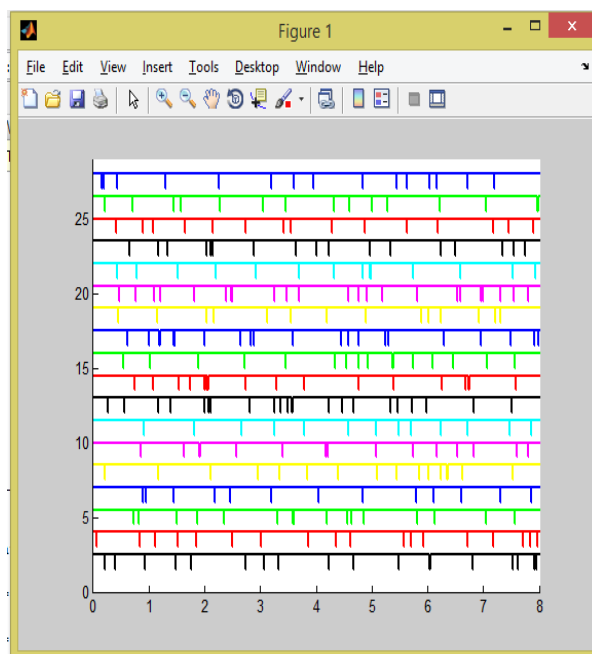
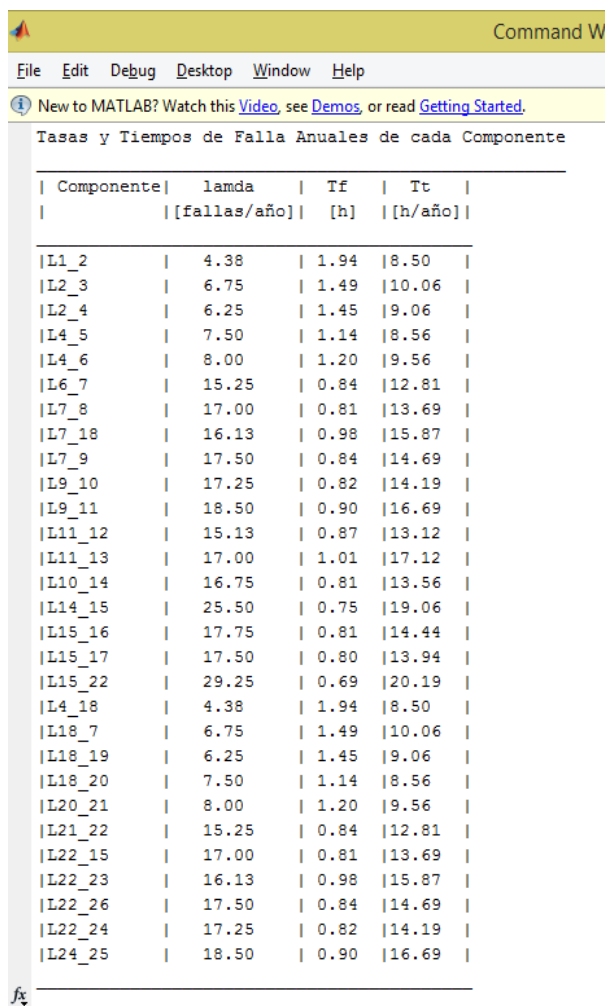


FIGURA 9 TRENES DE OPERACIÓN DEL SISTEMA

A partir de estos trenes de operación se analiza las condiciones de falla mediante un algoritmo de búsqueda, de la cual se obtienen los tiempos de falla de cada uno de los tramos y los puntos de entrega de energía eléctrica que se quedan sin suministro, se debe recalcar que se consideró un tiempo de reparación de la red ante falla de 30 minutos.

En la figura 10 se muestran las tasas y tiempos de falla de cada uno de los componentes del sistema.

Análisis de confiabilidad en alimentadores de distribución utilizando métodos simulativos



Command Window

File Edit Debug Desktop Window Help

New to MATLAB? Watch this [Video](#), see [Demos](#), or read [Getting Started](#).

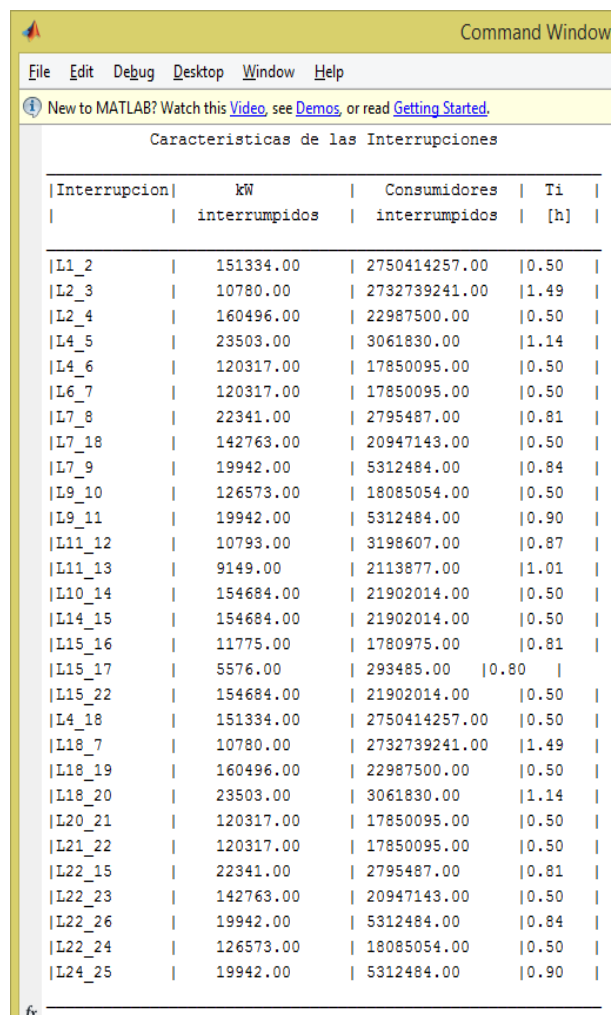
Tasas y Tiempos de Falla Anuales de cada Componente

| Componente | lamda [fallas/año | Tf [h | Tt [h/año |
|------------|-----------------------|-----------|---------------|
| L1_2 | 4.38 | 1.94 | 8.50 |
| L2_3 | 6.75 | 1.49 | 10.06 |
| L2_4 | 6.25 | 1.45 | 9.06 |
| L4_5 | 7.50 | 1.14 | 8.56 |
| L4_6 | 8.00 | 1.20 | 9.56 |
| L6_7 | 15.25 | 0.84 | 12.81 |
| L7_8 | 17.00 | 0.81 | 13.69 |
| L7_18 | 16.13 | 0.98 | 15.87 |
| L7_9 | 17.50 | 0.84 | 14.69 |
| L9_10 | 17.25 | 0.82 | 14.19 |
| L9_11 | 18.50 | 0.90 | 16.69 |
| L11_12 | 15.13 | 0.87 | 13.12 |
| L11_13 | 17.00 | 1.01 | 17.12 |
| L10_14 | 16.75 | 0.81 | 13.56 |
| L14_15 | 25.50 | 0.75 | 19.06 |
| L15_16 | 17.75 | 0.81 | 14.44 |
| L15_17 | 17.50 | 0.80 | 13.94 |
| L15_22 | 29.25 | 0.69 | 20.19 |
| L4_18 | 4.38 | 1.94 | 8.50 |
| L18_7 | 6.75 | 1.49 | 10.06 |
| L18_19 | 6.25 | 1.45 | 9.06 |
| L18_20 | 7.50 | 1.14 | 8.56 |
| L20_21 | 8.00 | 1.20 | 9.56 |
| L21_22 | 15.25 | 0.84 | 12.81 |
| L22_15 | 17.00 | 0.81 | 13.69 |
| L22_23 | 16.13 | 0.98 | 15.87 |
| L22_26 | 17.50 | 0.84 | 14.69 |
| L22_24 | 17.25 | 0.82 | 14.19 |
| L24_25 | 18.50 | 0.90 | 16.69 |

FIGURA 10 TASAS Y TIEMPOS DE FALLA DE CADA COMPONENTE DEL SISTEMA

Así mismo en la figura 3.3 se muestra una tabla que resume las características de las Interrupciones obtenidas en el modelo simulativo planteado en el presente estudio.

Análisis de confiabilidad en alimentadores de distribución utilizando métodos simulativos



Command Window

File Edit Debug Desktop Window Help

New to MATLAB? Watch this [Video](#), see [Demos](#), or read [Getting Started](#).

Características de las Interrupciones

| Interrupcion | kW | Consumidores | Ti |
|--------------|---------------|---------------|------|
| | interrumpidos | interrumpidos | [h] |
| L1_2 | 151334.00 | 2750414257.00 | 0.50 |
| L2_3 | 10780.00 | 2732739241.00 | 1.49 |
| L2_4 | 160496.00 | 22987500.00 | 0.50 |
| L4_5 | 23503.00 | 3061830.00 | 1.14 |
| L4_6 | 120317.00 | 17850095.00 | 0.50 |
| L6_7 | 120317.00 | 17850095.00 | 0.50 |
| L7_8 | 22341.00 | 2795487.00 | 0.81 |
| L7_18 | 142763.00 | 20947143.00 | 0.50 |
| L7_9 | 19942.00 | 5312484.00 | 0.84 |
| L9_10 | 126573.00 | 18085054.00 | 0.50 |
| L9_11 | 19942.00 | 5312484.00 | 0.90 |
| L11_12 | 10793.00 | 3198607.00 | 0.87 |
| L11_13 | 9149.00 | 2113877.00 | 1.01 |
| L10_14 | 154684.00 | 21902014.00 | 0.50 |
| L14_15 | 154684.00 | 21902014.00 | 0.50 |
| L15_16 | 11775.00 | 1780975.00 | 0.81 |
| L15_17 | 5576.00 | 293485.00 | 0.80 |
| L15_22 | 154684.00 | 21902014.00 | 0.50 |
| L4_18 | 151334.00 | 2750414257.00 | 0.50 |
| L18_7 | 10780.00 | 2732739241.00 | 1.49 |
| L18_19 | 160496.00 | 22987500.00 | 0.50 |
| L18_20 | 23503.00 | 3061830.00 | 1.14 |
| L20_21 | 120317.00 | 17850095.00 | 0.50 |
| L21_22 | 120317.00 | 17850095.00 | 0.50 |
| L22_15 | 22341.00 | 2795487.00 | 0.81 |
| L22_23 | 142763.00 | 20947143.00 | 0.50 |
| L22_26 | 19942.00 | 5312484.00 | 0.84 |
| L22_24 | 126573.00 | 18085054.00 | 0.50 |
| L24_25 | 19942.00 | 5312484.00 | 0.90 |

FIGURA 11 CARACTERÍSTICAS DE LAS INTERRUPCIONES

A partir de los datos obtenidos además de los valores dados en kW concentrados y Energía Promedio Consumida del archivo Demanda.xlsx se calculan los Índices de Confiabilidad de dicho sistema, los mismos que se muestran en la figura 11.

Análisis de confiabilidad en alimentadores de distribución utilizando métodos simulativos

```
Finalmente se presentan los Indices de Confiabilidad del Alimentador Salcedo  
  
SAIFI = 2.11 [interrupciones/consumidor.año]  
  
SAIDI = 2.04 [horas/consumidor.año]  
  
CAIDI = 0.97 [horas/consumidor.interrupción]  
  
ASAI = 0.99977  
  
ENS = 33825.34 [MWh/año]  
  
AENS = 0.01 [kWh/año]  
}; >>|
```

FIGURA 12 ÍNDICES DE CONFIABILIDAD

En el disco adjunto al presente proyecto técnico se tiene el script principal de la programación, los de cada una de las funciones y los dos archivos .xlsx donde se encuentran los datos de la demanda asociada a dichos alimentadores.

Conclusiones y recomendaciones

Los métodos simulativos son de gran ayuda para la obtención de índices de confiabilidad ya que permiten obtener el modelo de transferencia que logre mejorar los índices de confiabilidad de cualquier sistema de distribución de energía eléctrica.

El modelo desarrollado en el presente trabajo permite obtener índices de confiabilidad que se encuentren lo más cercano a lo establecido por las sugerencias detalladas en las normativas internacionales, de lo que resalta los valores obtenidos tanto en el índice medio de disponibilidad del servicio y la energía media no suministrada, de los cuales se obtuvo como resultado 0.99977 y 0.001 kWh/año respectivamente.

Análisis de confiabilidad en alimentadores de distribución utilizando métodos simulativos

Así mismo es prudente detallar la importancia de plantear un buen algoritmo de búsqueda de falla en el tren de operación, ya que a partir del mismo se obtendrán los valores necesarios para poder calcular los índices de confiabilidad del sistema.

La aplicación del flujo DC para estos casos es de mucha ayuda ya que considera únicamente la variación en el módulo de voltaje, dando así una ajustada restricción para poder considerar como falla niveles de voltaje fuera del límite establecido para la regulación.

La utilización de Métodos Simulativos o la Simulación de Monte Carlo permite modelar el sistema de distribución de una mejor manera, ya que la aleatoriedad del mismo se interrelaciona con el alto dinamismo del sistema, generando así excelentes resultados.

Se recomienda tomar como base el presente proyecto para continuar con estudios más detallados de confiabilidad de sistemas de distribución de energía eléctrica, en los cuales se considere la variación del desfase de ángulo en el voltaje como falla del elemento.

Así mismo se recomienda la utilización del código planteado en el presente proyecto para el análisis de confiabilidad de otros alimentadores tanto de CNEL Esmeraldas como de otras empresas distribuidoras, ya que está programado de manera general para el ingreso de cualquier alimentador, “Configuración N Barras”.

Para que el presente código fluya de manera eficiente y en buen tiempo de ejecución, se recomienda la utilización de hardware y software con características actualizadas, caso contrario el tiempo de procesamiento y ejecución del programa va a ser elevado.

Bibliografía.

- [1] Richard E. Brown, “Electric Power Distribution Reliability”, Second Edition, Crc Press, 2008.
- [2] Ali Chowdhury, Don Koval, “Power Distribution System Reliability: Practical Methods And Applications”, Volumen 48 De Ieee Press Series On Power Engineering, John Wiley & Sons, 2011.
- [3] H. Lee Willis, “Power Distribution Planning Reference Book”, Second Edition, Crc Press, 2004.
- [4] Chowdhury A., Koval D. “Power Distribution System Reliability Practical Methods And Applications”, Ieee Press, 2000.
- [5] Pérez-Arriagada, I., Galán, A. & Rivier, M. (1993) “Modelo De Explotación Generación/Red”. Instituto De Investigación Tecnológica, Universidad Pontifica Comillas. España
- [6] Elmaikas D. “New Computational Methods In Power System Reliability” The Israel Electric Coporation Ltd, 2005
- [7] Brown, R. “Electric Power Distribution Reliability” Second Edition, Crc Press, 2009.