

MENA ALFREDO ING.  
 ESCUELA POLITECNICA NACIONAL  
 EMPRESA ELECTRICA QUITO

MONCAVO IVAN ING.  
 ESCUELA POLITECNICA NACIONAL

1. RESUMEN:

En este trabajo se presenta un método de evaluación de los índices de confiabilidad en los sistemas de distribución, tanto los relacionados con el usuario como los del sistema en conjunto, se basa en el criterio de Pérdida Total de Continuidad (TLCO), empleando el método de Reducción de Red. Este trabajo puede ser utilizado ya sea en la planificación o en la operación de estos sistemas.

El método desarrollado asocia los efectos de mantenimiento preventivo, salidas forzadas, acciones de transferencia de carga, seccionadores o barras de operación, dentro de un modelo de clima de dos estados (clima normal y adverso) para el cálculo de los índices.

Se desarrolla un programa computacional interactivo, el mismo que permite al usuario construir, expandir, reforzar o bien modificar sus sistemas y los diferentes parámetros a través del terminal del computador; esta característica del programa permite realizar análisis de sensibilidad sobre las diferentes alternativas de diseño o de operación del sistema que se estudia.

2. INTRODUCCION:

La evaluación de confiabilidad es ahora aceptada como una parte integral en la fase de planificación de sistemas de distribución (1).

La mayoría de estudios sobre confiabilidad desarrollados en los últimos años, han enfocado sus análisis hacia los sistemas de generación y transmisión, debido a la necesidad de evaluar posibles estados que podrían generar el colapso total del sistema de potencia. Un sistema de distribución es relativamente menos importante, además los efectos de sus salidas son bastante localizados, pero a pesar de esto las estadísticas de fallas experimentadas por los consumidores de la mayoría de empresas indican que los sistemas de distribución producen una mayor contribución para las indisponibilidades de servicio al usuario. En la tabla 2.1 obtenida de la referencia 2 se aprecia este hecho.

Tabla 2.1 Estadística de fallas para consumidores

Origen	Indisponibilidades promedio por abonados por año (%)
Generación/ transmisión	0.5
132 KV	2.4
66-33 KV	8.3
11-6.6 KV	60.7
Distribución secund.	11.9
Mejoras del sistema	16.2
Total	100.0

Estadísticas como estas crean la necesidad de evaluar la confiabilidad de sistemas de distribución, lo cual servirá como herramienta de decisión al analizar diferentes alternativas de diseño. Igual puede servir para evaluar la operación del sistema, los efectos de los esquemas de protección y la eficacia de las políticas de mantenimiento.

Las mejoras que se den en cuanto a confiabilidad del servicio influyen directamente en el grado de satisfacción del usuario y lógicamente en la energía vendida por la empresa.

La evaluación cuantitativa de confiabilidad en sistemas de distribución puede ser dividida en dos subproblemas: a) el relativo a las técnicas de evaluación y b) el que tiene que ver con el manejo apropiado de datos de confiabilidad de los elementos y de los sistemas que se analicen. En cuanto al primero, una técnica de evaluación deberá reflejar el comportamiento aleatorio y las políticas de operación del sistema; en cuanto al segundo, deberá desarrollarse programas computacionales interactivos que permitan manejar fácilmente los datos de los sistemas.

Es por estas razones que se ha desarrollado este trabajo en el que se utiliza como técnica de evaluación el método de Reducción de Red, considerando en él las diversas causas de fallas y efectos producidos por las condiciones climáticas en las que operan estos circuitos, y como técnica de cálculo un programa computacional interactivo que permite al usuario construir, expandir, reforzar o modificar sus sistemas y los diferentes parámetros a través del terminal del computador.

3. INDICES A CALCULARSE

El grado promedio de satisfacción de un abonado está en función del número de interrupciones por año y el tiempo promedio de reposición de servicio. Además de estas medidas, la empresa puede estar interesada en otras que reflejan las bondades del servicio entregado a todos los usuarios (4).

En este trabajo se evalúan las siguientes medidas de confiabilidad:

a) Índices parciales o por punto de carga

- Frecuencia de falla  $\lambda_i$
- Tiempo promedio de interrupción  $r_i$
- Tiempo promedio de interrupción al año  $U_i$

b) Índices generales del sistema

Estos índices constituyen un promedio ponderado de los anteriores frente al número de usuarios o a la potencia media instalada en cada punto de carga. Estos son:

- Número promedio de interrupciones de servicio por abonado por año (SAIFI)

$$SAIFI = \frac{\sum \lambda_i N_i}{\sum N_i} \quad (\text{fallas/año/abonado})$$

Donde:  $i=1$ , Número de puntos de carga del sistema

$N_i$  = Número de abonados del punto de carga  $i$ .

-Tiempo de reposición medio por abonado por año (SAIDI)

$$SAIDI = \frac{\sum U_i N_i}{\sum N_i} \text{ (horas/abonado/año)}$$

-Tiempo promedio de interrupción por abonado (CAIDI)

$$CAIDI = \frac{\sum U_i N_i}{\sum \lambda_i N_i} \text{ (horas/interrupción/abonado)}$$

-Disponibilidad (Indisponibilidad) promedio de servicio (ASAI) (ASUI)

$$ASAI = \frac{\sum N_i 8760 - U_i N_i}{\sum N_i 8760}$$

$$ASUI = 1 - ASAI$$

-Probabilidad de salida de servicio (P (>t))

Es la probabilidad de que un usuario se quede sin servicio durante un tiempo mayor a uno predeterminado.

$$P_i (>t) \approx \exp(-t/r_i)$$

-Número máximo esperado de interrupciones ( $\lambda_{max}$ )

$$\lambda_{max} = \max(\lambda_i)$$

Además se evalúan los índices dados por la Comisión de Integración Eléctrica Regional (CIER), los mismos que están relacionados con las potencias medias instaladas en cada punto de carga.

- Frecuencia media de interrupción (FI)

$$FI = \frac{\sum \lambda_i \text{ KVA}_i}{\sum \text{KVA}_i} \text{ (fallas/año/abonado)}$$

- Duración media de las interrupciones (DI)

$$DI = \frac{\sum \text{KVA}_i \cdot U_i}{\sum \lambda_i \cdot \text{KVA}_i} \text{ (horas/interrupción/abonado)}$$

- Tiempo total de interrupción medio (TI)

$$TI = \frac{\sum \text{KVA}_i \cdot U_i}{\sum \text{KVA}_i} \text{ (horas/abonado/año)}$$

#### 4. TÉCNICA DE EVALUACIÓN

El criterio básico que se usa en este trabajo es el de Pérdida Total de Continuidad (TLOC), según el cual, un punto de carga del sistema queda fuera de servicio cuando todos los caminos entre él y la (s) fuente (s) son interrumpidas, para esto se asume que los grupos en paralelo son totalmente redundantes y cualquier elemento es capaz de transportar toda la potencia de él demandada (2).

El método de evaluación es el de Reducción de Red, por el que, se hace sucesivas reducciones serie-paralelo, hasta llegar a un equivalente entre el punto de carga y la fuente (100% confiable), con un  $\lambda_{Total}$  y un  $r_{Total}$ .

Dentro de un modelo de clima de dos estados: normal y adverso, se desarrolla la técnica de evaluación considerando que cada elemento del sistema puede fallar debido a las siguientes causas: (4)

- Fallas aleatorias.
- El clima es lo suficientemente adverso y de una duración tal que provoca su falla.
- El mantenimiento preventivo requiere de su desenergización.

Para la aplicación del modelo de clima de dos es

tados se asume que:

- Los tiempos de falla y reparación son exponencialmente distribuidos tanto durante clima normal como durante clima adverso.

$$P \text{ (tiempo de falla en clima normal} > t) = \exp(-\lambda t)$$

$$P \text{ (tiempo de falla en clima adverso} > t) = \exp(-\lambda' t)$$

- Las duraciones de los períodos de clima normal y adverso están exponencialmente distribuidas.

- Los tiempos de reparación generalmente son muy cortos comparados con el tiempo medio antes de fallar MTTF de los componentes, además, la duración de un período de clima adverso es también corta comparada con los tiempos típicos de reparación (MTTR).

- Los tiempos de reparación medios durante clima normal y adverso son los mismos.

Se utilizan los siguientes parámetros de confiabilidad de los componentes

$\lambda_i$  = Fallas/año de clima normal

$\lambda'_i$  = Fallas/año de clima adverso

$r_i$  = Valor esperado de los tiempos de reparación (horas)

$\lambda''_i$  = Salidas por mantenimiento preventivo/año

$r'_i$  = Duración esperada de las acciones de mantenimiento (horas)

Además:

$N$  = Duración esperada de un período de clima normal (años)

$S$  = Duración esperada de un período de clima adverso (años)

Para un componente expuesto a las fluctuaciones climáticas, su frecuencia de falla total será:

$$\lambda_{fi} = \frac{N \lambda_i}{N+S} + \frac{S \lambda'_i}{N+S} \text{ (fallas/año)} \quad (4.1)$$

Para un sistema compuesto por  $n$  componentes en serie, su frecuencia de falla equivalente es:

$$\lambda_{fe} = \sum_{i=1}^n \lambda_{fi} \text{ (fallas/año)} \quad (4.2)$$

Esta ecuación asume que la probabilidad de ocurrencia de fallas de dos o más componentes al mismo tiempo es despreciable en sistemas serie.

El valor esperado del tiempo de interrupción para un sistema serie debido a salidas forzadas será:

$$r_{fe} = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_{fi} \cdot r_i}{\lambda_{fe}} \text{ (horas)} \quad (4.3)$$

Para que un sistema en paralelo de dos componentes falle será necesario que suceda una de las dos condiciones siguientes:

- Los dos componentes fallan simultáneamente.
- Un componente puede fallar y antes de que se complete su reparación falle el segundo.

Bajo la consideración adicional de que la reparación no puede efectuarse durante clima adverso, deben considerarse las contribuciones de falla de los siguientes cuatro casos.

a) La falla inicial ocurre durante clima normal y la segunda durante clima normal.

$$\lambda_a = \frac{N}{N+S} (\lambda_1 + \lambda_2 + r_1 + r_2) \quad (4.4)$$

b) La falla inicial ocurre durante clima normal y la segunda durante clima adverso.

$$\lambda_b = \frac{N}{N+S} \left( \lambda_1 \frac{r_1}{N} \lambda_2' S + \lambda_2 \frac{r_2}{N} \lambda_1' S \right) \quad (4.5)$$

c) La falla inicial ocurre en clima adverso y la segunda durante clima normal.

$$\lambda_c = \frac{S}{N+S} (\lambda_1' \lambda_2 + r_1 + \lambda_2' \lambda_1 + r_2) \quad (4.6)$$

d) Ambas fallas ocurren durante clima adverso.

$$\lambda_d = \frac{S}{N+S} (2 \lambda_1' \lambda_2' + S) \quad (4.7)$$

La frecuencia de falla y los tiempos de reparación totales del sistema en paralelo serán:

$$\lambda_{pp} = \lambda_a + \lambda_b + \lambda_c + \lambda_d \quad (4.8)$$

$$U_{pp} = (\lambda_a + \lambda_c) \left( \frac{r_1}{r_1+r_2} \right) + (\lambda_b + \lambda_d) \left( \frac{r_1}{r_1+r_2} + S \right) \quad (4.9)$$

$$r_{pp} = U_{pp} / \lambda_{pp} \quad (4.10)$$

Para  $U_{pp}$ , el último término que afecta a (b + d) aparece en el término +S debido a que la reparación no puede efectuarse durante el período S de clima adverso.

#### Efecto del mantenimiento preventivo

Para representar el efecto de las salidas por mantenimiento en el estudio de confiabilidad se asume lo siguiente: (3)

-Un componente no puede considerarse en mantenimiento preventivo si esta acción causa una salida del sistema.

-El mantenimiento no puede iniciarse durante el clima adverso.

-Ni reparaciones ni mantenimiento pueden continuarse durante clima adverso.

Consecuentemente las ecuaciones (4.4), (4.5) y (4.9) pueden ser adaptadas a este caso, lo que da:

$$\lambda_{pm} = \lambda_a'' + \lambda_b'' + \lambda_c'' + \lambda_d'' \quad (4.11)$$

$$U_{pm} = \lambda_a'' \left( \frac{r_1}{r_1+r_2} \right) + \lambda_b'' \left( \frac{r_1}{r_1+r_2} + S \right) + \lambda_c'' \left( \frac{r_1}{r_1+r_2} + S \right) + \lambda_d'' \left( \frac{r_1}{r_1+r_2} + S \right) \quad (4.12)$$

$$r_{pm} = U_{pm} / \lambda_{pm} \quad (4.13)$$

Los índices totales que consideren las salidas forzadas y por mantenimiento para un sistema en paralelo serán:

$$\lambda_{Total} = \lambda_{pp} + \lambda_{pm}$$

$$U_{Total} = U_{pp} + U_{pm}$$

$$r_{Total} = U_{Total} / \lambda_{Total}$$

#### Efecto de los switches de desconexión

Una alternativa de reforzamiento de un sistema de distribución, es la provisión de estos elementos que van ubicados a lo largo del recorrido de los primarios, con el fin de aislar aquellas secciones fallosas del alimentador y que estén afectando indirectamente a determinados puntos de carga. Este hecho tiene que ver directamente con las ZONAS DE PROTECCIÓN existentes dentro del primario, estas zonas son generadas por cada elemento de protección y se extienden hasta el primer elemento de protección de la siguiente zona, con excepción de los casos de elementos de protección de los puntos de carga (transformadores de distribución) (3). El efecto de estos switches puede apreciarse claramente en el ejemplo de la figura 4.1

rectamente con las ZONAS DE PROTECCIÓN existentes dentro del primario, estas zonas son generadas por cada elemento de protección y se extienden hasta el primer elemento de protección de la siguiente zona, con excepción de los casos de elementos de protección de los puntos de carga (transformadores de distribución) (3). El efecto de estos switches puede apreciarse claramente en el ejemplo de la figura 4.1

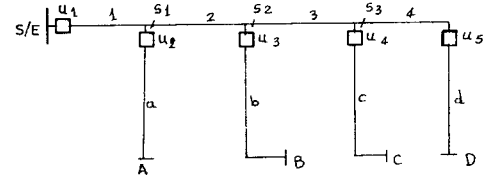


Figura 4.1 Primario de distribución provisto de switches de desconexión.

Si se considera los elementos de la zona de protección creada por  $u_1$  ( $u_1, 1, 2, 3, 4, u_2, u_4, u_5$ ) como ejemplo, se tiene que 4 afectará a la frecuencia de falla de A contribuyendo con un tiempo de interrupción que no es su tiempo de reparación, sino el de maniobra de  $s_3$  necesario para aislar el elemento 4 en caso de que falle.

Las acciones de despeje de fallas de los elementos de protección automáticos se las considera perfectas, es decir operan cuando se requiere de ellos el 100% de veces.

#### Efecto de la transferencia de carga

Las acciones de transferencia de carga influyen también con su tiempo de maniobra para reducir los tiempos de interrupción causados por la reparación de elementos que afectan directamente a determinados puntos de carga. En la figura 4.2 se puede apreciar el efecto de las posibilidades de transferencia de carga.

Del ejemplo se aprecia que para el punto de carga B, el elemento 1 afecta con su frecuencia de falla y contribuirá con un tiempo

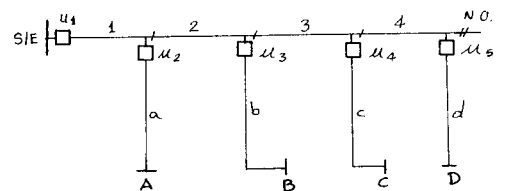


Figura 4.2 Primario de distribución con posibilidades de transferencia de carga.

de interrupción de servicio al punto B igual al tiempo de maniobra del switch de transferencia NO que será menor que el tiempo de reparación de 1.

#### 5. ALGORITMO DE CALCULO

El análisis de confiabilidad de un sistema de distribución que involucre las diferentes características de operación y mantenimiento descritas previamente, implica además dos casos básicos de evaluación:

a) La pérdida total de continuidad de servicio sin considerar las posibilidades de transferencia de carga.

rencia de carga.

b) La pérdida total de continuidad de servicio considerando las posibilidades de transferencia de carga.

Un diagrama de bloques general del algoritmo propuesto en este trabajo, está representado en la figura 5.1

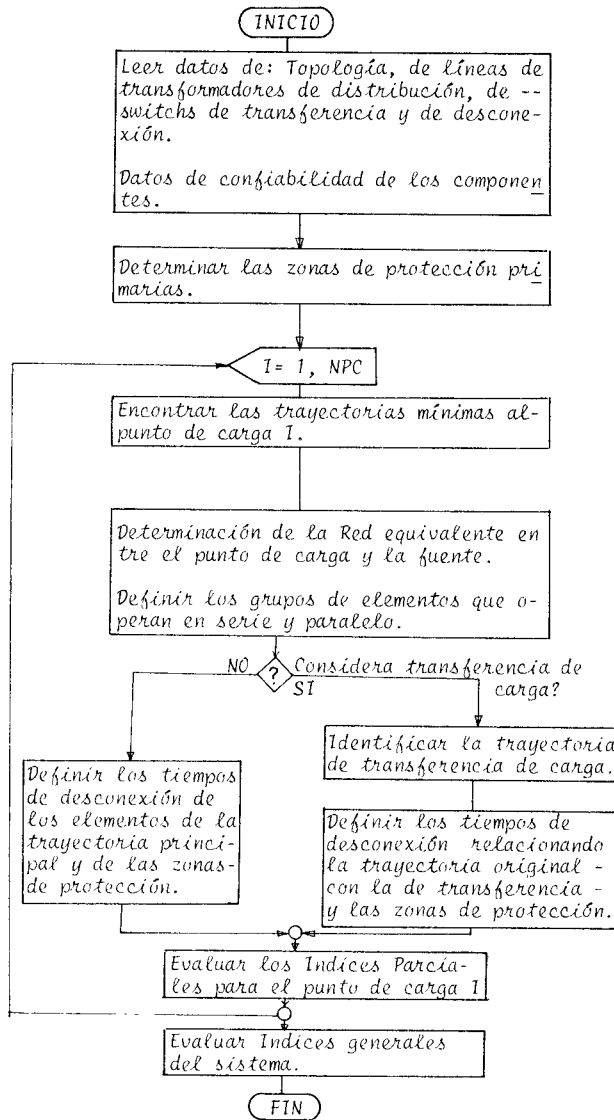


Figura 5.1. Diagrama de bloques del algoritmo general de cálculo.

Este algoritmo de evaluación de confiabilidad es usado dentro de una técnica computacional interactiva que se analiza en el siguiente numeral.

## 6. ESTRUCTURA INTERACTIVA GENERAL

Esta estructura tiene seis características importantes.

a) La Topología del sistema se ingresa según una numeración secuencial de los elementos, el tipo de elemento y un arreglo de componentes de los que recibe potencia cada elemento. Mientras esto se realiza,, el programa simultáneamente prepara

tablas para el ingreso de los datos de los diferentes elementos que conforman el sistema.

b) Las tablas de los datos preparadas en (a) son llamadas y aparecen en pantalla. Los datos numéricos se los ingresa en tales tablas sin ajustarse a ningún formato, sino únicamente cumpliendo con el número de datos requeridos en la tabla.

c) Antes de la ejecución, el programa hace varias preguntas al usuario, con el propósito de conocer parámetros de ejecución y control.

d) El programa evalúa la confiabilidad de un sistema utilizando el algoritmo expuesto en el numeral anterior e indica al usuario sobre el avance del análisis.

e) Después de ejecutar el programa, el usuario puede obtener los resultados tabulados en un archivo propio para ellos.

f) Los sistemas, los parámetros de ejecución y los resultados pueden ser archivados permanentemente. Los archivos de sistemas y los de parámetros son accesibles para realizar modificaciones.

Estas y otras características son descritas con mayor detalle en los siguientes puntos. En la figura 6.1 se puede apreciar la estructura interactiva general así como su organización.

## Proceso de interacción y control

Un programa interactivo no puede ser ejecutado como un solo ente sino que necesita la comunicación con el usuario durante la ejecución de los procesos (1) El usuario da las instrucciones requeridas por el computador en ciertos puntos de parada o de interacción.

Existen cuatro formas de lograr la comunicación entre el usuario y la máquina.

- 1) El computador hace la pregunta a través de la pantalla con las alternativas de respuesta p.e. SI/NO.
- 2) El computador pide información tal como el nombre de un sistema, a lo que el usuario deberá contestar de acuerdo a la pregunta y el computador analizará la validez de la respuesta.
- 3) El computador identifica a un dato de un archivo según un número de registro lo cual permite llamar algún dato en particular para revisar o hacer algún cambio o modificación.
- 4) El computador puede presentar en pantalla un determinado número de opciones con su respectiva clave para guiar al usuario en los diferentes procesos que se pueden dar.

En cuanto al control, Este puede darse en el ingreso de datos por parte del usuario o en la ejecución del cálculo de confiabilidad dando mensajes al usuario para rectificar posibles errores cometidos por éste.

## Construcción de un circuito

Esta opción principal (Bloque 1 de la Fig. 6.1), precede a crear a más del archivo básico de datos

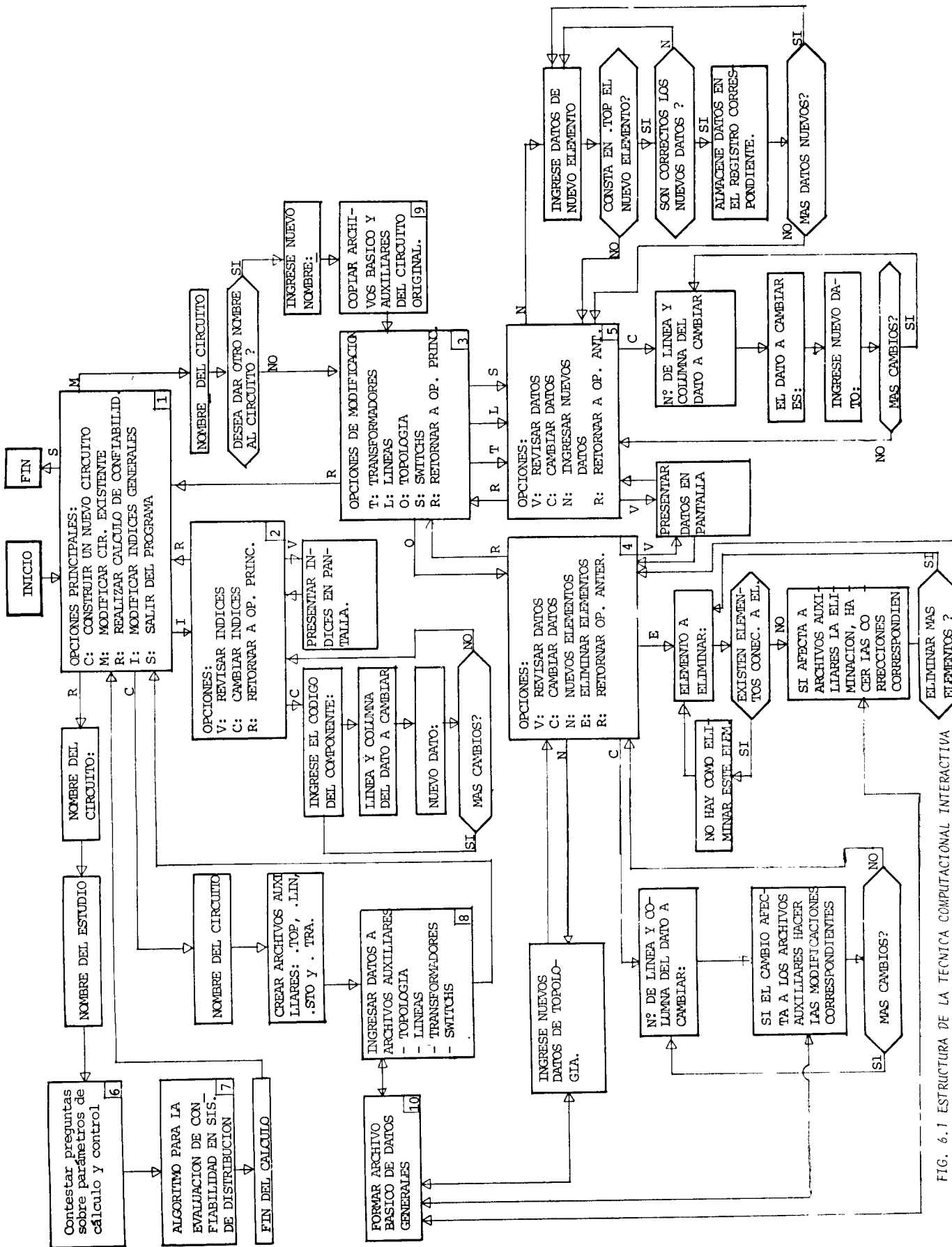


FIG. 6.1 ESTRUCTURA DE LA TECNICA COMPUTACIONAL INTERACTIVA

generales del sistema con el nombre del circuito, otros auxiliares de extensión, TOP, LIN, STO y TRA para los datos de topología, líneas, switches de transferencia con los de desconexión y de los transformadores de distribución respectivamente, los mismos que deberán ser llenados secuencialmente para la total representación del sistema.

La secuencia que sigue para la construcción de un sistema está dada por el mismo programa, iniciando por el archivo de topología del cual se obtienen datos generales que sirven de control para el mismo y los otros archivos adicionales. Una representación gráfica del proceso descrito puede apreciarse en la figura 6.2.

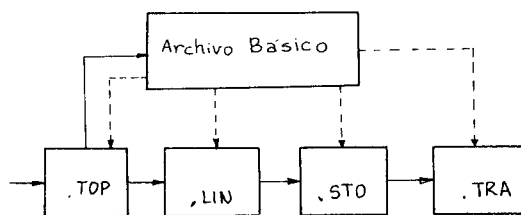


Figura 6.2 Proceso de construcción de un circuito.

#### Ingreso y Modificación de datos

Los datos que se ingresan pueden clasificarse en dos grupos:

- a) Datos de topología del circuito que contiene información sobre el número del componente, su tipo y los elementos de los que recibe potencia. El ingreso de datos se lo hace con formato libre con la única condición de que exista al menos un espacio en blanco entre datos. Una vez de que el usuario ingrese estos datos, el programa va chequeándolos simultáneamente para aceptarlos o no, si sucede esto último presentará en pantalla el mensaje del error cometido y pedirá que se ingrese nuevamente el dato.
- b) Contiene datos de las características físicas de los elementos que influyen en el cálculo de confiabilidad tales como las longitudes de los tramos de líneas, tiempos de maniobra de los switches de operación manual, potencia de los transformadores de distribución, etc; igualmente su ingreso se lo hace con formato libre y el programa constata la validez de los datos.

A estos datos de un sistema existente, se accede por intermedio de la opción principal M: MODIFICAR UN SISTEMA EXISTENTE y el nombre del circuito que se desea modificar. Si el sistema existe en archivo, entonces aparecerá en pantalla las opciones de modificación de los archivos auxiliares del sistema es decir el de topología, el de líneas, switch y el de transformadores de distribución (Bloque 3 Fig. 6.1). Una vez que se escoja el archivo que desea modificar o hacer cambios aparecerá en pantalla otro grupo de opciones que el usuario escogerá según si desea revisar, ingresos nuevos elementos o hacer cambios en alguna línea de datos en particular, para lo que el programa requerirá información de la línea y la columna del dato a cambiar. Cualquier dato que se corrija debe ingresarse con formato libre.

Los datos de confiabilidad de los componentes tales como tasas de falla y tiempos de reparación son ingresados para cada tipo de componente y no para cada elemento del sistema, con esto se redu-

ce considerablemente la cantidad de datos que debe ingresarse; igualmente estos datos pueden ser cambiados de manera similar a cualquier cambio en los archivos auxiliares, para esto deberá ingresarse por la opción principal I: MODIFICACION DE INDICES GENERALES.

#### Archivo y recuperación de los sistemas

Una importante característica de una técnica de computación interactiva es la capacidad de archivar un sistema o acceder a otros que estén en archivo. Esto permite que se puedan crear esquemas alternativos modificando algún sistema existente y almacenándolos separadamente para posteriormente comparar los méritos de cada alternativa (1).

Los sistemas son almacenados según el nombre dado por el usuario al construirlo o copiarlo de otro existente, si se requiere algún sistema en particular, será necesario dar su nombre cuando el computador lo requiera, el nombre que se ingrese será chequeado por el computador para ver si existe en archivo antes de ser cargado en su memoria.

#### 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La principal conclusión que puede sacarse de este trabajo es que todas las características u operaciones que se conoce que afectan a la confiabilidad de un sistema de distribución deben ser tomadas en consideración.

Las técnicas aquí expuestas para el análisis de confiabilidad pueden ser empleadas satisfactoriamente en sistemas de distribución radiales o en sistemas en lazo que normalmente operen como radiales.

El modelo propuesto para analizar la confiabilidad de sistemas de distribución es simple y puede ser usado no solamente mediante su implementación en un computador, sino que también puede ser usado para cálculos a mano de sistemas simples. Además, la eficiencia en reconocer las características operacionales reales de los sistemas, es una característica muy importante del modelo y la técnica de evaluación desarrollados.

La técnica computacional interactiva permite al computador guiar al usuario para el ingreso de datos y el manejo de sistemas de archivo, con un simple y flexible conjunto de instrucciones y preguntas.

#### BIBLIOGRAFIA

1. R.N. Allan, B. Barazehs and S. Sumar; Reliability Evaluation of Distribution Systems Using Graphic-Based Interactive Computational Methods; IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems; Vol. PAS-101, No. 1; January 1982.
2. R. Bilinton, R. Allan; Reliability Evaluation of Power Systems; Ed. Pitman; Londres 1984.
3. I. Moncayo; Análisis de Confiabilidad en Sistemas de Distribución; Tesis de Grado E.P.N. 1987
4. J.H. Cooper, P.B. Shortley; Reliability Procedures for Subtransmission and Distribution Systems; IEEE Tutorial Course: Probability Analysis of Power System Reliability, Text 71M30 PWR; New York 1971.

## BIÓGRAFÍAS



*MONCAVO ANDRADE, IVAN. Nació en Cañar, el 12 de Agosto de 1962. - Título de Bachiller Técnico en el Colegio Técnico Salesiano de Cuenca en 1980. Estudios Superiores en la Escuela Politécnica Nacional, Título de Ingeniero Eléctrico en Diciembre de 1987.*

*MENA PACHANO, ALFREDO.*

*Su biografía consta en la revista "ANALES DE LAS JORNADAS EN INGENIERIA ELECTRICA Y ELECTRONICA" E.P.N. junio de 1984. Actualmente desempeña el cargo de Gerente General de la Empresa Eléctrica Quito S.A.*