



**ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL**  
**Facultad de Ingeniería en Electricidad**



"EVALUACION DE LA CONFIABILIDAD EN  
SISTEMAS DE GENERACION UTILIZANDO  
UN COMPUTADOR PERSONAL"

TESIS DE GRADO

Previa a la obtención del Título de:  
**INGENIERO EN ELECTRICIDAD**

Especialización: **POTENCIA**

Presentada por:  
**Alvaro Pontón F.**

Guayaquil - Ecuador

1989

## AGRADECIMIENTO

AL ING. CRISTOBAL MERA

Director de Tesis, por su ayuda  
y colaboración para la  
realización de este trabajo:

DEDICATORIA

A MIS PADRES

A MIS HERMANOS

A MIS AMIGOS



Ing. Cristobal Mera G.  
Director de tesis.



Ing. Jorge Flores.  
Sub-decano de la Facultad  
de Ingeniería Eléctrica.



Ing. Leo Salomón F.  
Miembro del Tribunal.



Ing. José Layana Ch.  
Miembro del Tribunal.

## DECLARACION EXPRESA

"La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas expuestos en esta tesis, me corresponden exclusivamente; y, el patrimonio intelectual de la misma, a la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL"

(Reglamento de Exámenes y Títulos profesionatles de la ESPOL).



.....  
Alvaro Francisco Pontón Frugone.

## RESUMEN

Se han desarrollado diferentes métodos basados en análisis probabilístico para evaluar la confiabilidad de los sistemas de generación, siendo los más importantes, el L.O.L.P., el método de frecuencia y duración, el Método de Montecarlo, el E.U.E. y otros. Todos estos métodos entregan como resultado una probabilidad que se asocia con una determinada pérdida de carga, sin embargo, el método de frecuencia y duración entrega dos valores adicionales que son indicativos de la frecuencia con que se espera que se presente un estado de pérdida de carga y de cuanto tiempo se espera que dure dicho estado.

El procedimiento óptimo para evaluar la frecuencia y duración, lo constituye el modelo de MARKOV, el cual *presenta algunas limitaciones. Para resolverlo existen* algunos métodos que van desde el desarrollo gráfico hasta el balance de frecuencias, pasando por la matriz de transición y otros. Todos estos métodos requieren de una capacidad muy grande de memoria cuando los sistemas pasan de cierta dimensión. Para evitar este problema, se desarrolló un procedimiento alternativo basado en el método de balance de frecuencias pero que permite evaluar el sistema nivel por nivel.

Una rutina va ordenando los estados según la capacidad en línea, a la vez que fusiona los estados que representan igual capacidad y desecha los estados con baja probabilidad.

En lo referente a la carga se utiliza un modelo discreto de dos niveles de carga: un nivel base, el cual se mantiene para todos los ciclos de carga, y un nivel pico, el cual es característico de cada ciclo. Cuando se han desarrollado los modelos de carga y generación, se los confronta entre sí para obtener los márgenes de generación con su respectiva probabilidad y la probabilidad acumulada, la frecuencia y duración y para finalizar archivando los resultados en el soporte de disco empleando archivos de acceso secuencial.

Para facilitar el manejo de archivos se divide el programa en dos partes: un programa maestro, con el cual es posible crear los archivos de datos, listar datos o resultados, corregir datos, etc.; y, un subprograma destinado a la evaluación propiamente tal, cuyos resultados se registran en archivos de acceso secuencial para luego ser listados mediante el programa maestro.



## INDICE GENERAL

	Pag.
RESUMEN .....	VI
INDICE GENERAL.....	VIII
INDICE DE FIGURAS .....	X
INTRODUCCION.....	12
<b>I. GENERALIDADES</b>	
1.1. Confiabilidad .....	15
1.2. Indices de confiabilidad .....	17
<b>II. EL MODELO DE MARKOV</b>	
2.1. Descripción .....	19
2.2. Limitaciones .....	21
2.3. Aplicación como modelo de generación .....	22
2.4. Métodos de resolución .....	24
2.4.1. Método gráfico .....	24
2.4.2. Matriz de transición .....	28
2.4.3. Balance de frecuencias .....	34
<b>III. LA CARGA DEL SISTEMA</b>	
3.1. Diferentes modelos de carga .....	39
3.2. Descripción del modelo escogido .....	42
<b>IV. DESARROLLO DEL MODELO</b>	
4.1. Desarrollo del modelo de generación .....	45
4.2. Algoritmo de solución del modelo de generación .....	49



4.3.	Desarrollo del modelo de carga .....	50
4.4.	Algoritmo de solución del modelo de carga ..	52
V.	INDICES DE FRECUENCIA Y DURACION	
5.1.	Introducción .....	53
5.2.	Método de evaluación .....	54
5.3.	Algoritmo de evaluación .....	57
5.4.	Confiabilidad en términos de frecuencia y duración .....	58
VI.	PROGRAMACION	
6.1.	Estructura del programa .....	60
6.2.	Archivos auxiliares .....	62
6.3.	Interpretación de resultados .....	63
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	66
	APENDICES	
A.-	Diagramas de flujo .....	69
B.-	Manual de operación .....	85
C.-	Ejemplo de entrada de datos .....	101
D.-	Ejemplo de salida de datos .....	107
E.-	Listado .....	112
	BIBLIOGRAFIA .....	130

## INTRODUCCION

Se dice que los primeros intentos por desarrollar una teoría de confiabilidad pueden remontarse a los tiempos de la segunda guerra mundial, donde la primera evaluación de confiabilidad se realizó para explicar la baja eficiencia de los misiles alemanes V1 y V2, los cuales fueron contruidos con un sinnúmero de componentes considerados altamente confiables. En ese entonces era difícil aceptar el hecho de que un sistema en el cual todos sus componentes son altamente confiables, pueda tener una eficiencia tan baja. Hoy sabemos a ciencia cierta que la confiabilidad de un sistema es igual al producto de la confiabilidad de cada uno de sus componentes.

Después de la guerra, los primeros estudios serios en materia de confiabilidad se aplicaron a las industrias electrónicas, nucleares y espaciales; en las cuales se demandaba una alta confiabilidad debido a que la complejidad de los sistemas se iba incrementando día a día; sinembargo estas teorías se basaban únicamente sobre componentes no reparables. Con el paso del tiempo se profundizan los estudios de confiabilidad extendiendolos hacia más aplicaciones incluyendo sistemas de componentes reparables y no reparables.

Los estudios orientados hacia la evaluación de la capacidad de generación de reserva fue desarrollada posteriormente debido a que era evidente la necesidad de incluir un procedimiento estadístico. En este sentido aparece la primera contribución significativa en 1947 aunque con modelos matemáticos comparativamente simples basados en la pérdida de carga.

Con los resultados obtenidos se organizó un compendio de reportes de la AIEE, y algunos de los métodos se fueron perfeccionando y, para los años sesenta, ya eran procedimientos rutinarios en varias aplicaciones. En aquel tiempo se comienzan a extender las investigaciones de confiabilidad hacia los sistemas de transmisión y distribución empleando técnicas analíticas más complicadas; así aparece el proceso de Markov que pronto se utilizó para modelar el sistema de generación. Las primeras publicaciones en este ámbito datan de 1964.

Los estudios en materia de confiabilidad aplicados a sistemas de potencia reciben un nuevo impulso en 1965 a raíz de que se presentara una falla que abarcó una extensa zona en el nordeste de Estados Unidos y el este de Canadá, la cual duró varias horas. Como consecuencia de este incidente, algunos grupos interconectados deciden formar las llamadas Agencias de Coordinación, las cuales se

dedican a coordinar los planes de expansión y los procedimientos de operación de numerosos sistemas de potencia y a promover el desarrollo de métodos y criterios de confiabilidad. Así se desarrolla el método de frecuencia y duración hacia fines de los años sesenta.

Mientras en América del norte se perfeccionaban los modelos probabilísticos, en los países europeos se desarrollaban las técnicas de simulación como el método de Monte-Carlo, sin embargo ambas metodologías coinciden en obtener una probabilidad de expectación asociada con la confiabilidad del sistema de potencia que se está analizando.

## CAPITULO I

### GENERALIDADES

#### **1.1. Confiabilidad.**

Se dice que un sistema es confiable si ha tenido una vida útil superior a un cierto promedio esperado. Las expectativas con que se juzga la confiabilidad de un sistema debe ser ajustada según la eficiencia de la función o trabajo que éste realiza. La confiabilidad se considera alta si repetidamente el sistema ha tenido un rendimiento satisfactorio; y, es considerada baja, cuando tiende a fallar en repetidas ocasiones.

De lo anterior se desprende el hecho de que la confiabilidad es un valor estadístico, y es posible estimar en que medida puede esperarse un desempeño satisfactorio del sistema, o con que frecuencia puede esperarse una falla del mismo. En aplicaciones técnicas, no basta una noción vaga sobre confiabilidad, es necesario asociarla con un valor numérico, esto es,



debe disponerse de procedimientos por los cuales sea factible correlacionarla con una escala numérica, de esta forma se dice que la confiabilidad puede medirse.

Considerando lo anterior podemos definir la confiabilidad en los siguientes términos: Confiabilidad es la probabilidad de que un dispositivo o sistema desarrolle sus funciones adecuadamente, en un período de tiempo indicado.

Cabe destacar el hecho de que la confiabilidad se define en términos del concepto matemático de probabilidad, y además considera un período de tiempo debidamente seleccionado. Este concepto es aplicable sólo a sistemas no reparables.

En el caso de tener sistemas que pueden ser reparados y continuar en servicio una vez superada la falla, la confiabilidad debe ser expresada como una medida diferente a lo analizado anteriormente; surge entonces el concepto de disponibilidad y, se lo define de la siguiente manera:

La disponibilidad de un sistema reparable es la proporción de tiempo que ha funcionado en un período largo de trabajo.

## 1.2. Índices de confiabilidad.

El concepto de índices de confiabilidad tiene como finalidad el facilitar la aplicación de la teoría en la evaluación de la confiabilidad. Estos índices se pueden agrupar en cuatro categorías, a saber: probabilidad, frecuencia, duración, expectación.

Algunos de estos índices se aplican sólo a sistemas reparables y, son cantidades probabilísticas dada la imposibilidad de hacer proyecciones exactas, por cuanto al referirse a eventos futuros sólo podemos hablar de promedios y de posibilidades de cada alternativa.

Se mencionó antes que para sistemas reparables se aplica el término disponibilidad, sin embargo es costumbre hablar de confiabilidad en sistemas de potencia a pesar de ser reparables por naturaleza.

La confiabilidad en sistemas de suministro de electricidad se ha definido como la probabilidad de que los usuarios dispongan de un servicio continuo de calidad satisfactoria. La calidad del servicio se refiere a la frecuencia y el voltaje que suministra el sistema, éstos deben permanecer dentro de ciertas tolerancias permisibles.



Los índices de confiabilidad más utilizados en la evaluación de sistemas de potencia son los siguientes:

Probabilidad de pérdida de carga (LOLP).

Indica la posibilidad de que la carga del sistema supere la capacidad de generación disponible, asumiendo que el pico de carga en cada día permanece durante todo el día.

Índice de interrupción de carga.

Señala la cantidad promedio de carga interrumpida por unidad de carga servida.

Índice de frecuencia de interrupción.

Señala el número promedio de interrupciones experimentadas por los usuarios en la unidad de tiempo.

Índice de duración de interrupción.

Indica la duración promedio de interrupciones durante un período específico de tiempo.

## CAPITULO II

### EL MODELO DE MARKOV

#### 2.1.Descripción.

El modelo de Markov es un procedimiento sencillo que por sus características es fácil de aplicar en muchos sistemas reparables constituidos por varios componentes. Para desarrollar el modelo de Markov se introduce el concepto de estados del sistema; cada uno de estos estados corresponde a una configuración en particular de la condición de falla o disponibilidad de los componentes del sistema.

Generalmente se designa cada estado con un código numérico, siendo lo usual utilizar un código binario que corresponda a la condición de falla o disponibilidad de cada uno de los componentes. Para facilitar la notación se convierte el código binario en su equivalente decimal como se muestra en la figura (2.1).

El modelo requiere de dos datos para cada componente: La tasa de fallas, la cual indica el promedio de fallas que se esperan para un período de tiempo determinado de operación; y, la tasa de reparaciones, la cual indica el promedio de reparaciones que es posible llevar a cabo en un determinado período de operación. A fin de facilitar la notación, se utilizan respectivamente los símbolos (L-) y (L+) con un subíndice que representa al componente al cual se hallan vinculadas.

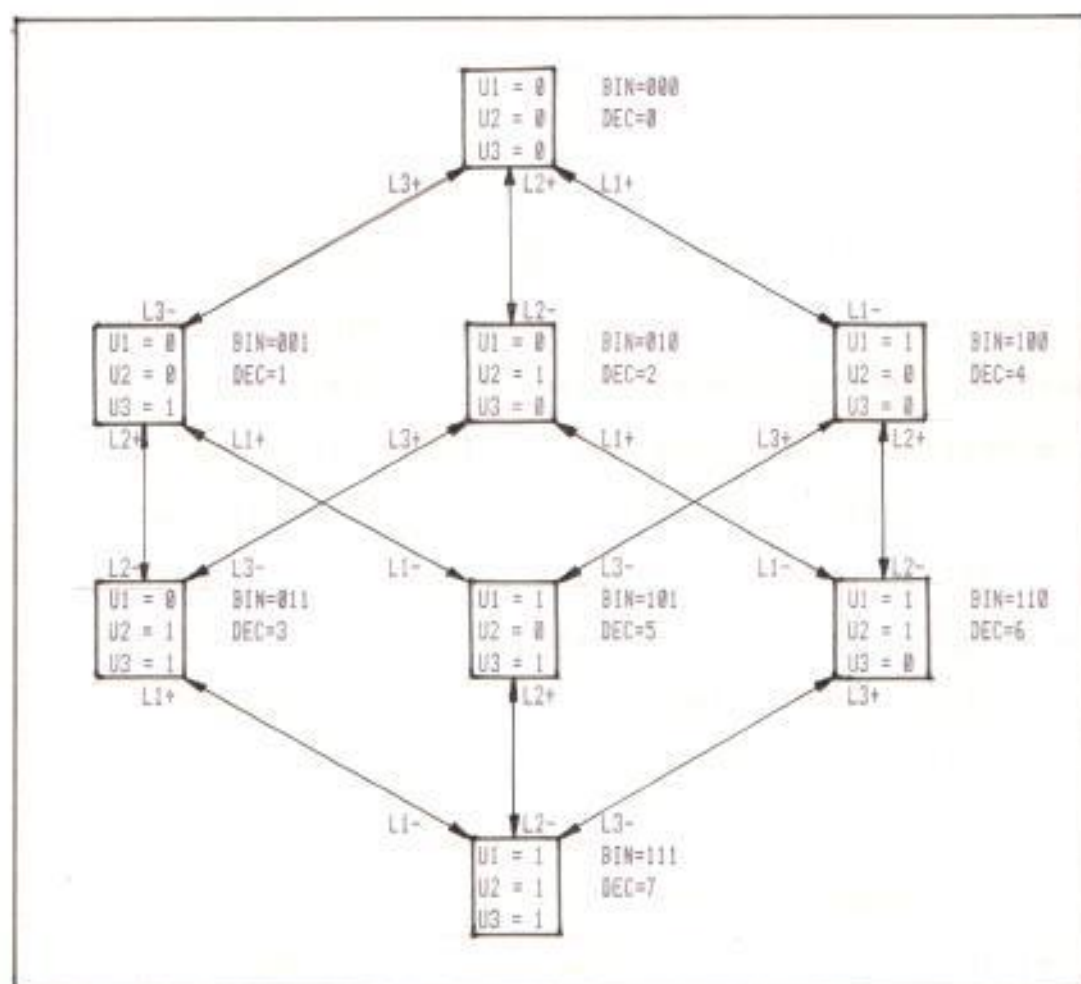


Figura 2.1. Diagrama de estados para sistema de tres componentes ( 0=Disponible - 1=Falla )

- b ) Sólo puede fallar o entrar en servicio un componente a la vez, es decir, se descarta la transición simultánea de dos o más unidades y por consiguiente, no existe nexo entre dos estados que se diferencien por la condición de más de un componente.
  
- c ) Se espera que un componente reparado sea tan confiable como un componente nuevo.
  
- d ) Cada componente puede encontrarse sólo en una de las dos condiciones ya sea falla ó disponibilidad y su condición es independiente de la falla ó disponibilidad de los demás componentes del sistema.

### 2.3.- Aplicación como modelo de generación.

El modelo de Markov se ajusta muy adecuadamente a las necesidades de un sistema de potencia para plantear y resolver el modelo de generación. Todo sistema de potencia está constituido por barras de generación y de carga interconectadas mediante líneas de transmisión, las cuales se asume que tienen capacidad infinita y confiabilidad absoluta y por lo tanto, no son incluidas en la evaluación.



Así representamos todo el sistema de generación como una barra única donde convergen todas las unidades de generación y las cargas del sistema. Cada unidad de generación se considera como un componente del sistema de generación y, dado que cada unidad posee una capacidad nominal, entonces cada estado del sistema representa una determinada capacidad disponible. Se agrupan los estados que representan igual capacidad de generación, aplicando las siguientes reglas:

- a ) La capacidad del estado agrupado es igual a cualquiera de los estados que se agrupan.
- b ) La probabilidad asignada al estado agrupado es igual a la suma de las probabilidades individuales de los estados que se agrupan.
- c ) La tasa de transición equivalente es un promedio ponderado de las tasas de los estados que se agrupan.

Para ilustrar lo anterior recurrimos a la figura (2.2). Aplicando las fórmulas siguientes es posible reducir el modelo de generación a un modelo pequeño en el cual los estados representan grupos de igual capacidad, con nueva probabilidad y tasa de transición equivalentes.

son factibles encontrar a medida que el desarrollo avanza. Como ejemplo tomemos un sistema que posee dos componentes como se muestra en la figura (2.3).

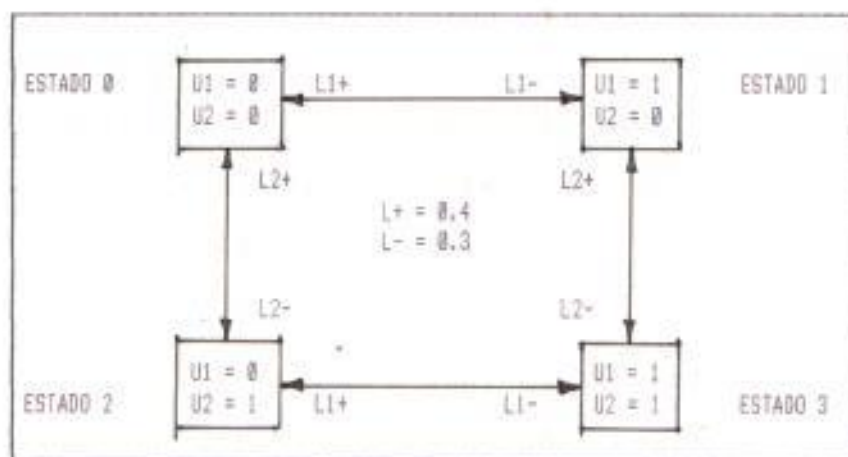


Figura 2.3. Diagrama de estados para sistema de dos componentes

Partiendo del estado cero, en la siguiente etapa el sistema puede encontrarse en cualquiera de los tres estados 0,1,2, cada uno de ellos es punto de partida para la siguiente etapa, obteniéndose un desarrollo en forma de árbol como se muestra en la figura (2.4).

Basados en la tasa de transición es factible asociar un valor de probabilidad para cada camino que conduce de una etapa a otra. La suma de probabilidades de todos los estados en cada etapa es siempre igual a uno.

La probabilidad para cada estado se evalúa multiplicando la probabilidad del estado anterior del cual proviene por el valor probabilístico asignado al camino que los une.

Por ejemplo, refiriéndonos a la misma figura (2.4), en la etapa cero, partimos del estado cero con una probabilidad real de uno dado que es el único estado de esa etapa.

Al pasar a la etapa uno, el sistema puede hallarse en cualquiera de los estados cero, uno, dos, y la probabilidad de que en la etapa uno se de el estado cero será la probabilidad del estado del cual proviene en la etapa anterior (en este caso, el estado cero con probabilidad 1), multiplicada por la probabilidad asignada al camino que los une (0.4 en gráfico ).

En la etapa dos existen ya tres caminos diferentes para llegar al estado cero, entonces, la probabilidad de que se de el estado cero en la segunda etapa será igual a la suma de los resultados obtenidos en cada uno de los tres caminos. Así:

$$P(0) = 0.4 \times 0.4 + 0.4 \times 0.3 + 0.4 \times 0.3 = 0.4$$



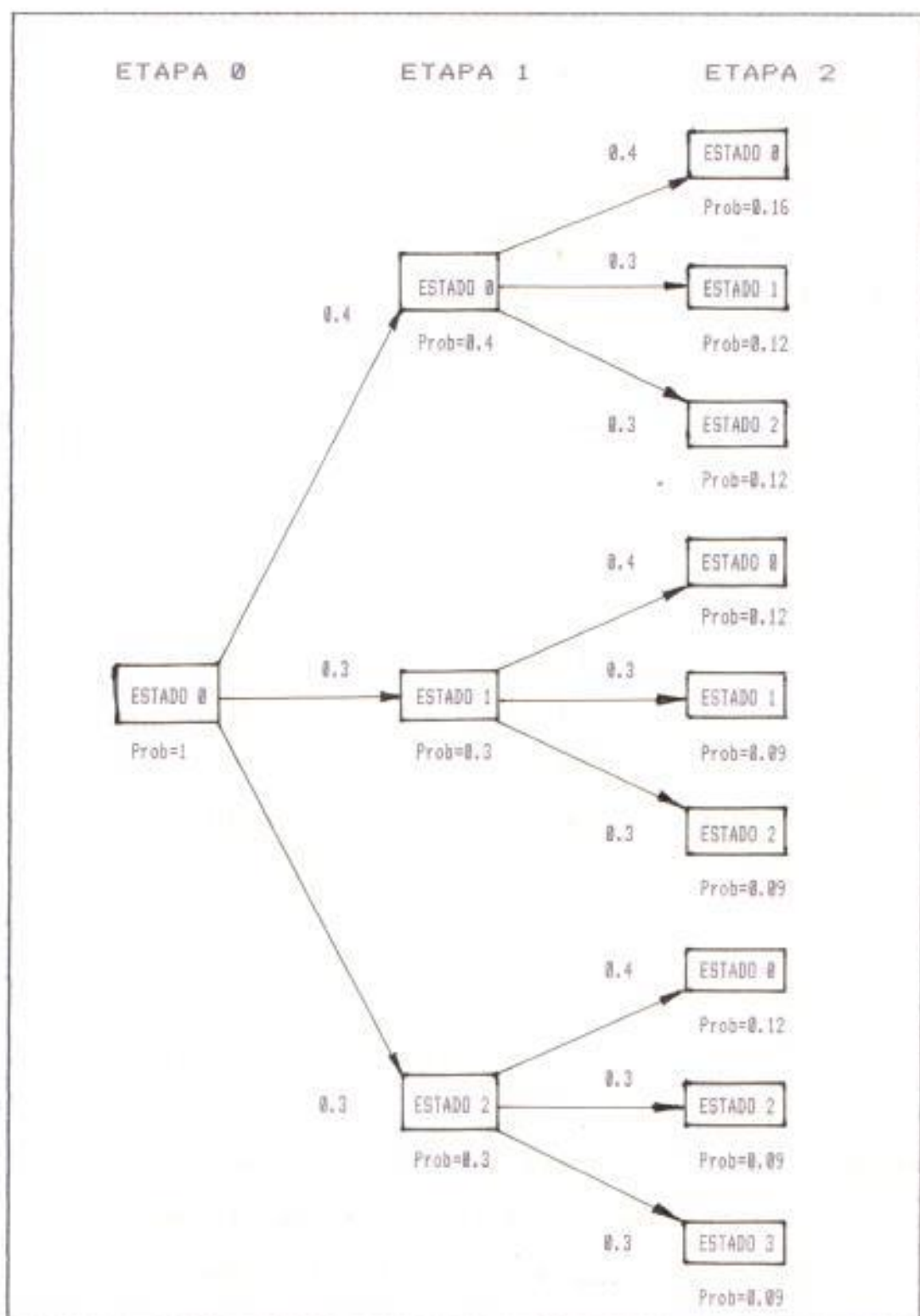


Figura 2.4. Esquema de arbol para sistema de dos componentes

Evaluando para cada estado en cada etapa tenemos la siguiente tabla, en la cual los valores van cambiando etapa a etapa, pero a medida que se avanza en el desarrollo, tienden a estabilizarse obteniéndose probabilidades que convergen hacia los resultados que se obtienen por métodos puramente analíticos.

	ETAPA 0	ETAPA 1	ETAPA 2
ESTADO 0	1	0.4	0.4
ESTADO 1	0	0.3	0.21
ESTADO 2	0	0.3	0.21
ESTADO 3	0	0	0.18

Tabla 2.1. Probabilidad de cada estado en las tres primeras etapas

#### 2.4.2. Matriz de transición

Otro método para resolver el modelo de Markov consiste en aplicar la matriz de transición. Este procedimiento analítico está relacionado con el procedimiento gráfico visto en la sección anterior.

La matriz de transición se obtiene a partir de las tasas de transición de las rutas que conducen de un estado hacia otro.

A cada una de las filas de la matriz asociamos un estado de partida y, en el mismo orden, a cada una de las columnas asociamos un estado de llegada. Así, en la fila uno columna dos, colocaremos la tasa de transición de la ruta que parte del estado uno y llega al estado dos.

En cada fila, la suma de todos los términos que la integran debe ser igual a uno, por consiguiente, en la diagonal principal de la matriz se colocará la diferencia, la cual señala la probabilidad de permanecer en el estado indicado para la siguiente etapa.

Como ejemplo, utilizaremos el mismo sistema de la sección anterior; la matriz de transición (P) es la siguiente.

$$P = \begin{bmatrix} 1-(0.3+0.3) & 0.3 & 0.3 & 0 \\ 0.4 & 1-(0.4+0.3) & 0 & 0.3 \\ 0.4 & 0 & 1-(0.4+0.3) & 0.3 \\ 0 & 0.4 & 0.4 & 1-(0.4+0.4) \end{bmatrix}$$

Simplificando tenemos la matriz de transición con los siguientes valores:

$$P = \begin{bmatrix} 0.4 & 0.3 & 0.3 & 0 \\ 0.4 & 0.3 & 0 & 0.3 \\ 0.4 & 0 & 0.3 & 0.3 \\ 0 & 0.4 & 0.4 & 0.2 \end{bmatrix}$$

Aplicando álgebra matricial es posible determinar la probabilidad de cada estado después de "n" etapas simplemente evaluando  $P^n$ . En la sección anterior obtuvimos para la segunda etapa los siguientes valores:

$$P(0) = 0.4$$

$$P(1) = 0.21$$

$$P(2) = 0.21$$

$$P(3) = 0.18$$

Por medio de la matriz de transición, resolviendo  $P^2$  tendremos:

$$P^2 = \begin{array}{cccc} & (0) & (1) & (2) & (3) \\ \begin{bmatrix} 0.40 & 0.21 & 0.21 & 0.18 \\ 0.28 & 0.33 & 0.24 & 0.15 \\ 0.28 & 0.24 & 0.33 & 0.15 \\ 0.32 & 0.20 & 0.20 & 0.28 \end{bmatrix} & (0) & (1) & (2) & (3) \end{array}$$

Observamos que en la fila cero tenemos los mismos resultados que obtuvimos en la sección anterior, y esto es lógico dado que partimos del estado cero. Si en la sección anterior hubiésemos tomado como punto de partida el estado uno, entonces los resultados obtenidos serían los de la fila uno en la matriz  $P^2$ .

Teóricamente es posible obtener el valor límite para cada estado simplemente al evaluar  $P^n$  para "n" lo suficientemente grande, pero en la práctica es una tarea larga más aún si pensamos resolver un sistema que posea diez o más componentes y, por ende, más de mil estados.

Para obtener el valor estable, se aplica el siguiente criterio: Si el valor límite es utilizado como punto de partida, se obtendrá como resultado el mismo valor límite.

Matemáticamente hablando, este valor es un vector " $\alpha$ " el cual, al ser multiplicado por la matriz de transición, da como resultado nuevamente el vector " $\alpha$ ":

$$\alpha * P = \alpha$$

En el ejemplo:

$$P(0) + P(1) + P(2) + P(3) = 1$$

Simplificando el sistema tenemos:

$$-0.6 P(0) + 0.4 P(1) + 0.2 P(2) = 0$$

$$0.3 P(0) - 0.7 P(1) + 0.4 P(3) = 0$$

$$0.3 P(0) + 0.7 P(2) - 0.4 P(3) = 0$$

$$P(0) + P(1) + P(2) + P(3) = 1$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones tenemos:

$$P(0)=16/49 \quad P(1)=12/49 \quad P(2)=12/49 \quad P(3)=9/49$$

Aplicando la teoría podemos ampliar el análisis hacia la frecuencia y duración con que se presenta cada estado.

$$f(i) = P(i) * L(i)$$

$$d(i) = 1 / L(i)$$

$L(i)$  es la tasa de transición del estado "i"; matemáticamente es igual a la sumatoria de las tasas de transición de todas las rutas que parten de él .



En el ejemplo anterior:

$$L(0) = (L1-) + (L2-) = 0.3 + 0.3 = 0.6$$

$$L(1) = (L1+) + (L2-) = 0.4 + 0.3 = 0.7$$

$$L(2) = (L1-) + (L2+) = 0.3 + 0.4 = 0.7$$

$$L(3) = (L1+) + (L2+) = 0.4 + 0.4 = 0.8$$

$$f(0) = P(0) L(0) = (16/49) 0.6 = 48/245$$

$$f(1) = P(1) L(1) = (12/49) 0.7 = 6/35$$

$$f(2) = P(2) L(2) = (12/49) 0.7 = 6/35$$

$$f(3) = P(3) L(3) = (9/49) 0.8 = 36/245$$

$$d(0) = 1 / L(0) = 1 / 0.6 = 1.6667$$

$$d(1) = 1 / L(1) = 1 / 0.7 = 1.4285$$

$$d(2) = 1 / L(2) = 1 / 0.7 = 1.4285$$

$$d(3) = 1 / L(3) = 1 / 0.8 = 1.25$$

#### 2.4.3. Balance de frecuencias.

Otro método analítico que facilita la evaluación del modelo de Markov es el denominado "balance de frecuencias".

Este método propone conformar una ecuación de frecuencia para cada estado partiendo del hecho de que la frecuencia con que un sistema entra en un determinado estado es siempre igual a la frecuencia con que el sistema sale de él.



Para un estado "i" que tuviera una tasa equivalente  $L(i)$  y que provenga desde  $m$  estados mediante diferentes tasas  $L(j)$ , entonces la ecuación de frecuencias para el estado "i" sería:

$$P(i) * L(i) = \sum_{j=1}^m P(j) * L(j)$$

En la figura (2.5) se ilustra el sistema descrito anteriormente. Cabe señalar que  $L_i$  es diferente de  $L(i)$ , dado que  $L_i$  es la tasa de transición de la unidad "i", mientras que  $L(i)$  es la suma de las tasas de transición de todas las rutas que salen del estado "i".

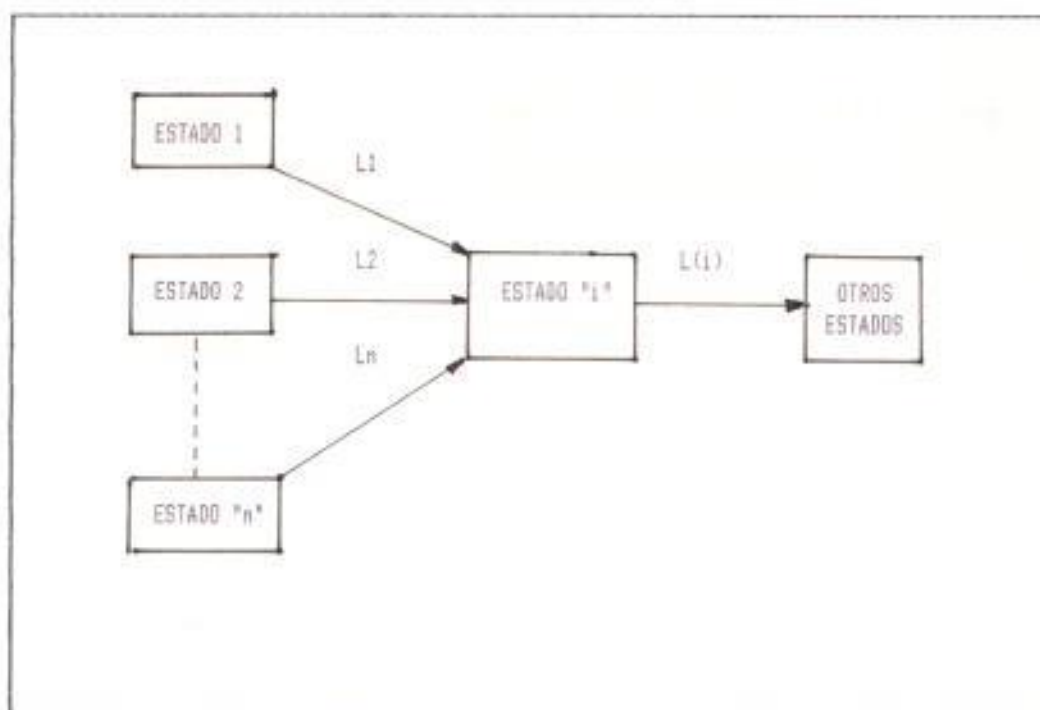


Figura 2.5. Transiciones relacionadas con un estado

Igual que en el método anterior, se obtiene un sistema de ecuaciones linealmente dependiente, el cual se puede resolver utilizando la ecuación adicional:

$$\sum_{i=1}^N P(i) = 1$$

Volviendo sobre el ejemplo anterior, obtenemos el siguiente sistema de ecuaciones:

$$P(0) L(0) = P(1) (L1+) + P(2) (L2+)$$

$$P(1) L(1) = P(0) (L1-) + P(3) (L2+)$$

$$P(2) L(2) = P(0) (L2-) + P(3) (L1+)$$

$$P(3) L(3) = P(1) (L2-) + P(2) (L1-)$$

Cambiando las tasas de transición por su respectivo valor numérico del ejemplo:

$$0.6 P(0) = 0.4 P(1) + 0.4 P(2)$$

$$0.7 P(1) = 0.3 P(0) + 0.4 P(3)$$

$$0.7 P(2) = 0.3 P(0) + 0.4 P(3)$$

$$0.8 P(3) = 0.3 P(1) + 0.3 P(2)$$

Además:

$$P(0) + P(1) + P(2) + P(3) = 1$$

Cambiando una ecuación cualquiera del sistema, por la ecuación adicional se obtienen los siguientes resultados:

$$P(\emptyset) = 16/49 \quad P(1) = 12/49$$

$$P(2) = 12/49 \quad P(3) = 9/49$$

Este resultado es igual al obtenido mediante la matriz de transición, pero no ofrece la ventaja de conocer la probabilidad de cada estado después de un determinado número de intervalos de tiempo como se puede hacer con el método de la matriz de transición; sin embargo, en análisis de confiabilidad no tiene verdadera importancia sino la probabilidad a largo plazo o, lo que es lo mismo, el valor límite.

Este método de balance de frecuencias se torna largo y complicado de resolver a medida que crece el sistema y se aumenta el número de ecuaciones. Deducir las ecuaciones de frecuencia para cada estado puede ser una tarea complicada y de difícil implementación para desarrollar en un computador. Además existe el inconveniente de que el sistema de ecuaciones es del orden " $n \times n$ ", siendo " $n$ " el número de estados que el sistema posee.

Si consideramos el hecho de que el sistema tiene 2 estados, donde "m" es el número de componentes del sistema, entonces es fácil imaginar los problemas que se presentarían al modelar un sistema que tenga 10 componentes; este sistema tendría  $10^{24}$  estados y un sistema de ecuaciones con  $10^{24}$  ecuaciones y  $10^{24}$  variables, lo cual, en la práctica, no sería posible de memorizar en un computador personal, ¡cuanto más difícil un sistema que posea más de 10 componentes!.

Para evitar este problema de almacenamiento se desarrolló un algoritmo especial, el cual se describe en detalle en el capítulo cuatro.

## CAPITULO III

### LA CARGA DEL SISTEMA

#### 3.1. Diferentes modelos de carga.

En el sistema de generación, para facilitar el estudio de la carga, existen diversos modelos. A groso modo estos modelos pueden clasificarse en dos categorías: los modelos discretos y los modelos continuos.

Los modelos continuos son bastante conservadores, esto se debe al período de análisis, el cual, por lo general, suele ser por año, por mes, por semana, o por día, según el propósito del estudio; sea para planificación, en cuyo caso se utilizan períodos largos, o para operación, en cuyo caso se prefieren períodos cortos.

En planificación, el modelo continuo más utilizado es el de la variación de los picos diarios de carga, en este modelo se asume que la carga pico máxima de cada día se



ha mantenido durante las 24 horas del día, además, se ordenan los valores picos de mayor a menor, y como resultado se obtiene una gráfica parecida a la de la figura (3.1).

A menudo se acostumbra linealizar esta gráfica, lo cual facilita los cálculos especialmente cuando se utiliza un computador. Este tipo de modelos se aplican principalmente en la evaluación del LOLP el cual es un índice de confiabilidad bastante conservador, y que suele emplearse como primera aproximación, para establecer una referencia.

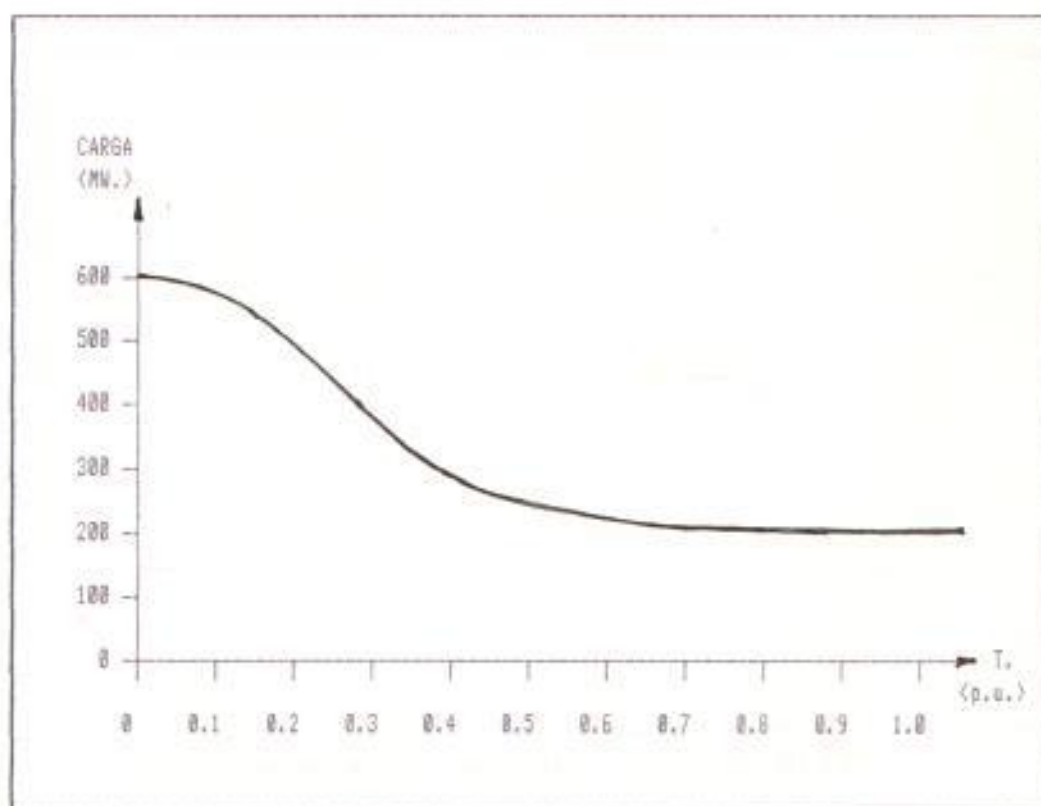


Figura 3.1. Gráfica de la duración de los picos diarios de carga.

Los modelos discretos se prestan más fácilmente a ser representados en un computador digital. En estos modelos se dividen los picos de carga en pasos, obteniéndose así, modelos como el que se muestra en la figura (3.2)

Los cálculos realizados con modelos discretos son más exactos debido a que se semejan más a una gráfica real. La precisión del modelo utilizado depende de la cantidad de niveles empleados al discretizar el esquema real, entre más niveles se utilicen, el modelo sera más real, y los resultados obtenidos serán más certeros.

En el desarrollo de esta tesis empleamos un modelo discreto de dos niveles, el cual describiremos en la siguiente sección de este capítulo.

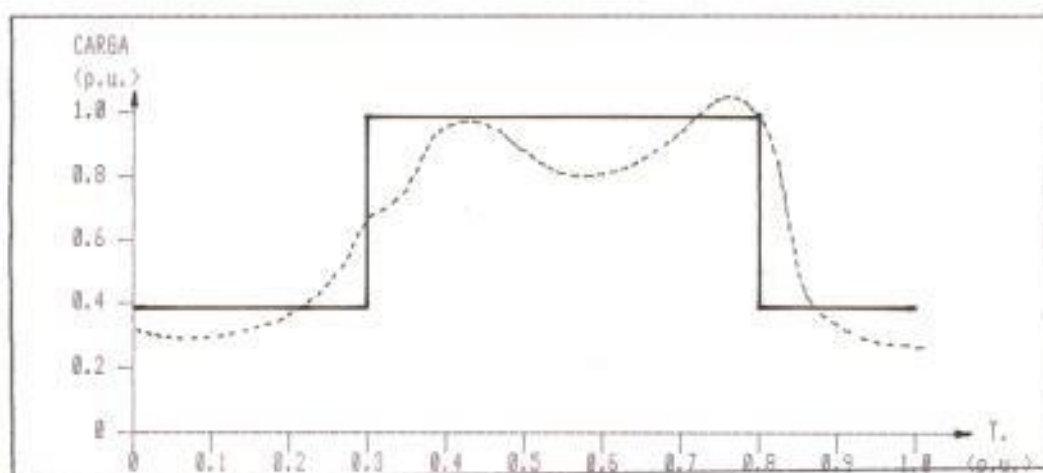


Figura 3.2. Gráfica de una curva diaria de carga discretizada a dos niveles.

### 3.2. Descripción del modelo escogido

Para representar la carga del sistema se ha seleccionado un modelo discreto, en el cual, para cada ciclo de carga se consideran dos niveles: un nivel de carga base y un nivel de carga pico.

En el modelo se admiten un número indefinido de ciclos diferentes, los cuales, se presume que se suceden de manera aleatoria, sin embargo, se conoce con qué frecuencia se presentan todos y cada uno de los ciclos.

Un ciclo se diferencia de otro solamente por el nivel del pico de carga, dado que para el modelo todos los ciclos deben tener el mismo nivel base de carga y, la duración del pico debe ser la misma para todos los ciclos que intervienen en el modelo.

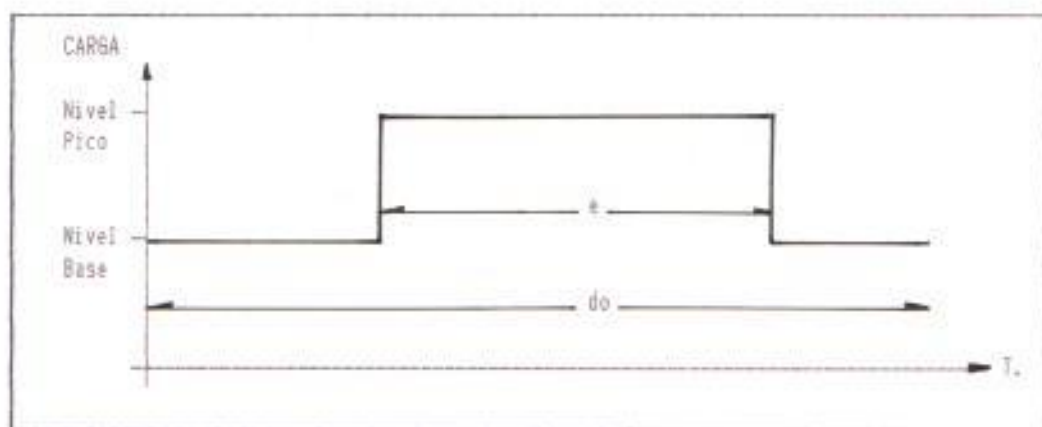


Figura 3.3. Estructura de un ciclo de carga de dos niveles.

Considerando lo anterior y, considerando además que cada estado del modelo representa un nivel diferente de carga, entonces podemos decir que el número de estados será igual al número de ciclos más un estado que represente al nivel base.

De manera general, un ciclo de carga se representa como en la figura (3.3), en todo caso, siempre el comportamiento real de los ciclos de carga será de manera tal que un pico de carga siempre seguirá a un nivel base, y un nivel base siempre seguirá a un nivel pico de carga, como se muestra en la figura (3.4).

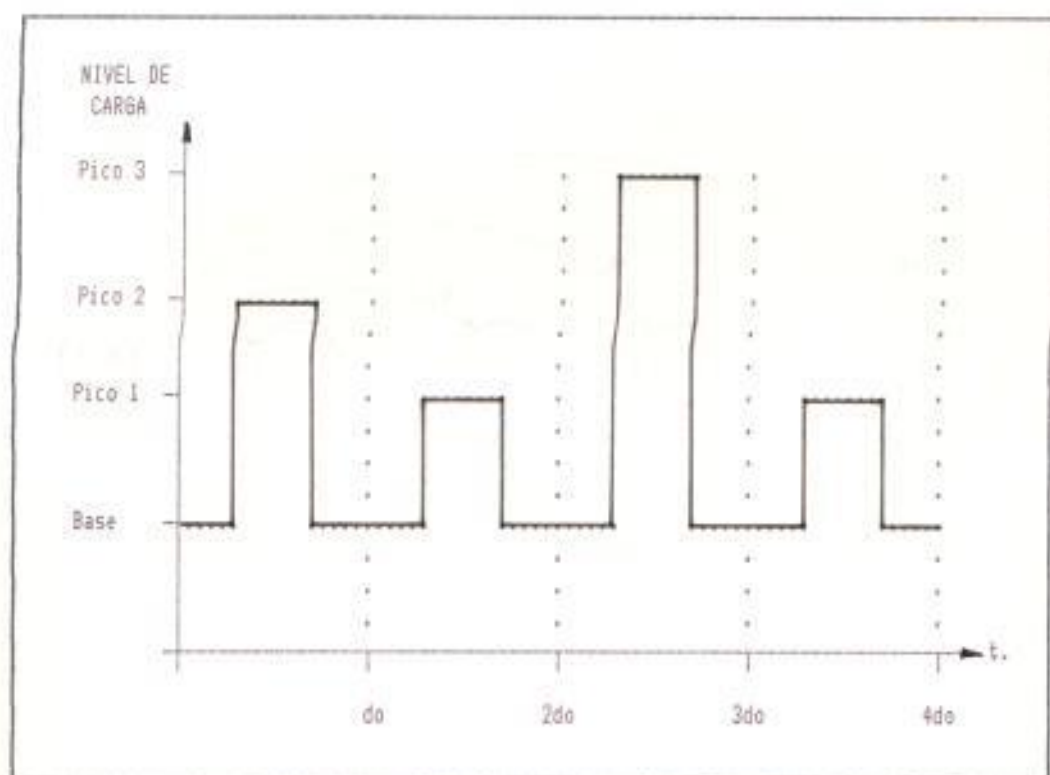


Figura 3.4. Sucesión aleatoria de ciclos de carga.

Debido a este comportamiento, todos los estados que representen a un nivel de pico, sóloamente pueden conectarse con el estado que representa al nivel base, dado que de él provienen y, hacia él convergen.

El nivel base lo codificaremos como nivel  $L_0$ , cada uno de los niveles de pico los codificaremos como nivel  $L_i$ , así, representamos el modelo de carga como se muestra en la figura (3.5)

Las fórmulas y el método para resolver este modelo de carga serán motivo de discusión del capítulo IV.

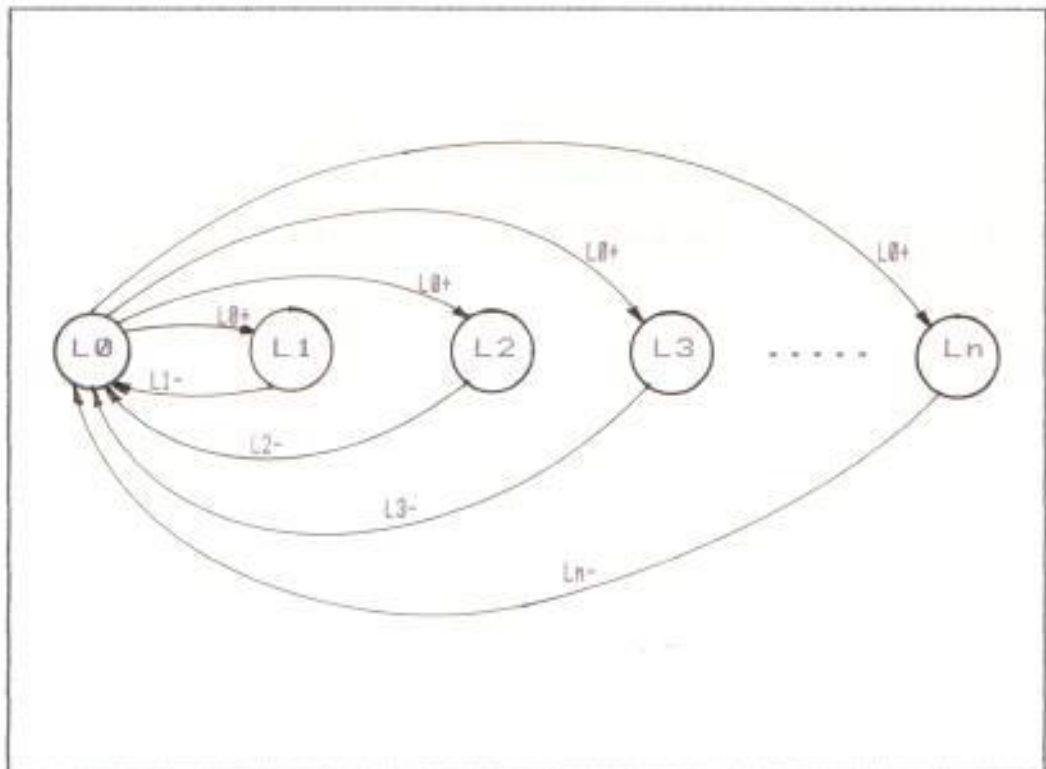


Figura 3.5. Representación gráfica del modelo de carga.



## CAPITULO IV

### DESARROLLO DEL MODELO

#### 4.1. Desarrollo del modelo de generación.

Como se explicó en el capítulo II, fué necesario desarrollar un algoritmo especial para implementarlo en el programa a fin de aprovechar de la mejor manera posible la memoria disponible en el computador.

Se empezó por dividir el problema en partes de modo que cada una de las partes se evalua independientemente y con relativa velocidad, para luego fusionar esas partes y conformar el modelo completo. Para el desarrollo del modelo, a estas partes se las llamó niveles y corresponden a una línea de datos de unidades de iguales características.

Para evaluar los estados de un nivel, calculamos la probabilidad la capacidad y las tasas de transición

utilizando el método de balance de frecuencias, que fue discutido ampliamente en el capítulo II. Con el propósito de obtener una rutina generalizada aplicamos la teoría a un sistema ficticio que tiene una sola unidad, y por ende, dos estados. El diagrama de estados para este sistema sería el de la figura (4.1)

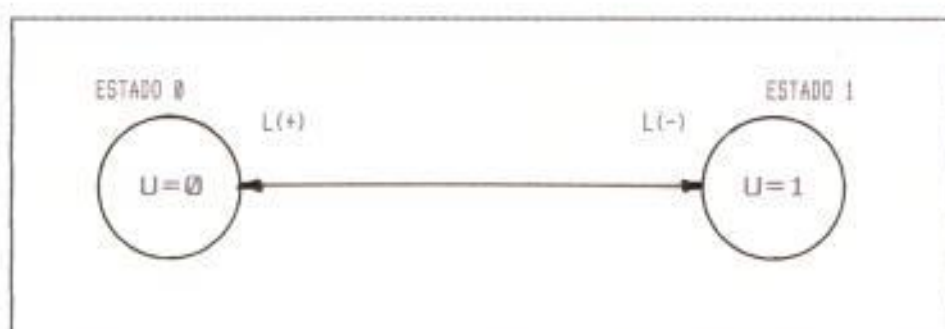


Figura 4.1. Diagrama de estados para sistema de una unidad

Para obtener el valor de la capacidad y las tasas de transición, aplicamos las fórmulas siguientes:

$$C(0) = MW. \text{ de cada unidad del nivel.}$$

$$C(1) = 0$$

$$L(+) = L(+) \text{ de cada unidad del nivel.}$$

$$L(-) = L(-) \text{ de cada unidad del nivel.}$$

Al aplicar la teoría, obtenemos el siguiente sistema de ecuaciones:

$$P(0) \times L(-) = P(1) \times L(+)$$

$$P(0) + P(1) = 1$$

Resolviendo:

$$P(0) = L(+)/ ( L(+) + L(-) ) \quad (4.1)$$

$$P(1) = 1 - P(0) \quad (4.2)$$

Luego se expande el esquema hasta completar el número de unidades que tiene el nivel, para esto se emplean fórmulas de análisis combinatorio, especificante las relacionadas con la distribución binomial, obteniendo el siguiente grupo de ecuaciones:

$$C_j = n \times C(0) \quad (4.3)$$

$$P_j = C \times P(0) \times P(1) \quad (4.4)$$

$$L_j(+)= n \times L(+)\quad (4.5)$$

$$L_j(-)= (N-n) \times L(-)\quad (4.6)$$

Donde:

$C_j$  es la capacidad del estado  $j$ .

$P_j$  es la probabilidad del estado  $j$ .

$L_j(+)$  es la tasa de transición positiva.

$L_j(-)$  es la tasa de transición negativa.

$N$  es la cantidad de unidades del nivel.

$n$  es la cantidad de unidades disponibles.

Luego se fusionan los valores de un nivel con otro, y se procede a realizar un ordenamiento de los estados que se generan a fin de obtener otra tabla de valores los cuales se fusionarán con la tabla del nivel siguiente hasta terminar por configurar todos los estados del modelo aplicando las siguientes ecuaciones.

$$C_{ij} = C_i + C_j \quad (4.7)$$

$$P_{ij} = P_i * P_j \quad (4.8)$$

$$L_{ij}(+) = L_i(+) + L_j(+) \quad (4.9)$$

$$L_{ij}(-) = L_i(-) + L_j(-) \quad (4.10)$$

Para cada estado es necesario almacenar cuatro variables: la capacidad disponible del sistema, la probabilidad de que dicho estado se presente, la tasa de transición hacia estados de capacidad superior (L+) y, la tasa de transición hacia estados de capacidad inferior (L-). Estos datos se tabulan en un cuadro titulado "Modelo sintetizado de generación", y se archivan como primera parte del reporte final.

## 4.2. Algoritmo de solución del modelo de generación

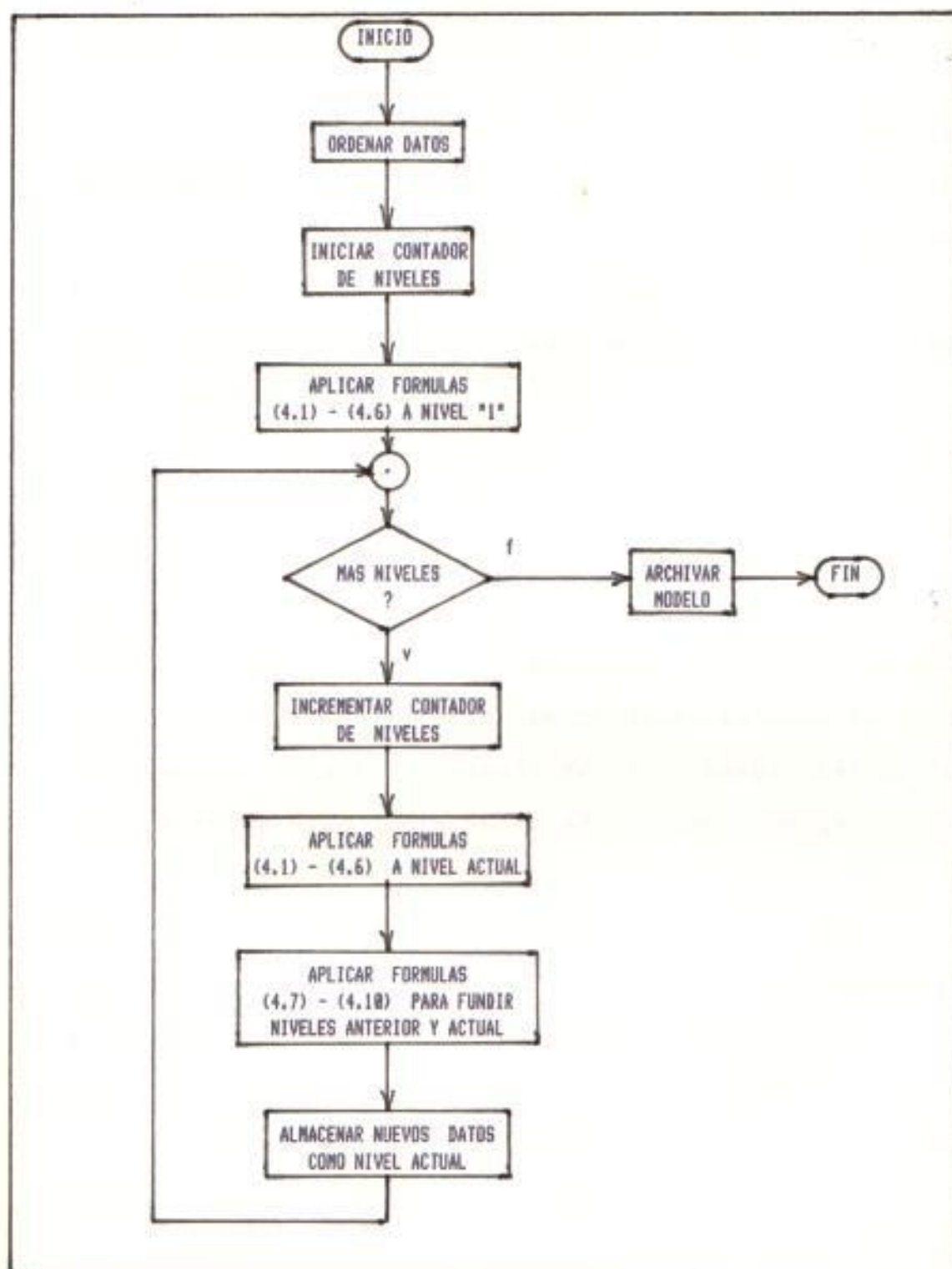


FIGURA 4.2 . DIAGRAMA DE FLUJO PARA ALGORITMO DE SOLUCION DEL MODELO DE GENERACION.



#### 4.3. Desarrollo del modelo de carga.

En el capítulo anterior se detalló ampliamente la manera de representar la carga en un sistema orientado hacia la determinación de la frecuencia y duración de los estados de falla del sistema. En esta sección describiremos el procedimiento empleado para resolver el modelo de carga seleccionado.

A diferencia del modelo de generación, en el modelo de carga se tienen pocos estados, y siempre es posible evaluar para todas las condiciones de carga. Para cada estado se requieren cuatro cálculos: los MW. de carga, la probabilidad de que se presente dicho estado, la tasa de transición hacia un estado de mayor carga ( $L+$ ) y, la tasa de transición hacia un estado de menor carga ( $L-$ ).

Basándonos en lo establecido en el capítulo anterior, los cálculos para el nivel de carga base son diferentes a los cálculos para los niveles de carga pico, por tal razón se evalúa por separado. En la figura (3.2) se ilustró detalladamente la estructura de un ciclo de carga, y quedó establecido, además, que para el mismo modelo, todos los ciclos de carga deben estructurarse de manera similar (ver figura 3.2).

Con este antecedente se puede deducir las fórmulas que se requieren para resolver el estado de carga base:

$$Cc(\emptyset) = \text{MW. de carga base} \quad (4.11)$$

$$Pc(\emptyset) = 1 - e \quad (4.12)$$

$$L(+)= = 1/((1-e)*do) \quad (4.13)$$

$$L(-) = \emptyset \quad (4.14)$$

En los cálculos de los estados de carga pico se hace necesario incluir la frecuencia con que se presenta cada estado, este valor es parte de los datos que necesita el programa. Las fórmulas requeridas son las siguientes:

$$Cc(i) = \text{MW. de carga pico} \quad (4.15)$$

$$Pc(i) = \text{frecuencia} * e \quad (4.16)$$

$$L(+)= = \emptyset \quad (4.17)$$

$$L(-) = 1/(e*do) \quad (4.18)$$

Una vez que se han calculado todas las variables para todos los estados, se hace necesario reducir el modelo agrupando los estados que presentan igual nivel de carga, luego ordenarlos de menor a mayor de acuerdo al nivel de carga que representan. Estos datos se tabulan en un cuadro titulado "Modelo sintetizado de carga", y se archivan como segunda parte del reporte final.

## 4.4. Algoritmo de solución del modelo de carga.

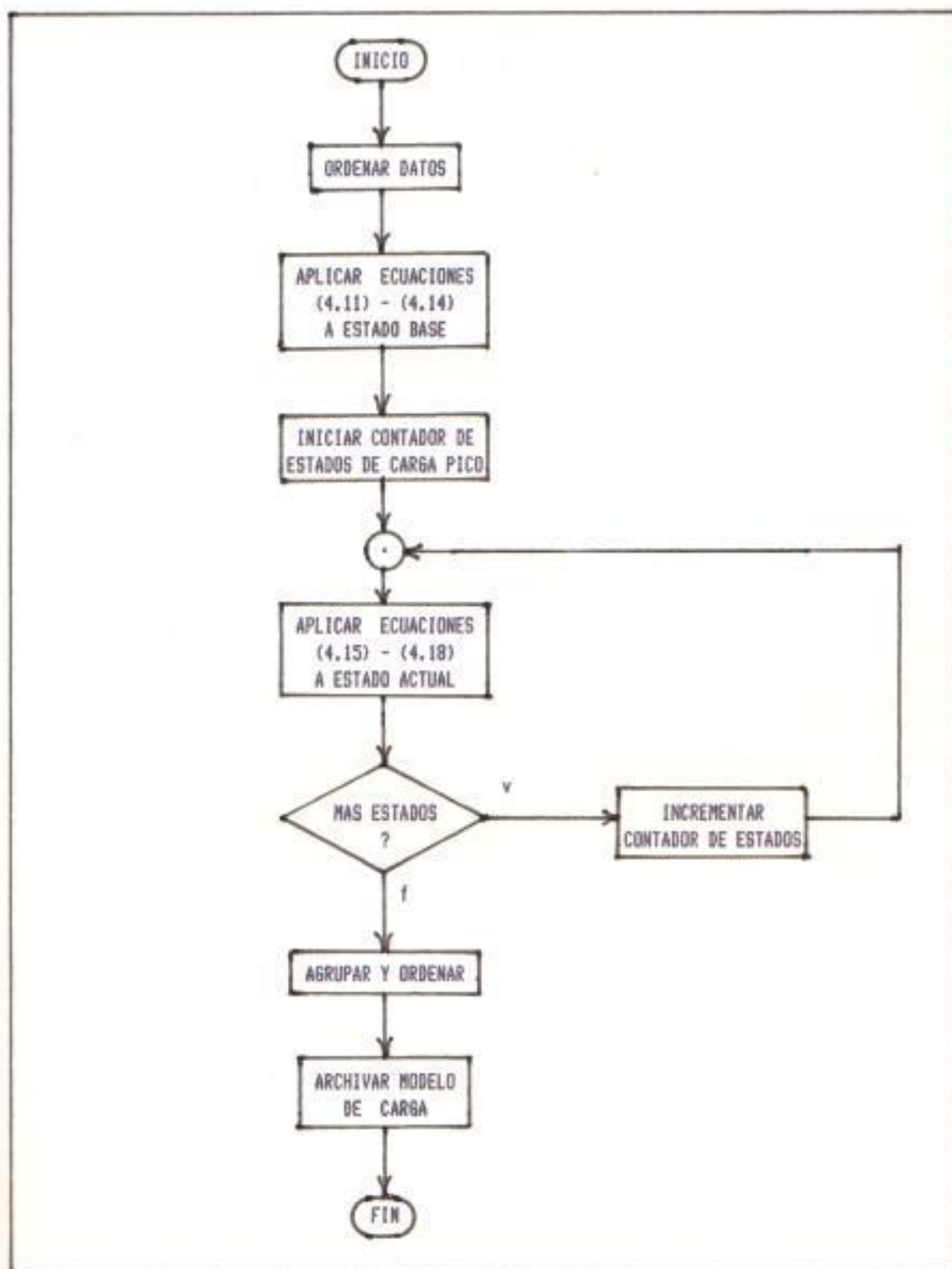


FIGURA 4.3. Diagrama de flujo para algoritmo de solución del modelo de carga.

## CAPITULO V

### INDICES DE FRECUENCIA Y DURACION

#### 5.1. Introducción

En el capítulo I mencionamos algunos índices de confiabilidad que suelen utilizarse en la planificación de sistemas de potencia. La mayoría de estos índices sólo dan una idea de la probabilidad de que el sistema eléctrico experimente algún tipo de falla que le impida servir a todos los usuarios en un momento dado. Tal es el caso del L.O.L.P. que nos entrega un porcentaje del tiempo en el cual es muy probable que parte o la totalidad de la carga del sistema se quede sin suministro de energía.

Cuando se utilizan índices de frecuencia y duración, además de la probabilidad de falla, se obtiene una idea de la frecuencia con la cual dicha falla se presenta y, un promedio del tiempo de duración que tendría.

El método de frecuencia y duración es bastante flexible y permite realizar un análisis más detallado en el estudio de la confiabilidad de los sistemas de generación de electricidad.

## 5.2. Método de evaluación

Como se indicó en el capítulo I, la confiabilidad de un sistema de suministro de energía equivale a la probabilidad de que todos los usuarios dispongan de un servicio continuo de calidad satisfactoria. Esto obliga a desarrollar un método de evaluación global para todo el sistema de potencia, es decir que el análisis debe realizarse de tal manera que todos los estados tanto del modelo de carga como de generación intervengan simultáneamente.

La mejor alternativa para lograr este objetivo es confrontando los modelos de carga y generación y obtener un nuevo modelo en el cual todos los estados representan un margen de generación que será positivo cuando la generación supere a la carga del sistema, será negativo cuando la carga supere a la generación del sistema y, será cero cuando la carga y la generación del sistema sean iguales.



Los márgenes de generación se obtienen restando los MW. de carga de los MW. de generación. La probabilidad asociada con cada margen de generación se obtiene multiplicando las probabilidades individuales de los correspondientes estados de carga y generación.

Las respectivas tasas de transición se evalúan sumando las tasas de los estados correspondientes de carga y generación.

El siguiente grupo de ecuaciones se aplican para obtener los parámetros de la convolución de los modelos de carga y generación.

$$MRGi = MWGj - MWck \quad (5.1)$$

$$PMGi = PEGj * PEck \quad (5.2)$$

$$L(+)_i = LG(+)_j + LC(-)_k \quad (5.3)$$

$$L(-)_i = LG(-)_j + LC(+)_k \quad (5.4)$$

Donde:

MRGi = Margen de generación estado i

PMGi = Probabilidad individual de MRGi

L(+)= Tasa de transición a estados de mayor margen

L(-)= Tasa de transición a estados de menor margen

Basados en la definición de confiabilidad para sistemas de potencia, podemos afirmar que los únicos estados que representarían una discontinuidad en el servicio, son aquellos estados que tienen un margen de generación negativo.

Considerando que, para que todo el sistema eléctrico sea declarado en falla basta que al menos un usuario deje de recibir servicio, se hace necesario acumular las probabilidades individuales de los diferentes márgenes de generación para centrar el análisis en los estados acumulados con margen de generación negativo.

$$PAMGi = PMGi \quad (5.5)$$

$$Leqv = L(+)_i - L(-)_i \quad (5.6)$$

$$Freci = Freci + PMGi * Leqv \quad (5.7)$$

$$Durci = PAMGi / Freci \quad (5.8)$$

Donde:

PAMGi = Probabilidad acumulada de MRGi

L(+) = Tasa de transición a estados de mayor margen

L(-) = Tasa de transición a estados de menor margen

Leqv = Tasa de transición equivalente

Freci = Frecuencia de MRGi

Durci = Duración de MRGi

## 5.3. Algoritmo de evaluación

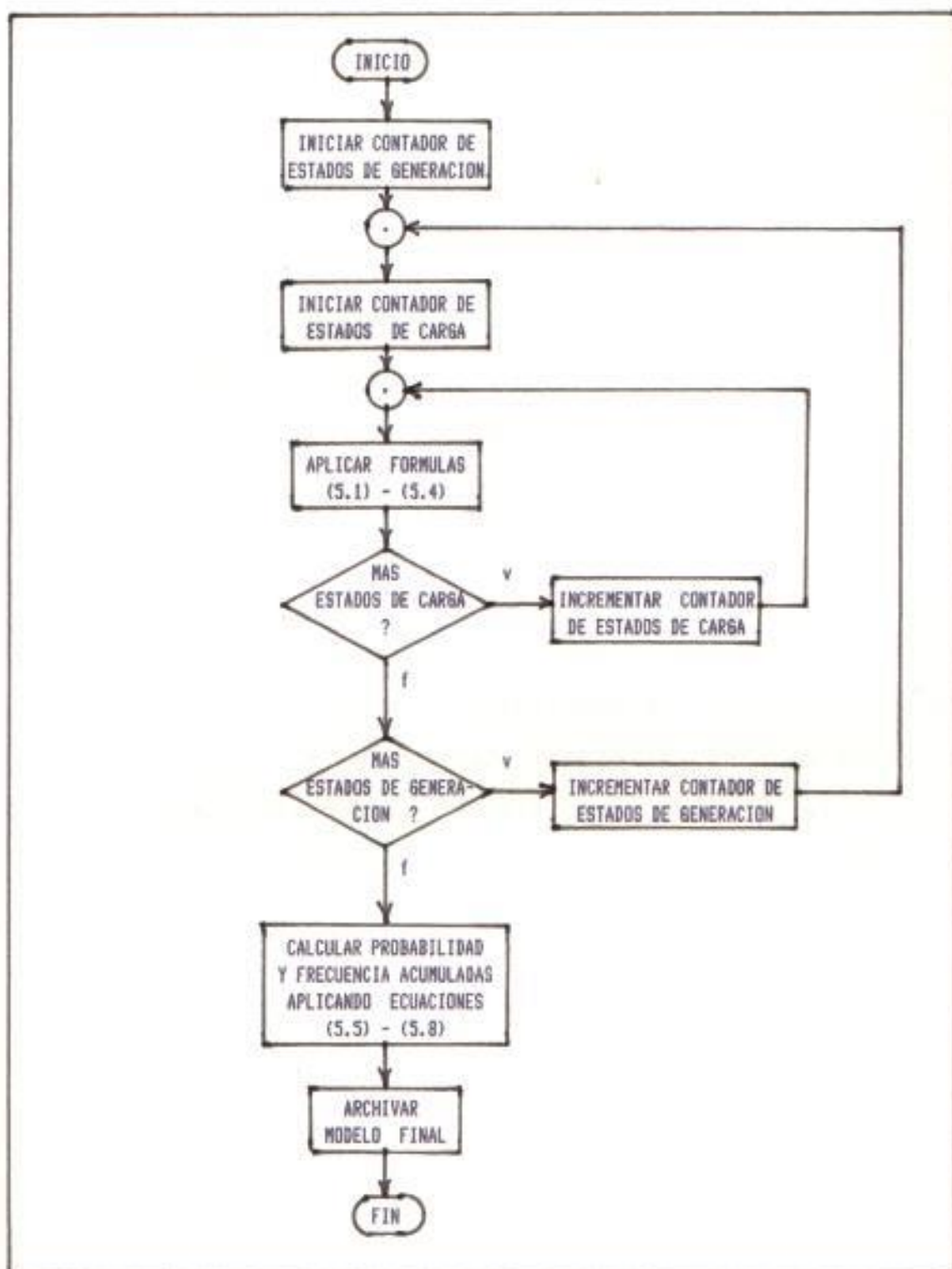


FIGURA 5.1. Diagrama de flujo para la convolución de los modelos de carga y generación.

#### 5.4. Confiabilidad en términos de frecuencia y duración

Expresar la confiabilidad de un sistema cualquiera, en términos de frecuencia y duración, permite considerar más elementos de juicio al comparar la eficiencia de diferentes alternativas o proyectos.

Conforme al análisis efectuado en los capítulos anteriores, cuando hablamos de confiabilidad nos referimos a un valor estadístico que corresponde a la probabilidad de encontrar un sistema en un estado de falla. Numéricamente hablando, es posible que dos sistemas de potencia distintos, tengan la misma probabilidad de falla, pero al hacer el análisis de frecuencia y duración, encontramos que en uno de ellos es más frecuente el estado de falla pero su duración será menor, en cambio, para el otro sistema, el estado de falla se presentará con menor frecuencia pero con una duración mayor.

La diferencia radica en el valor de las tasas de transición las cuales son parámetros inherentes a las unidades que conforman el sistema de generación y, deben ser tomadas en cuenta a la hora de analizar las alternativas para una posible expansión del sistema eléctrico.

Al evaluar la frecuencia y duración de los estados de falla de un sistema de potencia no nos interesa determinar la ocurrencia de un margen específico de carga, sino más bien de un grupo de estados cuyo margen de generación sea negativo. En la práctica empezamos desde el estado cuyo margen es menor o más negativo, calculando la frecuencia y duración de este estado utilizando las ecuaciones (5.7) y (5.8) tomando en cuenta que al no haber estados inferiores entonces la frecuencia de partida será cero.

Aplicando las mismas ecuaciones avanzamos en el modelo acumulando los resultados de probabilidad y frecuencia, para lo cual necesitamos la tasa de transición equivalente la cual se obtiene mediante la ecuación (5.6) en base a las tasas de transición propias del estado que está siendo analizado, por consecuencia, no importa a que estado se dirige o de cual estado proviene, lo que interesa es la diferencia entre la tasa de transición hacia los estados de mayor margen de generación y la tasa de transición hacia los estados de menor margen de generación.



## CAPITULO VI

### PROGRAMACION

#### 6.1. Estructura del programa.

El programa ha sido implementado en BASIC por las facilidades que este lenguaje brinda tanto en el manejo de archivos como en el manejo de errores.

Desde el punto de vista estructural, el programa está dividido en dos partes: Un programa principal, el cual se encarga de la edición, mantenimiento, revisión y listado de los archivos; y un programa especializado para la evaluación matemática de los modelos tanto de generación como de carga.

La razón fundamental para esta división del programa es la de aprovechar mejor la memoria disponible y permitir la evaluación de modelos que presenten hasta mil trescientos cincuenta estados.

El programa principal consta de tres rutinas: Una rutina preparada para el manejo de archivos (listar en pantalla, en papel, borrar, presentar índice, etc.). Otra rutina preparada para el ingreso de datos, creación de archivos de datos y corrección de archivos ya existentes.

Otra rutina orientada hacia la ejecución del programa de evaluación, cuya función consiste en solicitar los nombres de los archivos que contienen los datos, verificar si esos archivos existen en el índice, solicitar un nombre para el archivo en el cual se almacenarán los resultados y verificar si existe en el índice; si todo es correcto se encadenará el subprograma de evaluación.

A fin de desarrollar estas rutinas, el programa principal necesita de varias subrutinas para realizar tareas específicas tales como cargar el archivo índice, comprobar si un archivo consta en el índice, cargar archivos de datos, listar datos en pantalla, listar datos en papel, grabar datos en un archivo, actualizar el archivo índice, borrar archivos de datos, tomar los datos desde el teclado utilizando una rutina editor, controlar el flujo del programa cuando se han detectado errores, etc.

El programa de evaluación está dividido en cuatro partes las cuales corresponden al orden lógico en que progresa el desarrollo del programa, y está basado en el análisis y las fórmulas presentadas en los capítulos IV y V.

## 6.2. Archivos auxiliares.

Para controlar la existencia de archivos de datos o de resultados, y además, conservar una nota para recordar la naturaleza de los datos registrados en cada archivo, se optó por llevar un archivo auxiliar para cada grupo de datos. En general el archivo se denomina "INDEX" y tiene una extensión "GEN" si guarda datos de generación, "CAR" si almacena datos de carga y "RTD" si es para resultados, las cuales son añadidas automáticamente por la rutina correspondiente y si en algún caso no existiera alguno de estos archivos, el programa los crea y los utiliza a medida que necesite referirse a ellos.

Otros archivos auxiliares son aquellos que contienen los datos de carga, generación, o los resultados de una evaluación. Estos archivos pueden tener cualquier nombre que les de el usuario y el programa le añadirá una extensión "CAR", "GEN" o, "RTD" según se indicó anteriormente.

Existe otro archivo denominado "EVCON.DAT", el cual contiene el diseño para la pantalla de presentación y se carga automáticamente cada vez que se reinicia el programa principal.

### 6.3. Interpretación de resultados.

Los resultados de la evaluación son almacenados en disco en tres archivos:

El primero almacena los resultados del modelo de generación sintetizado. Cada registro consta de cuatro datos, a saber: la capacidad de generación, la probabilidad correspondiente y, las tasas de transición  $L(+)$  y  $L(-)$  en ese orden.

Cuando se solicita el listado de este archivo mediante el programa principal, se realizan cálculos adicionales para obtener la probabilidad acumulada y la frecuencia de cada estado del modelo de generación.

El segundo archivo guarda los resultados del modelo de carga sinterizado. Cada registro consta de cuatro datos: la carga del sistema, la probabilidad, y las tasas de transición  $L(+)$  y  $L(-)$  en ese orden.

El tercer archivo registra los resultados de la convolución de los modelos de generación y carga más los resultados de la acumulación del cuadro de convolución. Cada registro contiene cuatro datos: margen de generación, probabilidad individual, probabilidad acumulada y frecuencia.

Cuando se solicita el listado de estos datos, se realizan dos cálculos: uno, para completar el cuadro, determina la duración de cada uno de los estados acumulados; y otro, para determinar cual de los estados de este reporte final corresponde al primer margen de generación negativo, el cual se presenta aparte (cuando existe) en un formato diferente bajo el título de síntesis final.

Para la síntesis final se calcula la indisponibilidad del sistema en base al cuadro de probabilidad acumulada de los márgenes de generación y se la expresa en términos de días por año.

El índice de frecuencia de interrupción se presenta en términos de fallas por año.

El índice de duración de interrupción sigue luego en términos de días por falla.



Cuando el programa no encuentra un estado con margen de generación negativo, se omite la síntesis final. Esto suele suceder cuando se ha evaluado el modelo de generación utilizando un factor de aproximación bastante alto, lo cual deja fuera de los cálculos a los estados cuyo margen de generación es negativo dado que son éstos estados los que presentan las probabilidades más bajas. En estos casos debería repetirse el desarrollo del modelo empleando un factor de aproximación más fino.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- 1.- Con los algoritmos desarrollados a lo largo de este trabajo se estructuró el programa "EVCON.BAS" el cual alcanza plenamente el objetivo fundamental de esta tesis.
- 2.- El principal problema en este tipo de programas es la cantidad de memoria requerida, lo cual se superó al implementar los algoritmos descritos en los capítulos IV y V.
- 3.- El segundo problema es la velocidad de evaluación principalmente en el modelo de generación y al ordenar los estados; en este punto también se aprecia la bondad del algoritmo aplicado.
- 4.- Debido a la capacidad del computador el programa limita el modelo final a 1350 estados lo cual puede ser suficiente para modelar sistemas de 60 generadores de capacidades estandarizadas.

- 5.- Es recomendable seleccionar un adecuado factor de aproximación dado que éste es el criterio para descartar los estados de baja probabilidad, en consecuencia influye en la velocidad y precisión de los cálculos.
  
- 6.- Por último, cabe recomendar como tema para otro trabajo, la elaboración de un programa de gráficos que tome como datos los estados del tercer archivo de resultados de diferentes evaluaciones a fin de comparar objetivamente dos o más sistemas de potencia.

## BIBLIOGRAFIA

- 1.- R. BILLINTON, R. ALLAN, Reliability Evaluation of Engineering Systems, Context & Technique, (London: Pitman, 1983), Capítulo 8
- 2.- J. ENDRENYI, Reliability Modeling in Electric Power Systems, (Chichester: John Wiley & Sons, 1978), Capítulo 7.
- 3.- C. SINGH, R. BILLINTON, "A frequency and duration approach to short term reliability evaluation. IEEE. Trans. Power Apparatus and Systems, PAS-92 No. 6, 2073-83, Nov/Dic. (1973)
- 4.- C. SINGH "EVALUACION DE LA CONFIABILIDAD EN SISTEMAS DE POTENCIA", (Seminario, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Escuela Superior Politécnica del Litoral, 1986)