

# Estudio de la confiabilidad funcional de las instalaciones electroenergéticas (1)

\*Ing. Franklin Chinchilla

## 1.— INTRODUCCION

El continuo y acelerado desarrollo de los sistemas de energía, desde el punto de vista de la potencia instalada así como de su estructura y del nivel de consumo, ha motivado que un gran número de especialistas de varios países, se dediquen al estudio de la confiabilidad funcional de estos sistemas.

El desarrollo de industrias con proceso de fabricación continuo requiere, que tanto el sistema electroenergético (el que suministra energía eléctrica), como el equipo usado en los procesos industriales, tengan el mayor grado de confiabilidad posible, obligando de esta manera a los fabricantes de equipo eléctrico-industrial a mejorar y controlar estrictamente la calidad del mismo.

En este trabajo el término confiabilidad se refiere a la probabilidad de que, en cierto intervalo considerado, la instalación o el sistema pueda operar bajo condiciones previstas con anterioridad; así la confiabilidad aparece como una función de probabilidad, teniendo como variable el tiempo y el posible comportamiento de una determinada instalación.

## 2.— GENERALIDADES

La apreciación cuantitativa de la confiabilidad en las instalaciones electroenergéticas comprende dos aspectos primordiales:

- a.— El análisis de la instalación desde el punto de vista de la confiabilidad.
- b.— El modelo matemático utilizado para la apreciación confiable de la instalación.

\* Ing. Eléctrico y Doctor en Centrales Eléctricas. Actualmente profesor del Departamento de Mantenimiento Industrial, ITCR.

(1) Ponencia presentada en el Congreso CONCA XI de la IEEE Guatemala del 9 al 11 de octubre 1980.

El análisis desde el punto de vista de la confiabilidad establece lo siguiente:

- Las condiciones impuestas por el funcionamiento de la instalación, que permitan estimar si el funcionamiento es seguro.
- Otras condiciones impuestas por el funcionamiento de la instalación, tales como reparación, correlación funcional entre sus componentes, condiciones ambientales, del personal de trabajo, etc.
- El intervalo de análisis en el que se dan las condiciones anteriormente citadas.

## 3.— PRINCIPALES INDICADORES DE CONFIABILIDAD

Si el intervalo de cálculo es lo suficientemente grande, como para sobrepasar la duración media de funcionamiento continuo del elemento menos confiable de la instalación, entonces los principales indicadores utilizados en la estimación cuantitativa de la confiabilidad de las instalaciones se pueden calcular en sus límites, representando en este caso lo siguiente:

- La probabilidad de que la instalación se encuentre en buen estado en un momento dado ( $P_s$ ). Este indicador permite comparar diferentes tipos de esquemas o instalaciones desde el punto de vista de su rendimiento.
- El tiempo medio total de funcionamiento normal en el intervalo  $(0, t)$ ,  $(M(T_t))$ . Este representa el criterio de comparación más indicado desde el punto de vista de la confiabilidad.

- El tiempo medio total de interrupción en el intervalo  $(0, t)$ ,  $(M(T_d))$ . Este representa el mejor criterio de comparación de los diferentes tipos de conexiones desde el punto de vista de su rendimiento económico; además permite evaluar los daños y perjuicios ocasionados por el uso de cada opción técnica.
- El número medio total de interrupciones en el intervalo  $(0, t)$ ,  $(M(\bar{V}(t)))$ . Este indicador es necesario para planificar el equipo de repuesto, en especial en el caso de equipo desechable o para establecer un plan de mantenimiento preventivo.
- La probabilidad de funcionamiento continuo en el intervalo  $(t, t + x)$ ,  $(S(x))$  que se usa como el principal criterio para la sustitución del equipo debido al desgaste, y que expresa el grado de desgaste técnico de la instalación.
- La probabilidad de que la instalación funcione en un momento dado "t" o que se encuentre reparada en el momento anterior a  $(t + x)$ , la que se llama también confiabilidad de servicio.

En realidad, una instalación electroenergética, puede pasar por una serie de estados en su funcionamiento, que representan la situación de la instalación en un momento dado, determinada ésta por sus características en conjunto y por el comportamiento de sus componentes.

Es por esto, que uno de los indicadores de confiabilidad básicos es la probabilidad de encontrar la instalación considerada en un determinado estado en un instante dado. La determinación de las probabilidades de estado, constituye el punto de partida en cada uno de los métodos de análisis, pues, con base en éstas y utilizando diversas fórmulas de cálculo, se pueden obtener los otros indicadores que interesen según sea el caso.

Para la determinación de las probabilidades de estados, la información básica general la constituyen los tipos y los parámetros de las distribuciones estadísticas correspondientes a los tiempos de funcionamiento ininterrumpido y de reparación, referente a todos los elementos que constituyen la instalación estudiada. Las principales distribuciones usadas en este tipo de estudio son: exponen-

cial (equipo de baja, media y alta tensión), Beibul (equipo electrónico y de automatización), Beta, Gamma, Poisson (modelación del número de interrupciones en un período dado) etc.

Debido a que en el presente trabajo se estudian instalaciones electro-energéticas de baja, media y alta tensión, se utiliza la distribución exponencial, cuyos parámetros  $\lambda$  y  $\mu$  (intensidad de avería y de reparación respectivamente) se consideran constantes.

#### 4.— METODOS MATEMATICOS UTILIZADOS EN EL ESTUDIO DE LA CONFIABILIDAD

En función de: a— la naturaleza del problema al que se refieren los cálculos de confiabilidad, b— las características técnicas y funcionales de la instalación estudiada y c— sus elementos componentes, se pueden aplicar diversos métodos de estudio, tales como:

- método binomial
- método Monte Carlo
- método de la determinación de la función de confiabilidad.
- métodos basados en los procesos estocásticos
  - de tipo Markov con parámetro continuo
  - de tipo Markov con parámetro discreto
  - de tipo semi-Markov
  - de tipo no-Markoviano

Dado que la metodología y programa del cálculo presentados en este trabajo están basados en los procesos estocásticos de tipo Markov se presenta a continuación una pequeña introducción teórica sobre dichos métodos.

#### 5.— METODOS BASADOS EN LOS PROCESOS ESTOCASTICOS

Estos métodos permiten la determinación de los indicadores de confiabilidad de una instalación electroenergética simulando su comportamiento por medio de un proceso estocástico.

Un proceso estocástico es una familia de variables aleatorias  $(x(t); t \in T)$ , donde  $x(t) = i; t \in T$  y  $i \in I$ , lo que significa que en el instante t, el proceso se encuentra en el estado "i". El conjunto I

representa el total de todos los estados posibles por los que puede pasar el proceso en el transcurso del tiempo.

Si  $T$  es un conjunto discreto ( $T = \mathbb{N}$ ), entonces se dice que, el proceso es estocástico con parámetro discreto. Si  $T$  es un intervalo (o  $t$ ), entonces se tiene un proceso estocástico continuo.

A continuación se presentan algunas consideraciones teóricas sobre los procesos Markov, que son la base de la metodología de cálculo y del programa presentado en este trabajo:

- Los eventos que tienen lugar en el tiempo de funcionamiento de los equipos, no están influenciados por el momento de la producción de aquellos, sino únicamente por la duración de los mismos.
- Para un intervalo muy corto, en la evolución del proceso, no podrá tener lugar más de un solo cambio de estado.
- Las probabilidades de estado se obtienen después de resolver el siguiente sistema de ecuaciones diferenciales lineales:

$$\begin{aligned} \left[ P_i^1(t) \right] &= \left[ P_i(t) \right] \left[ q_{ij} \right] \\ \sum_{i=1}^n P_i(t) &= 1 \end{aligned} \tag{2}$$

donde:

$P_i(t)$  – vector de probabilidades absolutas del proceso.

$q_{ij}$  – matriz de las intensidades de transición.

Los parámetros  $q_{ij}$ ,  $i, j = 1, 2, \dots, m$ , tienen el siguiente significado:

$q_{ij} = \lambda_k$ , si el paso del estado  $i$  al estado  $j$  es debido a la defeción del elemento  $k$ .

$q_{ij} = \mu_k$ , si el paso del estado  $i$  al  $j$  se debe a la finalización de la reparación del elemento  $k$ .

$\lambda_k$  = representa la intensidad de defecto del elemento  $k$ .

$\mu_k$  = representa la intensidad de reparación del elemento  $k$ .

## 5.1 Procesos Markov

Un proceso estocástico, que cumple con la propiedad Markov, es tal que:

$n: n \geq 2$ , o  $t_1 < t_2 \dots t_n$  y  $\forall i: i \geq 1$ , se tiene que:

$$\begin{aligned} P(x(t_n) = i_n / x(t_{n-1}) = i_{n-1} \dots x(t_1) = i_1) &= P(x(t_n) = i_n / x(t_{n-1}) = i_{n-1}) \\ &= P(x(t_n) = i_n / x(t_{n-1}) = i_{n-1}) \end{aligned} \tag{1}$$

En otras palabras, en un proceso Markov, la probabilidad de que el proceso se encuentre en un determinado estado depende únicamente de su estado anterior.

Como hipótesis de cálculo se deben considerar las siguientes:

- Exceptuando las reparaciones planificadas y las situaciones de reserva, la vida útil de los equipos componentes está constituida en forma alterna por períodos de funcionamiento y de paro por averías.
- Para efectos de cálculo se considera que los equipos se encuentran en su período de vida útil.
- La distribución, tanto de los tiempos de funcionamiento como de reparación, referente a equipos componentes de una instalación electroenergética, es exclusivamente de tipo exponencial con parámetro constante.
- Después de terminada una reparación, los equipos recobran en forma integral, todas las propiedades que tenían antes de la avería que condujo a la reparación.

Las consideraciones hechas son válidas, tanto en el caso del uso de los procesos Markov con parámetro discreto, como en el caso en que se usen procesos Markov con parámetro continuo.

La estimación de los parámetros  $\lambda$  y  $\mu$  se hace con base en los datos estadísticos, usando la teoría estimativa de la estadística matemática. Para

este fin se usa el método de la máxima verosimilitud determinándose que:

$$M(T_f) = 1/\lambda$$

$$M(T_d) = 1/\mu$$

**6.- CALCULO DE LOS INDICADORES DE CONFIABILIDAD**

**6.1 Instalaciones compuestas de elementos en serie.**

Si la instalación analizada está compuesta de n elementos en serie, entonces los indicadores de confiabilidad se calculan de la siguiente manera:

- Probabilidad de los estados favorables (funcionamiento de todos los elementos),

$$P_s = 1 / \left[ 1 + \sum_{i=1}^n (\lambda_i / \mu_i) \right]$$

- Probabilidad de los estados desfavorables. (Defección de un elemento);  $P_r = 1 - P_s$
- Duración media total de los estados desfavorables;  $M(\beta(T_p)) = P_r T_p$ , donde  $T_p$  es el tiempo de estudio programado.

- Número medio de estados desfavorables:

$$M(\gamma(T_p)) = P_s \sum_{i=1}^n \lambda_i T_p$$

- Duración media de un estado desfavorable:

$$M(T_d) = \frac{\sum_{i=1}^n (\lambda_i / \mu_i) \sum_{i=1}^n \lambda_i}{\sum_{i=1}^n (\lambda_i / \mu_i)} = M(\beta(T_p)) / (\gamma(T_p))$$

- Duración media total de los estados favorables:

$$M(\alpha(T_p)) = P_s T_p$$

- Duración media de un estado favorable:

$$M(T_f) = 1 / \sum_{i=1}^n \lambda_i = M(\alpha(T_p)) / M(\gamma(T_p))$$

- Probabilidad de funcionamiento continuo de la instalación en el intervalo (t, t + x), para valores grandes de t:

$$S(x) = P_s \exp \left( - \sum_{i=1}^n \lambda_i x \right)$$

Las instalaciones compuestas de n elementos en serie pueden considerarse como formadas por un solo elemento equivalente, cuyos parámetros son:

$$\lambda_e = \sum_{i=1}^n \lambda_i, \mu_e = \sum_{i=1}^n \lambda_i / \sum_{i=1}^n (\lambda_i / \mu_i)$$

(3)

**6.2 Instalaciones compuestas de elementos en paralelo.**

En este caso la instalación entra en los estados desfavorables únicamente cuando se tienen defectos simultáneos de orden dos o tres, cuya probabilidad de aparición es bastante baja.

Si se trata de dos elementos idénticos conectados en paralelo se tiene que:

$$P_1 = 1 / (1 + 2(\lambda/\mu) + (\lambda/\mu)^2) \text{ (ambos elementos en funcionamiento).}$$

$$P_2 = 2P_1 (\lambda/\mu) \text{ (un elemento detectado).}$$

$$P_3 = P_1 (\lambda/\mu)^2 \text{ (ambos elementos averiados).}$$

$$P_s = P_1 + P_2, P_r = P_3$$

$$M(\gamma(T_p)) = 2P_1 \lambda (\lambda/\mu) = 2(\lambda^2/\mu) P_1$$

**Instalaciones con elementos de reserva.**

Para efectos del estudio de las instalaciones eléctricas se considera que dos o más elementos se pueden sustituir uno al otro de diferentes maneras, dando origen a tres tipos funcionalmente distintos de reserva:

- activa oculta ( λ )

- semi-activa (caliente)  $(\lambda' < \lambda)$  favorable, después de la caída de un elemento
- pasiva (fría)  $(\lambda = 0)$  básico.

La diferencia entre los tres tipos de reserva radica en:

- el valor de las intensidades de defección ( $\lambda$ )
- el tiempo de regreso de la instalación al estado

Los parámetros equivalentes, para dos elementos que se reservan recíprocamente, según el tipo de reserva, están dados en el cuadro No. 1.

**CUADRO No. 1**

**Parámetros equivalentes para dos elementos que se reservan mutuamente**

TIPO DE RESERVA	ELEMENTOS DIFERENTES	ELEMENTOS IDENTICOS
ACTIVA	$\lambda_e = \frac{\lambda_1 \lambda_2 (\mu_1 + \mu_2)}{\lambda_1 \mu_2 + \lambda_2 \mu_1 + \mu_1 \mu_2}$ $\mu_e = \mu_1 + \mu_2$	$e = \frac{2 \lambda^2}{2 \lambda + \mu}$ $\mu_e = 2 \mu$
SEMI-ACTIVA		$\lambda = \frac{\lambda \lambda'}{\lambda' + \mu + \lambda}$ $\mu = 2 \mu, \lambda' < \lambda$
PASIVA	$e = \lambda_1 \lambda_2 (\lambda_2 + \mu_1) (\mu_1 + \mu_2)$ $+ ((\lambda_1 + \mu_2) (\lambda_1 + \mu_1) \mu_2 +$ $(\lambda_2 \mu_2 + \mu_1 \mu_2 +$ $+ \lambda_1 \mu_2 + \lambda_1 \lambda_2) \mu_1)$ $e = \mu_1 + \mu_2$	$\lambda_e = \frac{\lambda^2}{\mu + \lambda}$ $\mu_e = 2 \mu$

En el caso en que se tienen dos elementos que se reservan recíprocamente, los indicadores de con-

fiabilidad, para los diferentes tipos de reserva se calculan tal y como se muestra en el cuadro No. 2.

CUADRO No. 2: Indicadores de confiabilidad para los diferentes tipos de reserva

TIPO DE RESERVA	$P_s$	$P_R$	$M(\infty(T_p))$	$M(\beta(T_p))$	$M(\hat{\nu}(T_p))$	$M(\hat{\nu}'(T_p))$	$M(\hat{\nu}''(T_p))$	$M(T_f)$	$M(T_d)$
ACTIVA	$\mu_1 \lambda_2 + \mu_2 \lambda_1 + \mu_1 \mu_2$ $\rho_1 (\mu_1 + \mu_2) + \mu_2$	$\lambda_1 \lambda_2$ $\rho_1 (\mu_1 + \mu_2) + \mu_2$	$P_s T_p$	$P_R T_p$	$(P_2 \lambda_2 + P_3 \lambda) T_p$		$(2\lambda P_1 + \lambda P_2) T_p$	$(\mu_1 \lambda_2 + \mu_2 \lambda_1 + \mu_1 \mu_2)$ $\rho_1 (\mu_1 + \mu_2) + \mu_2$	$1$ $\mu_1 + \mu_2$
SEMI ACTIVA	$2\lambda(\mu + \lambda) + \lambda^2$ $\rho_1 \mu_2 + 2\mu(\lambda + \lambda^2) + \lambda(\lambda + \lambda^2)$	$\lambda(\lambda + \lambda^2) + \lambda^2$	$P_s T_p \lambda T_s T_p$	$P_r T_p + \lambda P_1 T_s T_p$	$P_1 \lambda T_p$	$P_R T_p$	$((\lambda + \lambda^2) P_1 + \lambda(P_2 + P_3)) T_p$	$M(\infty(T))$ $M(\hat{\nu}(T))$	$M(\beta^1(T))$ $M(\hat{\nu}(T))$
PASIVA	$2\mu(\lambda + \mu)$ $\mu^2 \rho_1 + \mu^2$	$\mathcal{R}$ $\mu^2 + \rho_1 + \mu^2$	$P_s T_p - P_1 \lambda T_r T_p$	$P_R T_p + P_1 \lambda T_r T_p$	$P_2 \lambda T_p$	$P_1 \lambda T_p$	$M(\hat{\nu}(T_p)) + M(\hat{\nu}^1(T_p))$	$M(\infty(T_p))$ $M(\hat{\nu}(T_p))$	$M(\beta^1(T_p))$ $M(\hat{\nu}(T_p))$

- Número medio de estados desfavorables de la instalación de los que se sale mediante la reparación del o los elementos averiados.

$$M_i (\mathcal{V}^I(T_p)) = P_s \lambda_i T_p \text{ o } M_{ij} (\mathcal{V}^I(T_p)) = (P_{s_i} \lambda_j + P_{s_j} \lambda_i) T_p$$

- Número medio de estados desfavorables debidos a interrupciones por maniobra:

$$M_{ij} (\mathcal{V}^{II}(T_p)) = (1 - P_r) p_i p_j \lambda_i T_p$$

- Duración media de un estado desfavorable, al que se ha llegado por interrupción de maniobra:

$$M_{ij} (\mathcal{B}''(T_p)) = M_{ij} (\mathcal{V}''(T_p)) t_m$$

- Duración media total de interrupción para la instalación estudiada:

$$M (\mathcal{B}(T_p)) = M_i (\mathcal{B}(T_p)) + M_{ij} (\mathcal{B}'(T_p))$$

$$M_{ij} (\mathcal{B}''(T_p))$$

- Probabilidad de interrupción de la instalación:

$$P_r = \frac{M (\mathcal{B}(T_p))}{M (\mathcal{A}(T_p)) + M (\mathcal{B}(T_p))}$$

$t_m$  = tiempo medio de ejecución de una operación de maniobra

$T_p$  = período planificado para el cual se realiza el estudio.

- Duración media total de funcionamiento continuo de la instalación estudiada:

$$M (\mathcal{A}(T_p)) = T_p - M (\mathcal{B}(T_p))$$

### 6.4 Instalaciones compuestas de elementos independientes.

Los procesos estocásticos de tipo Markov, también pueden aplicarse al cálculo de los indicadores de confiabilidad, en instalaciones donde el comportamiento de sus componentes es independiente. Incluso la aplicación de dichos procesos resulta muy recomendable para el caso en que la instalación contenga muchos elementos y se desee calcular además, el número de interrupciones ocasionadas por errores de maniobra.

En esta situación, el estado favorable se determina a partir de una tabla donde se evidencian los elementos o combinaciones de éstos, que conducen a los estados desfavorables, así como la manera de regresar al estado favorable (maniobra o reparación). Los parámetros de confiabilidad que se usan en este caso son  $\lambda$  y  $\mu$  y se establecen para elementos equivalentes.

Los indicadores de confiabilidad se determinan de la siguiente manera:

- Probabilidad de que todos los elementos estén funcionando:

$$P_s = \prod_{i=1}^n P_i$$

- Probabilidad de que la instalación se encuentre en los estados desfavorables, de los que se sale únicamente reparando el o los elementos averiados;

$$P_{ri} = P_s q_i / P_i \text{ o } P_{rij} = P_s q_i q_j / p_i p_j \text{ (para defectos dobles).}$$

- Duración media de un estado desfavorable, al que se ha llegado por la avería de uno o dos elementos.

$$M_i (\mathcal{B}^1(T_p)) = P_{ri} T_p \text{ o } M_{ij} (\mathcal{B}^1(T_p)) = P_{rij} T_p$$

**7.— PRESENTACION DEL PROGRAMA DE CALCULO Y DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS**

**7.1 Presentación del programa**

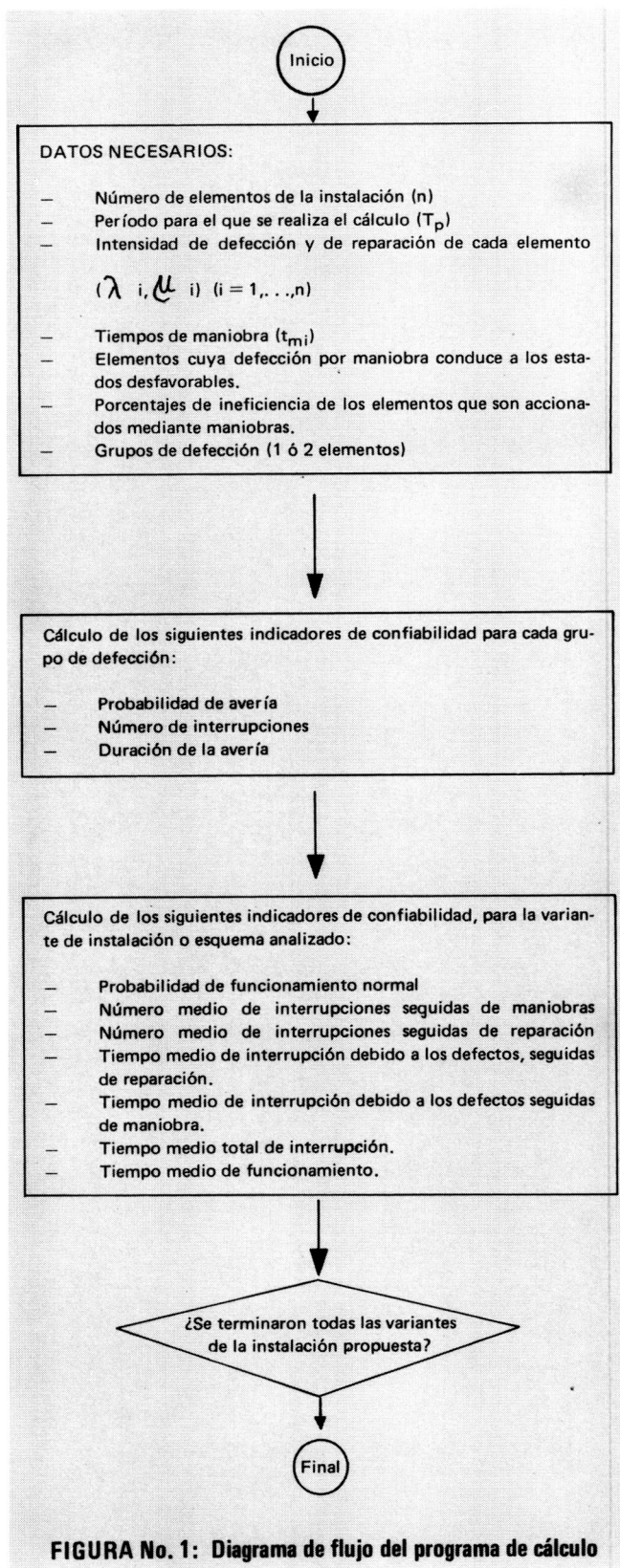
El programa de cálculo, (figura N 1), se basa en un algoritmo, que se realizó teniendo en cuenta las siguientes hipótesis:

- el paso de la instalación por los diferentes estados de funcionamiento está descrito por medio de un proceso Markov homogéneo y con un número de estado finito.
- la instalación o el esquema está formado por elementos independientes.
- los elementos del esquema se caracterizan por la intensidad de defeción ( $\lambda$ ) y la probabilidad de funcionamiento ( $p$ ).
- en los cálculos se consideran únicamente defectos dobles (los triples son opcionales).
- en el caso de los elementos de reserva, se considera necesario fijar un tiempo de arranque o introducción del elemento de reserva.

Las principales etapas que recorre el algoritmo de cálculo son las siguientes:

- se generan todos los estados desfavorables que pueden ocurrir.
- se calcula la probabilidad de que todos los elementos del esquema funcionen normalmente.
- se calcula la probabilidad de que el esquema se encuentre en un estado desfavorable correspondiente a una avería simple, doble o triple.
- se calcula la probabilidad de funcionamiento normal del esquema.
- se determina el número medio de interrupciones que conducen a los estados desfavorables y de los que solo se puede salir mediante la reparación del equipo averiado.
- se calcula el número medio total de averías que se solucionan por medio de maniobra de los elementos de reserva.
- se calcula el tiempo medio de interrupción para cada estado desfavorable y para el esquema completo. En este caso se obtienen por separado el tiempo medio de interrupción debido a la reparación y el debido a las maniobras.

- se determina el tiempo medio total de avería y de funcionamiento respectivamente.



**FIGURA No. 1: Diagrama de flujo del programa de cálculo**

Este programa de cálculo permite determinar los principales indicadores de confiabilidad, que se usan como base de comparación de los diferentes esquemas, tanto eléctricos como mecánicos, propuestos para ser optimizados.

## 7.2 Análisis de los resultados obtenidos

Con el propósito de comprobar la eficiencia del programa se presentan los resultados obtenidos al analizar cuatro esquemas diferentes propuestos, tanto para la alimentación de los servicios auxiliares como para la subestación de conexión de las plantas hidroeléctricas que funcionan en régimen de base y cuya potencia instalada ( $P_i$ ) oscila entre  $3 * 30$  MVA y  $3 * 170$  MVA.

El análisis de estos esquemas conduce, mediante el uso del programa, a la obtención de los resultados presentados en los cuadros N° 3 y N° 4. Se debe recalcar que, con este programa, se puede analizar el comportamiento de los esquemas para diferentes condiciones de funcionamiento de la planta ( $\% P_i$ ), lo que permite tener más bases a la hora de elegir el esquema óptimo.

De los resultados presentados en el cuadro N° 3 se concluye que, desde el punto de vista de la confiabilidad, el esquema 2 posee los mejores indicadores y por lo tanto, resulta ser el más recomendado para la alimentación de los servicios auxiliares en las plantas hidroeléctricas. En lo que respecta a los resultados de la tabla N° 4 se nota que el esquema óptimo para la subestación de alta tensión resulta ser el llamado subestación 3.

A pesar de que con los resultados obtenidos y presentados en los cuadros N° 3 y N° 4 respectivamente, queda plasmada la aplicación y eficacia del programa, en este trabajo se establece una correlación entre los dos tipos de esquemas, con el fin de obtener el esquema óptimo completo para la parte eléctrica de las plantas hidroeléctricas y es así como, teniendo en cuenta los indicadores de confiabilidad de los cuadros N° 3 y N° 4, y usando el concepto de energía no entregada mínima anual como criterio de comparación, se obtiene, a partir de los resultados presentados en el cuadro N° 5, la combinación de los dos esquemas (baja y alta tensión), que representa el esquema óptimo funcionalmente hablando (ver figura N° 2)

## 8.— CONCLUSIONES

El análisis de la confiabilidad funcional de las instalaciones electroenergéticas evidencia el comportamiento de dichas instalaciones en su tiempo de utilización, formado éste por períodos alternos de funcionamiento normal y de avería. En el presente caso el comportamiento de las instalaciones analizadas está, tal y como se comprueba en los resultados obtenidos mediante el programa de cálculo, descrito por una serie de indicadores que pueden ser usados incluso como elementos de decisión en el momento de elegir un esquema óptimo.

Las apreciaciones cualitativas respecto al método utilizado vienen a completar o a reafirmar algunas conclusiones obtenidas por investigadores en este campo.

De los resultados obtenidos en la ejemplarización del método de cálculo se concluye que a pesar de ser los resultados (indicadores) algo semejantes de un esquema a otro, este tipo de estudio cobra una gran importancia en el momento de diseñar la parte eléctrica de una planta hidroeléctrica y en especial aquella parte relacionada con la evacuación de la energía eléctrica producida en dicha planta. Teniendo en cuenta que la economía de muchos países latinoamericanos está basada en la energía hidroeléctrica, los medios de producción y de transmisión de ésta deben ser lo más confiables posible, pues los perjuicios producidos por interrupciones ocasionales pueden ser determinantes en algunos sectores de la economía (siderurgia, metalurgia, etc.).

Es digno de mencionar que, a pesar de que en el presente trabajo se tratan instalaciones eléctricas aisladas también, utilizando los métodos estadístico-matemáticos, se pueden hacer estudios de confiabilidad funcional de un sistema electroenergético en forma integral, de igual modo se realizan estudios a corto plazo (short time reliability studies) que permiten determinar el comportamiento del sistema en los momentos de máxima demanda (períodos pico).

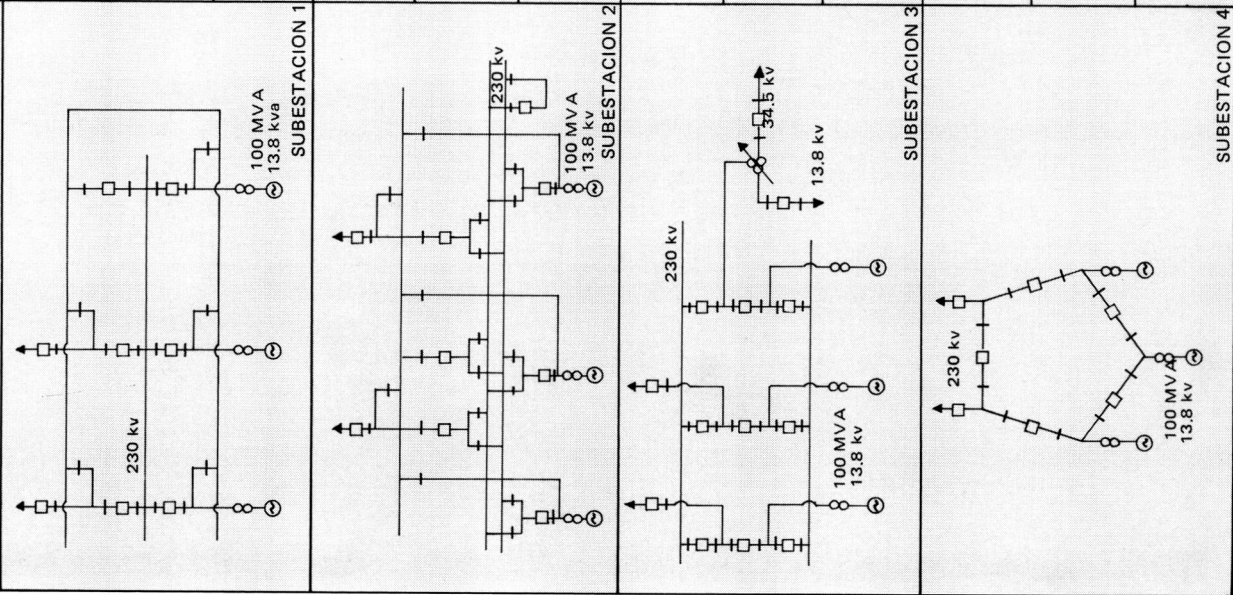
INDICADORES DE CONFIABILIDAD OBTENIDOS

1	2	3	4		5		6	7	8
			M( $\lambda$ (t)) (int/año)	M	M( $\beta$ (t)) (h/año)	R			
o/o	TP(h/año)	Ps	R	M	R	M	(h)	(h)	
<p><b>CUADRO No. 3: Esquemas propuestos para servicios auxiliares - CHE.</b></p>									
<p>ESQUEMA 1</p>	33	8760	0.997953	5.9357	1.3449	16.6150	1200.73	2.4672	0.99788
	67	4900	0.999008	0.8722	0.5643	2.1482	3407.70	3.3838	0.99898
	100	2300	0.999412	0.2156	0.2645	1.0036	4787.84	2.8272	0.99939
	33	8760	0.998531	5.1723	1.0068	12.8630	1415.60	2.0839	0.99847
<p>ESQUEMA 2</p>	67	4900	0.999782	0.3474	0.1323	0.7377	10218.43	2.2486	0.999772
	100	2300	0.999905	0.0387	0.0937	0.5327	17370.00	1.6503	0.99991
	33	8760	0.998088	5.6283	0.7312	14.0379	1374.83	2.6337	0.99802
	67	4900	0.999171	1.0310	0.1827	1.7558	4033.89	3.3468	0.99915
<p>ESQUEMA 3</p>	100	2300	0.999481	0.3659	0.0973	1.2652	4962.88	2.5770	0.99946
	33	8760	0.99823	5.7358	0.7721	15.4622	1343.72	2.3825	0.99816
	67	4900	0.99921	0.3796	0.1058	1.4897	10086.37	7.9745	0.99921
	100	2300	0.99972	0.1599	0.0622	0.6952	10350.46	2.8989	0.99971
<p>ESQUEMA 4</p>	33	8760	0.99823	5.7358	0.7721	15.4622	1343.72	2.3825	0.99816
	67	4900	0.99921	0.3796	0.1058	1.4897	10086.37	7.9745	0.99921
	100	2300	0.99972	0.1599	0.0622	0.6952	10350.46	2.8989	0.99971

INDICADORES DE CONFIABILIDAD OBTENIDOS

1	2	3	4	5	6	7	8
$\% \text{ o } P_i$	$T_p$ (h/año)	$P_s$	$M(\beta(t))$ (h/año)	$M(\lambda)$ (int/año)	$(M(Tf))$ (h)	$M(Td)$ (h)	$P(\lambda(t)=0)$
33	8760	0.99897	9.025	0.386	22670.92	23.37	0.9915
67	4900	0.99231	37.682	1.225	3969.24	30.76	0.6682
100	2300	0.98673	30.521	0.937	2419.61	32.57	0.8236
33	8760	0.99903	8.497	0.223	39244.40	38.10	0.9953
67	4900	0.99874	6.174	1.015	4821.50	6.08	0.6886
100	2300	0.99123	20.171	0.874	2608.50	23.08	0.8632
33	8760	0.99943	4.987	0.107	81822.50	46.63	0.9991
67	4900	0.99901	4.853	0.835	5862.45	5.80	0.8754
100	2300	0.99177	18.932	0.535	4263.68	35.38	0.8913
33	8760	0.99912	7.708	0.321	27265.70	24.01	0.9925
67	4900	0.99823	8.673	0.913	5357.42	9.50	0.7022
100	2300	0.99146	19.642	0.647	3524.51	30.35	0.8833

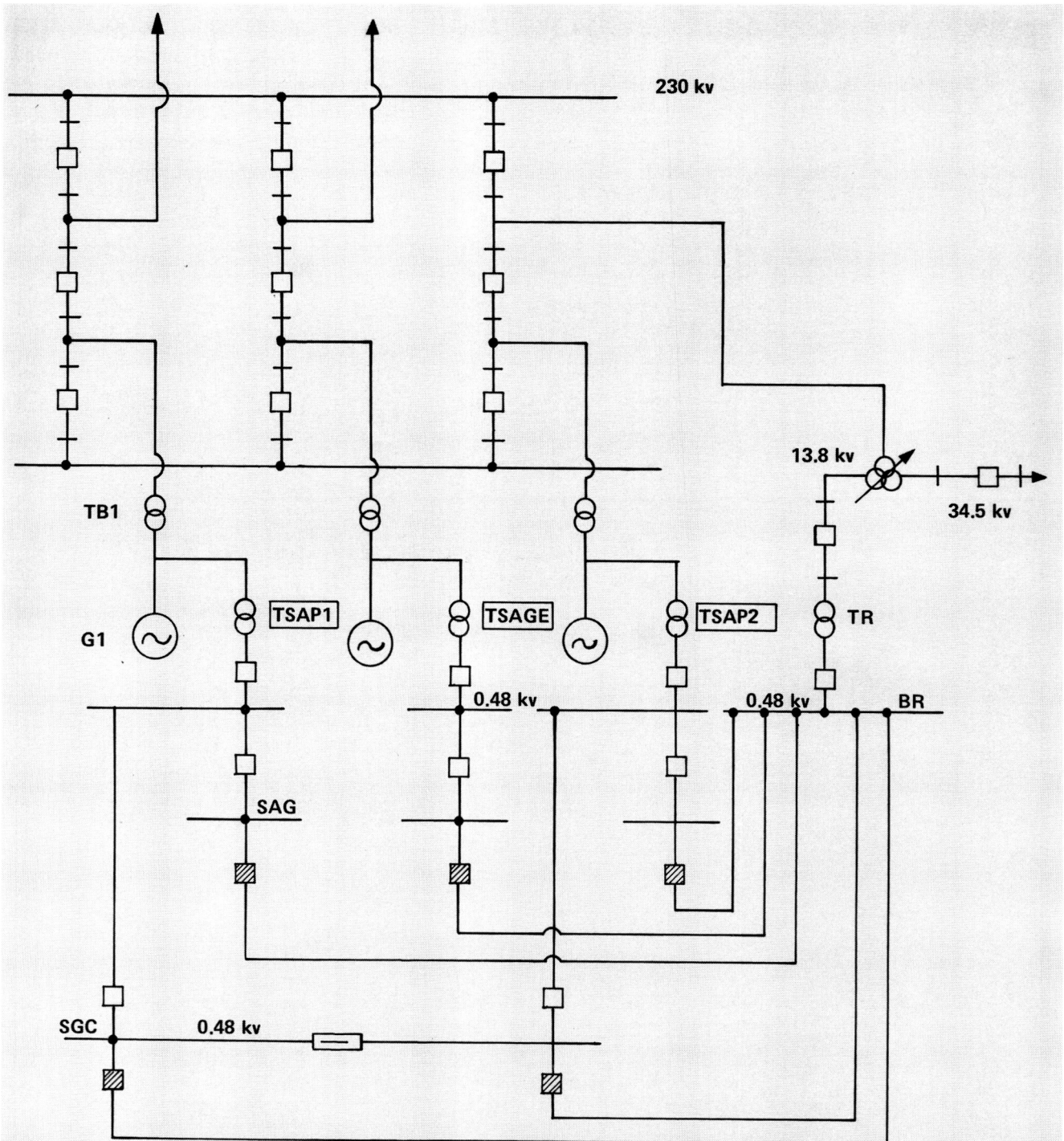
CUADRO No. 4: Esquemas propuestos para las subestaciones de alta tensión de las plantas hidroeléctricas.



**CUADRO No. 5**

Correlación comparativa para obtener la combinación óptima. Esquema para servicios auxiliares y esquema para la subestación de alta tensión. Energía no entregada MWh/año.

ESQUEMAS PROPUESTOS PARA LOS SERVICIOS AUXILIARES DE LAS PLANTAS HIDROELECTRICAS	ESQUEMAS PROPUESTOS PARA LAS SUBESTACIONES DE ALTA TENSION EN LAS PLANTAS HIDROELECTRICAS			
	SUBESTACION 1	SUBESTACION 2	SUBESTACION 3	SUBESTACION 4
ESQUEMA 1	9945.01	5705.41	5099.41	5824.51
ESQUEMA 2	9179.97	4941.37	4334.37	5059.53
ESQUEMA 3	9430.03	5191.43	4584.43	5309.53
ESQUEMA 4	9523.88	5285.28	4678.28	5403.38



TPAP1, TPAP2 →  $S_n = 250-630 \text{ KVA}$ , para 30-170 MVA/grupo

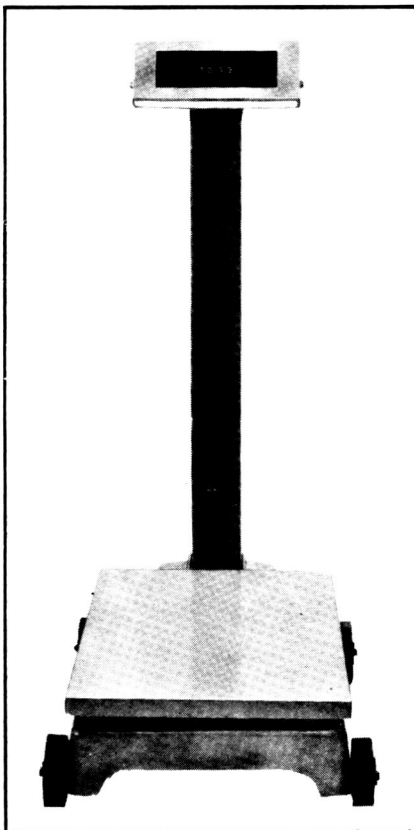
TSAGE →  $S_n = 50 - 130 \text{ KVA}$ , para 30-170 MVA/grupo

TR →  $S_n = 250 - 630 \text{ KVA}$

**FIGURA No. 2:** Combinación óptima de esquemas de servicios auxiliares y de alta tensión para plantas hidroeléctricas de 3 x 30 MVA 3 x 170 MVA.

9.— LITERATURA CONSULTADA

- Nitu, V. Métodos estadístico-matemáticos utilizados en energética. Bucarest. Editorial Técnica, 1968.
- Billington, R. Power system reliability evaluation. New York: Gordon and Breach, 1970.
- Chinchilla, F. Contribuciones en la elección de los esquemas óptimos para los servicios auxiliares y su influencia sobre la confiabilidad funcional del sistema electroenergético. Tesis para optar al grado de doctor en centrales eléctricas. Instituto Politécnico de Bucarest, 1979.
- Bazovski I. Fiabilité théorie et pratique de la sureté de fonctionnement. Paris: Dunod, 1966.



**LA BASCULA DE PLATAFORMA  
DETECTO  
TAN CONOCIDA POR USTEDES,  
AHORA CON CABEZAL DIGITAL.**

**JOHN M. KEITH E HIJO, LTDA.**

Tels: 22-06-05 — 22-07-05 — 22-08-05  
Apdo: 10063 San José, COSTA RICA.