

# DETERMINACIÓN DE ÍNDICES EN EL SISTEMA DE TRANSMISIÓN

José Oscullo  
Dirección de Planeamiento

## RESUMEN

El presente documento técnico explora la utilización de índices en la regulación del servicio de transmisión dentro de las características nuevas presentes en la industria eléctrica.

**PALABRAS CLAVE:** Sistema de transmisión, confiabilidad.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de transmisión esta conformado por una serie de equipos (líneas eléctricas, transformadores, reactores, capacitores, FACTS, etc.) que se encuentran expuestos al tiempo e intensidad de uso, es decir, presentan desgaste por lo que son elementos sujetos a fallas.

Así, la indisponibilidad de un elemento del sistema de transmisión trae consigo consecuencias a los usuarios de la energía eléctrica tales como: blackout, racionamientos de energía localizados, congestionamientos de elementos en el sistema de eléctrico lo cual da como resultado un incremento del costo de la energía en el sistema. Por lo que se hace necesario que los componentes en el sistema de transmisión estén operando la mayor parte del tiempo.

Dentro de un mercado eléctrico los costos de la energía a más de depender de los costos de generación también dependen de la red de transmisión. Si los usuarios no desean exponerse a costos elevados debido racionamientos y/o congestionamientos, y por otro lado los generadores no desean perder la oportunidad de poder vender su producción. Mas, por características especiales del sistema de transmisión su operación, expansión es un monopolio así que la calidad del servicio prestado debe ser regulado.

El ente regulador dentro de un mercado eléctrico debe crear reglamentos que permitan la maximización de la disponibilidad del sistema de transmisión por medio de adecuadas señales técnico-económicas en la gestión del negocio que constituye el sistema de transmisión, ya que el agente a cargo de la red eléctrica tiene como objetivo la maximización de sus ingresos, que para situaciones especiales presenta conflictos con el objetivo del agente operador del sistema, el cual es, obtener un punto de operación seguro y de mínimo costo.

## 2. REGULACIÓN DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN

Por medio de procedimientos regulatorios, que posibiliten estimular la actividad del sistema de transmisión a maximizar la disponibilidad de sus activos físicos.

Esto es posible lograrlo al identificar para cada sistema las causas de indisponibilidad de los diferentes componentes, lo que permite actuar e identificar el problema y de esa manera poder controlarlo. Entre las principales causas de indisponibilidad de los elementos del sistema de transmisión se enumera las siguientes:

- Programas de mantenimiento
- Programas de expansión y mejorías del sistema
- Operativas
- Forzadas

En cada una de ellas es posible en mayor o menor grado el control sobre la frecuencia y tiempo de duración de las indisponibilidades, mas, no todo es posible de hacerlo ya que existe un límite tecnológico para lograr la maximización de la disponibilidad de los elementos del sistema, definido por la vida útil y operación con la que se fue concebido el equipo; entendiéndose que el mantenimiento del mismo contribuí apenas a la preservación del nivel de confiabilidad de cada equipo.

La máxima disponibilidad del equipo se puede lograr a través de las siguientes acciones:

- Incremento de procedimientos de inspección
- Mantenimiento en caliente de los elementos
- Prevención y limpieza de partes internas o externas del equipo que causen la indisponibilidad
- Campañas dirigidas a evitar los vandalismos
- Optimización y eficiencia en la duración y calidad de los mantenimientos
- Programación coordinada en las diferentes etapas del mantenimiento
- Mejoría en la logística del mantenimiento.

## 3. CONFIABILIDAD DE UN COMPONENTE

La vida útil de un componente esta definido por el histórico de su utilización, por medio del ciclo opera-

reparación de acuerdo a lo indicado en la figura 1, en la teoría se conoce como espacio de estados como lo mostrado en la figura 2.

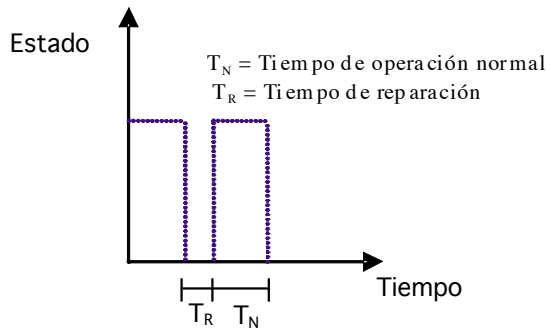


FIGURA 1: Ciclo Opera-Reparación

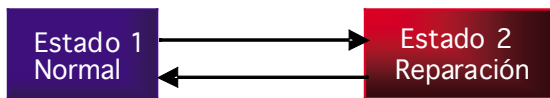


FIGURA 2: Modelo de Estados

Para el modelo de la figura 2, el período de permanencia en el estado normal o reparo constituyen variables aleatorias, lo que hace posible asociar a cada una de ellas una función de distribución de probabilidades  $F_N(t)$  y  $F_R(t)$ . Para una variable aleatoria  $X$ , la función de distribución  $F_X(t)$  mide la probabilidad de esa variable aleatoria sea menor o igual a un valor en un tiempo especificado  $t$ , matemáticamente se representa:

$$F_X(t) = P[X \leq t] \quad (1)$$

Las propiedades de una función de distribución son:

$$\begin{aligned} 0 &\leq F_X(t) \leq 1 \\ F_X(-\infty) &= 0 \\ F_X(+\infty) &= 1 \\ F_X(t) &\text{ Es no decreciente} \end{aligned} \quad (2)$$

Otra manera de describir la probabilidad de una variable aleatoria continua es la función densidad de probabilidad  $f_X(t)$  definida como se observa en la ecuación (3):

$$f_X(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P[t \leq T \leq t + \Delta t]}{\Delta t} \quad (3)$$

Otra función importante en el análisis de la confiabilidad del componente es la función riesgo de falla defina en (4):

$$h(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P[t \leq T \leq t + \Delta t / T > t]}{\Delta t} \quad (4)$$

Para pequeños valores de  $\Delta t$ ,  $h(t) \Delta t$  mide la probabilidad de un componente que estando operando hasta el tiempo  $t$ , presente una falla en el próximo intervalo  $\Delta t$ .

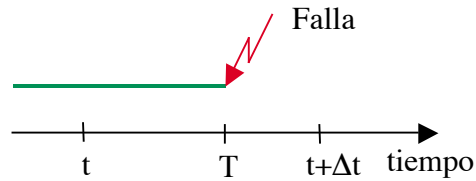


FIGURA 3: Ilustración función riesgo de falla

La ecuación (4) se puede trabajar utilizando el concepto de probabilidad condicionada obteniéndose:

$$h(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P[t \leq T \leq t + \Delta t]}{\Delta t \cdot P[T > t]} \quad (5)$$

Reemplazando las expresiones (1) y (3) la ecuación (5) puede ser escrita como:

$$h(t) = \frac{f_T(t)}{1 - P[T \leq t]} = \frac{f_T(t)}{1 - F_T(t)} \quad (6)$$

Con todas estas consideraciones podemos describir la confiabilidad de un componente como se indica a seguir:

- Probabilidad del componente de encontrarse en estado normal.

$$P_N(t) = P[X_t = N]$$

- Probabilidad del componente de encontrarse en reparación.

$$P_R(t) = P[X_t = R]$$

- Tiempo medio para la falla

$$\bar{T}_N = \int_0^{\infty} \frac{dF_N(t)}{dt} \cdot t \cdot dt$$

- Tiempo medio de reparo

$$\bar{T}_R = \int_0^{\infty} \frac{dF_R(t)}{dt} \cdot t \cdot dt$$

- Tiempo medio entre fallas

$$T_{MF} = \bar{T}_N + \bar{T}_R$$

- Disponibilidad

$$DI = \frac{\bar{T}_N}{\bar{T}_N + \bar{T}_R}$$

Mide la proporción de tiempo que el componente se encuentra operando.

- Indisponibilidad

$$IN = \frac{\overline{T_R}}{\overline{T_N} + \overline{T_R}}$$

Mide la proporción de tiempo que el componente se encuentra reparándose.

De acuerdo a las variables de cada sistema pueden determinarse las funciones  $F_N(t)$  y  $F_R(t)$  y considerando además, que para una variable aleatoria se cumple:

$$F_x(t) = \int_{-\infty}^t f_x(t) dt$$

$$f_x(t) = \frac{dF_x(t)}{dt}$$

Por lo general para el sistema de transmisión los tiempos de operación y mantenimiento presentan distribuciones exponenciales, es decir, las funciones densidades de probabilidad son:

$$f_N(t) = \lambda e^{-\lambda t}$$

$$f_R(t) = \mu e^{-\mu t}$$

Donde:

$\lambda$  Tasa de falla [falla/mes]

$\mu$  Tasa de mantenimiento [horas]

Utilizando las expresiones anteriores se puede determinar:

$$h(t) = \lambda$$

$$\overline{T_N} = \frac{1}{\lambda}$$

$$\overline{T_R} = \frac{1}{\mu}$$

$$DI = \frac{\mu}{\lambda + \mu}$$

$$IN = \frac{\lambda}{\lambda + \mu}$$

#### 4. DEFINICIÓN DE PROCEDIMIENTOS

De la sección anterior se puede concluir que la disponibilidad de una componente puede ser medida por el monitoreo de la duración de los tiempos de mantenimiento a lo largo de un periodo definido.

Mas, para determinar el índice de disponibilidad resulta crítica la definición del periodo, en la mayoría de los mercados se utiliza periodos mensuales los que permiten obtener luego el índice anual.

Cada mes el agente administrador de los activos deberá tener la estadística de las indisponibilidades de los elementos del sistema de transmisión, los que permitirán el cálculo de los índices de acuerdo a las expresiones obtenidas en la sección 3. El ente regulador deberá establecer los límites mínimos de cada uno de los índices acordados con el agente y

si se los incumplen penalizarlo, de esa manera, dar una señal económica que permita estimular un mejor desempeño del sistema de transmisión.

- Agente penalizado mediante un índice

Si el sistema de transmisión es robusto es lógico pensar en que las fallas de los elementos son esporádicas, por lo que, el agente administrador del sistema de transmisión puede tener un tiempo grande de mantenimiento. Mas, esto no indica que no sufrirá penalizaciones ya que en este caso el debe cuidarse de mantener un índice de disponibilidad no mensual sino en periodos mayores como por ejemplo semestral, con eso en este caso el agente tiene la posibilidad compensar desempeños desfavorables dentro de un mes con los meses subsecuentes.

La penalización podría ser:

$$PVT_j = \begin{cases} 0 & DIM > DIT \\ -K \frac{DIM_j}{DIT_j} RE_j & DIM < DIT \end{cases}$$

Donde:

$DIM_j$ : Índice de disponibilidad, medido en el componente j

$DIT_j$ : Índice de disponibilidad, Teórico en el componente j

$K$ : Factor de penalización

$PVT_j$ : Penalización variable del elemento j

$RE_j$ : Pago por la disponibilidad del elemento j.

- Agente siempre penalizado

Es decir, en este caso la evaluación del desempeño del sistema de transmisión es evaluada de manera anual. Si él presenta una incidencia de disparos es elevada debido a que este sistema esta en proceso de expansión y mejoramiento está seria una alternativa adecuada.

Sobre esta base, el sistema es no-robusto, en este caso seria necesario hacer un seguimiento mucho más minucioso como por ejemplo en etapas horarias de esa manera el puede mantener un adecuado grado de disponibilidad del sistema de transmisión, mas, se hace necesario sopesar el nivel de calidad de servicio que se desea tener para no entregar al usuario un producto demasiado caro.

La manera de penalización podría ser:

$$PVT_j = \frac{RE_j}{24.ND} (-K_p \sum_{i=1}^{NP} DMP_{ij} - K_F \sum_{i=1}^{NF} DF_{ij})$$

Donde:

$DMP_{ij}$ : Duración [horas] de i-ésimo mantenimiento programado del elemento j.

$DF_{ij}$ : Duración [horas] del i-ésimo disparo del elemento j.

$K_p$ : Factor de penalidad para los mantenimientos

$K_F$ : Factor de penalidad en los disparos.

NP: Número de mantenimientos programados en el mes.  
NF: Número de disparos en el mes.  
ND: Número de días del mes.

Como se notara en la expresión anterior para estimular los mantenimientos  $K_F$  deberá ser muchísimo mayor que  $K_p$ .

Para la determinación de los factores  $K$ ,  $K_p$ ,  $K_F$ , el ente regulador deberá tener pleno conocimiento sobre el desempeño y estado del sistema de transmisión, así como una estimación sobre los costos de mantenimientos de los elementos del sistema tanto en caliente como fuera de línea.

En la práctica de los mercados es necesario que el ente regulador considere señales adicionales tales como:

- Activación de los sistemas mediante elementos de reconexión.
- Evitar reprogramación de los mantenimientos.
- Creación de bonificaciones cuando el agente realice mantenimientos utilizando tecnologías de punta, reduciendo el periodo de indisponibilidades.

## 5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Silva, E "Formação de Preços em Mercados de Energia Elétrica". 1 ed, SagraLuzatto, 2001
- [2] Portugal, Erse-Entidad Reguladora do Setor Elétrico. [www.erse.pt](http://www.erse.pt)
- [3] Chile Comisión Nacional de Energía [www.cne.cl](http://www.cne.cl)
- [4] Oscullo, J "Índice na transmissão" Congreso Pesquisadores UNICAMP Março 2001



**José Oscullo L.**- Nació en Sangolquí, Ecuador, en 1971. Recibió su título de Ingeniero Eléctrico en la Escuela Politécnica Nacional en 1996, y de Master en Ingeniería Eléctrica de la Universidad Estatal de Campinas, Sao Paulo en 2002.

Actualmente está postulado para cursar la especialización de Economía y Finanzas en la Universidad Andina Simón Bolívar, Quito. Su campo de investigación se encuentra relacionado con la aplicación de sistemas expertos a mercados eléctricos, así como la regulación y economía de mercados.