

ALGORITMOS PARA LA DETERMINACION DE LA RESERVA NECESARIA EN SISTEMAS DE GENERACION DE ENERGIA ELECTRICA

Francisco F. Garcés

Instituto de Energía Eléctrica  
Universidad Nacional de San Juan  
San Juan - Argentina

RESUMEN

Este trabajo muestra algoritmos para el cálculo de la reserva de generación en sistemas de suministro de energía eléctrica. Primeramente es presentado un algoritmo simulativo basado en el método de Monte-Carlo. Luego se describe un procedimiento analítico basado en la convolución de las funciones probabilidad de falla de los generadores. Son consideradas la inseguridad de los datos y la asistencia de sistemas interconectados.

Finalmente, se muestran ejemplos de aplicación de estos algoritmos para investigar importantes cuestiones acerca del cálculo de la reserva de generación.

ABSTRACT

This work shows algorithms for generation reserve calculations in electric power systems. Firstly a Monte-Carlo based algorithm is presented. Then an analytical approach based on the convolution of failure probability functions of generators is described. Data uncertainties and assistance from interconnected systems are considered.

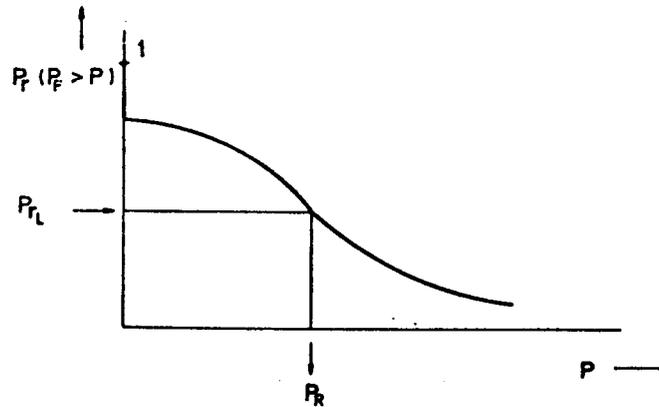
Finally, examples of application of this algorithms to investigate important questions about generation reserve calculations are shown.

## INTRODUCCION

Un suministro confiable de energía eléctrica sólo es posible a través del mantenimiento de un adecuado nivel de reserva. Dado que los fenómenos que dan origen a la necesidad de reserva son de naturaleza estocástica, el cálculo del requerimiento de reserva debe realizarse con ayuda de modelos probabilísticos.

En este trabajo se trata el problema del cálculo de la reserva necesaria en sistemas de generación de energía eléctrica. Para ello debe determinarse, a partir de los datos que caracterizan la confiabilidad de cada uno de los bloques generadores componentes del sistema, la distribución de probabilidad de la potencia fuera de servicio por falla, que es la potencia que debe ser reemplazada por la reserva.

Si se conoce la distribución de probabilidad de la potencia fuera de servicio por falla y se fija un nivel de confiabilidad deseado  $Pr_L$ , se puede fácilmente determinar la reserva necesaria  $P_R$  para garantizar ese nivel de confiabilidad, como indica la figura 1.



$Pr (P_F > P) \hat{=}$  Probabilidad de que la potencia fuera de servicio por falla  $P_F$  sea mayor que  $P$

Fig. 1 Distribución de probabilidad de la potencia fuera de servicio por falla

## MODELO DEL BLOQUE GENERADOR

El modelo del bloque generador debe contemplar los estados en que el mismo puede encontrarse y las posibles transiciones entre ellos. Para la descripción de los procedimientos de cálculo de la reserva de generación necesaria se utilizará en este trabajo el modelo simplificado del bloque generador que se muestra en la figura 2 [1], con los posibles estados:

- O  $\hat{=}$  operación
- F  $\hat{=}$  falla
- R  $\hat{=}$  reserva

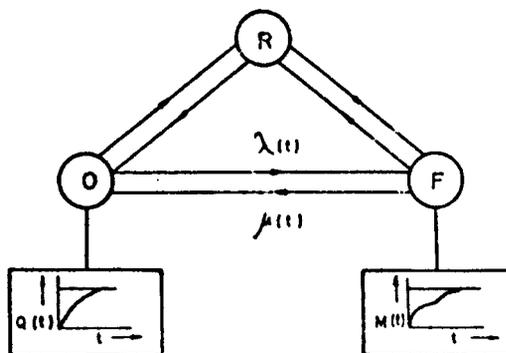


Fig. 2 Modelo simplificado del bloque generador

Las transiciones entre los estados de carácter estocástico O y R pueden describirse a través de las distribuciones de probabilidad de los tiempos de permanencia en cada estado  $Q(t)$  y  $M(t)$  o a través de las tasas de transición  $\lambda(t)$  y  $\mu(t)$ . Entre estas funciones existen las siguientes relaciones:

$$\lambda(t) = \frac{1}{1-Q(t)} \frac{dQ(t)}{dt} \quad (1)$$

$$\mu(t) = \frac{1}{1-M(t)} \frac{dM(t)}{dt} \quad (2)$$

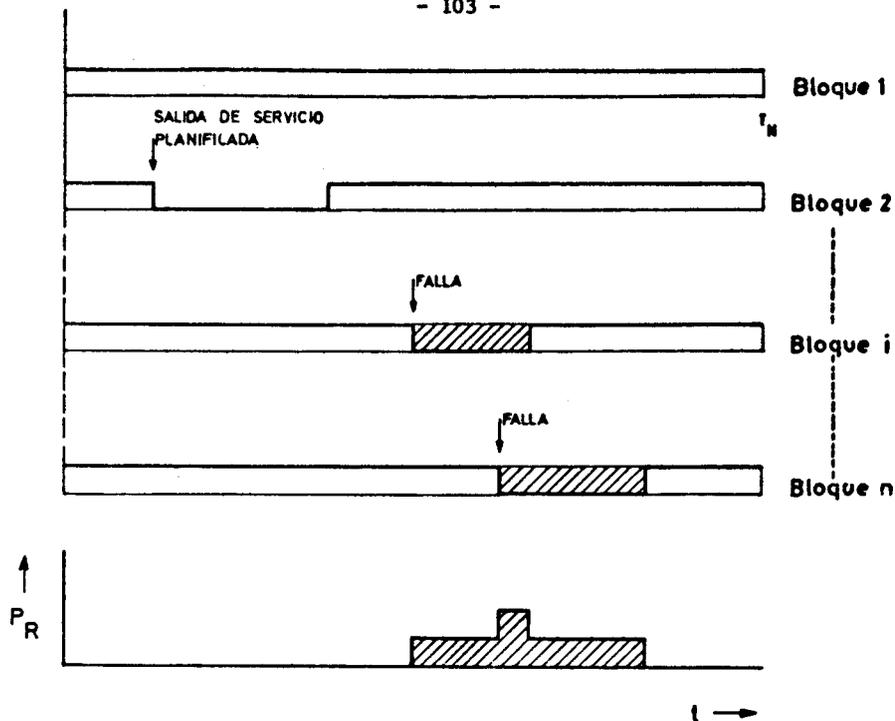
Las transiciones desde y hacia el estado de reserva R están previstas en el plan de operación y son por lo tanto de carácter determinístico, razón por la cual no pueden ser descriptas a través de distribuciones de probabilidad.

#### PROCEDIMIENTO SIMULATIVO PARA EL CALCULO DE LA DISTRIBUCION $Pr(P_F > P)$

El método simulativo de Monte-Carlo permite resolver el problema del cálculo de la distribución de probabilidad de la potencia fuera de servicio por falla sin necesidad de realizar hipótesis simplificadoras respecto de las distribuciones de probabilidad de los tiempos de permanencia en los distintos estados de los bloques generadores.

Para cada bloque generador que en el instante considerado se encuentra en un estado cuya duración es de naturaleza estocástica (O, F) se generan esas duraciones a partir de las funciones de distribución correspondientes ( $Q(t)$  y  $M(t)$ ). En esta forma se determina para cada bloque el instante correspondiente al próximo evento. Los cambios de estado de carácter determinístico (salida de servicio o puesta en marcha planificada) son conocidos a través del plan de operación previsto.

El procedimiento consiste en generar, en la manera indicada y en forma reiterada, posibles realizaciones del proceso simulado. La figura 3 muestra una posible realización con el requerimiento de reserva correspondiente a esa realización particular del proceso.



▨  $\hat{=}$  Requerimiento de reserva

Fig. 3 Posible realización del proceso simulado

Luego de realizadas una cantidad  $N$  de simulaciones, se puede estimar para cada instante  $t$  la probabilidad de requerir una determinada potencia de reserva  $P_k$

$$\hat{\Pr}(P_R = P_k, t) = \frac{N_k(t)}{N} \quad (3)$$

siendo  $N_k(t)$  la cantidad de simulaciones en las cuales se requiere una potencia  $P_k$  de reserva igual a  $P_k$  en el instante  $t$ . La calidad de la estimación depende de la cantidad de simulaciones realizadas  $N$ .

Este procedimiento basado en el método de Monte-Carlo brinda la posibilidad de formular modelos matemáticos cercanos a la realidad, ya que no son necesarias hipótesis simplificativas de importancia. Sin embargo, dado que la precisión de los resultados es función de la cantidad de simulaciones, en general requiere tiempos de cálculo muy elevados para obtener resultados suficientemente exactos.

#### PROCEDIMIENTO ANALITICO PARA EL CALCULO DE LA DISTRIBUCION $\Pr(P_F > P)$

Si en relación con el modelo del bloque generador presentado en la figura 2 se realiza la hipótesis de que las tasas de transición entre estados son constantes, lo que equivale a suponer que los tiempos de permanencia en los distintos estados son exponencialmente distribuidos, se puede resolver ese modelo utilizando la teoría de los procesos markovianos [2, 3]. El bloque generador puede luego representarse para los cálculos subsiguientes a través de la probabilidad de la potencia fuera de servicio, función de la forma indicada en la figura 4.

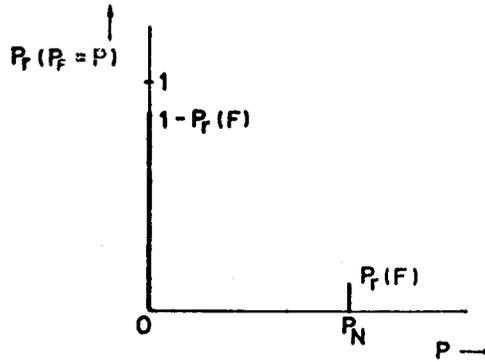


Fig. 4 Función de probabilidad de la potencia fuera de servicio de un bloque generador con potencia nominal  $P_N$

Bajo la hipótesis de que el comportamiento de operación de cada bloque generador es independiente de los restantes bloques del sistema y teniendo en cuenta que la potencia total fuera de servicio es la suma de las potencias fuera de servicio de cada bloque, la densidad de probabilidad de la potencia total fuera de servicio se puede obtener mediante la convolución sucesiva de las densidades de probabilidad de la potencia fuera de servicio de cada uno de los bloques del sistema.

Considerando que las funciones de probabilidad de la potencia fuera de servicio de cada bloque son funciones del tipo de Dirac, se puede obtener la distribución de probabilidad  $\Pr(P_F > P)$  directamente, sin necesidad de calcular la densidad de probabilidad, utilizando la fórmula recursiva que se presenta a continuación. Suponiendo en principio que el sistema está formado por un solo bloque con potencia  $P_1$ , la distribución de probabilidad  $\Pr(P_F > P)$  será como se indica en la figura 5, donde se utiliza el supraíndice (1) para indicar que se trata del sistema con sólo un bloque

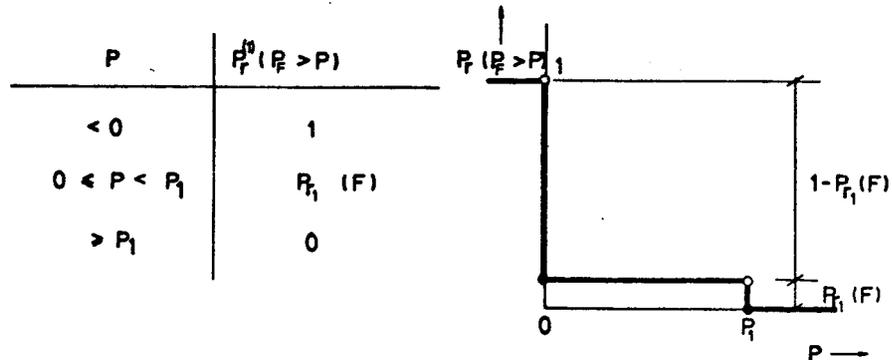


Fig. 5 Distribución de probabilidad de la potencia fuera de servicio del bloque 1

Tomando adicionalmente el bloque 2 con potencia  $P_2$  se tendrá:

$$\begin{aligned} \Pr^{(2)}(P_F > P) &= \Pr^{(2)}(P_F > P / \text{bloque 2 disponible}) \cdot (1 - \Pr_2(F)) \\ &+ \Pr^{(2)}(P_F > P / \text{bloque 2 en falla}) \cdot \Pr_2(F) \end{aligned} \quad (4)$$

donde:

$$\Pr^{(2)}(P_F > P / \text{bloque 2 disponible}) = \Pr^{(1)}(P_F > P) \quad (5)$$

$$\Pr^{(2)}(P_F > P / \text{bloque 2 en falla}) = \Pr^{(1)}(P_F + P_2 > P) = \Pr^{(1)}(P_F > P - P_2), \quad (6)$$

de modo que la ecuación (4) se puede escribir:

$$\Pr^{(2)}(P_F > P) = \Pr^{(1)}(P_F > P) \cdot (1 - \Pr_2(F)) + \Pr^{(1)}(P_F > P - P_2) \cdot \Pr_2(F) \quad (7)$$

La ecuación (7) se puede generalizar en la forma:

$$\Pr^{(j+1)}(P_F > P) = \Pr^{(j)}(P_F > P) \cdot (1 - \Pr_{j+1}(F)) + \Pr^{(j)}(P_F > P - P_{j+1}) \cdot \Pr_{j+1}(F) \quad (8)$$

Luego de considerar los n bloques del sistema la ecuación (8) da la distribución de probabilidad de la potencia fuera de servicio  $\Pr(P_F > P)$ .

Este procedimiento analítico exige las hipótesis simplificativas mencionadas, siendo la más importante la relativa a las tasas de transición entre estados constantes. Desde el punto de vista computacional es mucho más eficiente que el procedimiento simulativo presentado en el apartado anterior, por lo que resulta adecuado para su utilización en la práctica.

#### Consideración de la inseguridad de los datos estadísticos

Los datos estadísticos utilizados para describir la confiabilidad de los bloques generadores están afectados de inseguridad por el hecho de ser obtenidos necesariamente a través de la evaluación de muestras finitas. Como consecuencia, los resultados de los cálculos utilizando tales datos estarán también afectados de inseguridad.

Si se conocen los k primeros momentos de las probabilidades de falla  $\Pr(F)$  de cada bloque del sistema, se pueden calcular, utilizando la expresión (8), los jk primeros momentos de la magnitud buscada  $\Pr(P_F > P)$ , obteniendo así información acerca de la inseguridad de los resultados como consecuencia de la inseguridad de los datos [4, 5]. Si se suponen conocidos los momentos  $E(\Pr_j(F))$  y  $E((\Pr_j(F))^2)$ , se obtiene mediante la ecuación (8):

$$\begin{aligned} E(\Pr^{(j+1)}(P_F > P)) &= E(\Pr^{(j)}(P_F > P)) \cdot (1 - E(\Pr_{j+1}(F))) \\ &+ E(\Pr^{(j)}(P_F > P - P_{j+1})) \cdot E(\Pr_{j+1}(F)) \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} E((\Pr^{(j+1)}(P_F > P))^2) &= \\ E((\Pr^{(j)}(P_F > P))^2) \cdot (1 - 2E(\Pr_{j+1}(F)) + E((\Pr_{j+1}(F))^2)) \\ &+ E((\Pr^{(j)}(P_F > P - P_{j+1}))^2) \cdot E((\Pr_{j+1}(F))^2) \\ &+ 2(E(\Pr_{j+1}(F)) - E((\Pr_{j+1}(F))^2)) \\ &\cdot (E(\Pr^{(j-1)}(P_F > P)) \cdot \Pr^{(j-1)}(P_F > P - P_{j+1})) \cdot (1 - 2E(\Pr_j(F)) + E((\Pr_j(F))^2)) \\ &+ E(\Pr^{(j-1)}(P_F > P)) \cdot \Pr^{(j-1)}(P_F > P - P_{j+1}) \cdot (E(\Pr_j(F)) - E((\Pr_j(F))^2)) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + E(\Pr^{(j-1)}(P_F > P - P_j) \cdot \Pr^{(j-1)}(P_F > P - P_{j+1})) \cdot (E(\Pr_j(F)) - E((\Pr_j(F))^2)) \\
 & + E(\Pr^{(j-1)}(P_F > P - P_j) \cdot \Pr^{(j-1)}(P_F > P - P_j - P_{j+1})) \cdot E((\Pr_j(F))^2) \quad (10)
 \end{aligned}$$

Utilizando los valores calculados mediante (9) y (10) se puede obtener:

$$\sigma_{\Pr(P_F > P)} = \sqrt{E((\Pr(P_F > P))^2) - E(\Pr(P_F > P))^2} \quad (11)$$

Mediante la solución recursiva de las ecuaciones (9) y (10) y la utilización de la ecuación (11) se obtienen el valor esperado y la desviación estándar de la magnitud buscada  $\Pr(P_F > P)$ . Si se utiliza por ejemplo el límite superior del intervalo 3 $\sigma$  en lugar del valor esperado para la determinación de la reserva necesaria, puede asegurarse que con una elevada probabilidad ( $\gamma \geq 90\%$ ) será efectivamente obtenido el nivel de confiabilidad deseado.

#### Consideración de sistemas interconectados

El cálculo de confiabilidad y del requerimiento de reserva de sistemas de generación de energía eléctrica debe contemplar el posible aporte de reserva por parte de otros sistemas de generación (áreas del sistema interconectado) a través de la red de interconexión. Este posible aporte depende de la disponibilidad de reserva en los otros sistemas y de la confiabilidad, capacidad de transmisión y carga previa de los sistemas de interconexión.

Para posibilitar el cálculo se modela tanto el sistema bajo consideración o sistema asistido como el sistema asistente a través de las respectivas distribuciones de probabilidad de la potencia fuera de servicio. En forma análoga se calcula también para el sistema de transmisión entre ambas áreas la distribución de probabilidad de la potencia fuera de servicio. El complemento de esta función da, por lo tanto, la distribución de probabilidad de la capacidad de transmisión disponible.

El procedimiento de cálculo consiste en obtener a partir de la distribución  $\Pr(P_F > P)$  mediante derivación la función de probabilidad de falla  $\Pr(P_F = P)$  del área bajo estudio y combinar luego los estados de déficit (estados con potencia fuera de servicio por falla mayor que la potencia de reserva existente) con los estados en que el aporte del área asistente permite eliminar el déficit o por lo menos disminuir la potencia de déficit. En cada caso se tiene en cuenta la capacidad de transmisión disponible [6].

Para cada estado de déficit D del área asistida se calculan:

- la nueva probabilidad del estado sin déficit

$$\Pr(\text{ND}) = \Pr(\text{ND}) + \Pr(D) \cdot \Pr(P_R) \cdot \Pr(P_{CT}) \quad (12)$$

- la probabilidad de los estados intermedios DI con potencia de déficit menor

$$\Pr(\text{DI}) = \Pr(\text{DI}) + \Pr(D) \cdot \{\Pr(P_{RI}) \cdot \Pr(P_{CT}) + \Pr(P_R) \cdot \Pr(P_{CTI})\} \quad (13)$$

- la probabilidad de permanecer en el estado de déficit considerado

$$\Pr(D) = \Pr(D) \cdot \{\Pr(\text{NP}_R) + \Pr(\text{NP}_{CT}) - \Pr(\text{NP}_R) \cdot \Pr(\text{NP}_{CT})\} \quad (14)$$

siendo:

- ND  $\hat{=}$  estado del sistema sin déficit de potencia
- D  $\hat{=}$  estado del sistema con déficit de potencia
- DI  $\hat{=}$  estado del sistema con déficit de potencia intermedio
- P<sub>R</sub>  $\hat{=}$  estado del sistema asistente con reserva suficiente para eliminar el déficit de potencia en el sistema asistido
- NP<sub>R</sub>  $\hat{=}$  estado del sistema asistente sin disponibilidad de reserva
- P<sub>RI</sub>  $\hat{=}$  estado del sistema asistente con reserva exactamente igual a la requerida para llevar el sistema asistido al estado con déficit de potencia intermedio DI
- P<sub>CT</sub>  $\hat{=}$  estado del sistema de transmisión con capacidad suficiente para eliminar el déficit de potencia en el sistema asistido
- NP<sub>CT</sub>  $\hat{=}$  estado del sistema de transmisión sin capacidad disponible
- P<sub>CTI</sub>  $\hat{=}$  estado del sistema de transmisión con capacidad exactamente igual a la requerida para llevar el sistema asistido al estado con déficit de potencia intermedio DI

Para cada uno de los estados de déficit del sistema asistido se calculan las probabilidades indicadas mediante las ecuaciones (12), (13) y (14). En caso de existir varias áreas asistentes se repite el procedimiento con cada una de ellas. Luego de calculadas las probabilidades de todos los estados posibles, se obtiene mediante integración la distribución  $Pr(P_F > P)$ , a partir de la cual se deduce el requerimiento de reserva.

#### APLICACIONES

Los algoritmos descriptos han sido implementados en programas de cálculo que permiten la evaluación cuantitativa del requerimiento de reserva operativa en sistemas interconectados de generación de energía eléctrica. Han sido además utilizados para la investigación de importantes cuestiones relacionadas con el cálculo de la reserva necesaria. Como ejemplo se informa a continuación sobre los resultados de algunas de estas investigaciones.

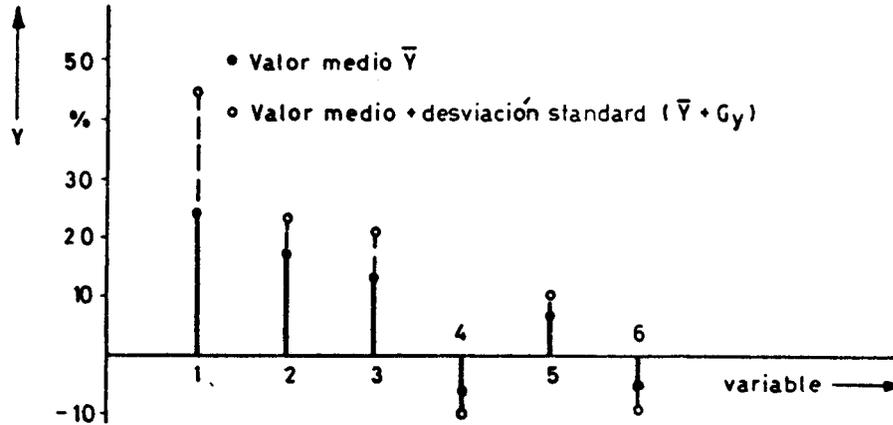
Investigación comparativa de los factores que influyen sobre la reserva necesaria en sistemas de generación de energía eléctrica

Utilizando el procedimiento simulativo y el procedimiento analítico ampliado para permitir la consideración de la inseguridad de los datos se investigó la influencia de las distintas variables sobre la reserva de generación necesaria [7, 8]. Para ello se construyó un caso de referencia incluyendo todas las simplificaciones necesarias para poder ser calculado con ambos procedimientos. Luego se fueron eliminando las hipótesis simplificativas de una por vez comparando los resultados con el caso de referencia. Los cálculos se realizaron para cuatro sistemas de generación de distinto tamaño y estructura y para tres niveles de confiabilidad con el objetivo de asegurar la validez de las conclusiones.

El cálculo considerando la inseguridad de los datos se realizó para dos tamaños de muestra distintos correspondientes a períodos de observación del comportamiento de operación de los componentes  $T_{N1} = 1a$  y  $T_{N2} = 5a$  respectivamente.

La figura 6 resume los resultados de esta investigación. En función de estos resultados se determinó que factores deben ser tenidos en cuen-

ta en el cálculo de reserva y qué datos son necesarios para ello [7, 8]. Los resultados de esta investigación pueden además ser utilizados para detectar posibilidades para disminuir la reserva necesaria.



- 1 Inseguridad del pronóstico de demanda
- 2 Inseguridad de los datos ( $T_{N1}=1a$ )
- 3 Distribución no exponencial<sup>N1</sup> de los tiempos de operación
- 4 Posponibilidad de las salidas de servicio forzadas
- 5 Inseguridad de los datos ( $T_{N2}=5a$ )
- 6 Distribución no exponencial<sup>N2</sup> de los tiempos de reparación

Fig. 6 Efectos sobre la reserva necesaria

#### Investigación del efecto de la prioridad para la asignación de reserva en sistemas interconectados

Una de las cuestiones importantes a resolver en el cálculo de reserva en sistemas interconectados es la vinculada con las prioridades para la asignación de la misma. Este problema se plantea para distribuir la reserva del sistema interconectado entre las áreas del mismo que eventualmente la puedan requerir al mismo tiempo. Frente a una contingencia en el sistema interconectado, la prioridad en el empleo de la reserva la tiene el área afectada por la contingencia. El problema que se plantea es el de decidir cómo se distribuiría la reserva disponible si se produjese una segunda contingencia en otra área del sistema interconectado.

Con el objeto de realizar una primera aproximación a la solución de este problema se estudiaron para el sistema compuesto por tres áreas interconectadas que muestra la figura 7 los siguientes casos extremos:

Caso 1: En este caso el área A bajo estudio tiene la primera prioridad

para el uso de la reserva. Esto significa que las áreas B y C apoyan al área A en caso de contingencia y sólo en caso de disponer de reserva adicional se apoyan entre sí.

Caso 2: En este caso el área A tiene la última prioridad, es decir, los sistemas B y C se apoyan mutuamente y recién luego de cubrir sus requerimientos apoyan al área A.

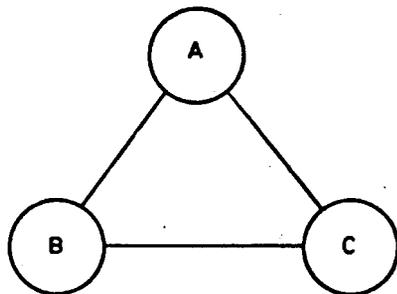


Fig. 7 Sistema interconectado utilizado para la investigación

Los resultados obtenidos muestran la necesidad de profundizar el estudio del problema ya que las diferencias en los valores de la probabilidad de déficit entre ambos casos extremos son de varios órdenes de magnitud. En los casos en que teniendo el sistema A la primera prioridad se obtienen valores de la probabilidad de déficit  $\text{Pr}(D) < 5.10^{-5}$  se observan incrementos muy pronunciados de la probabilidad de déficit en el caso de tener el área A la última prioridad, obteniéndose valores de hasta  $\text{Pr}(D) = 1,7.10^{-2}$ , es decir, una diferencia de casi tres órdenes de magnitud.

#### CONCLUSIONES

El presente trabajo presenta algoritmos para el cálculo de la reserva necesaria en sistemas de generación de energía eléctrica. Se describen un algoritmo simulativo basado en el método de Monte-Carlo y un algoritmo analítico consistente en obtener la distribución de probabilidad de la potencia fuera de servicio por falla a través de la convolución sucesiva de las funciones de probabilidad de falla de los bloques generadores. Este procedimiento analítico es luego ampliado para permitir la consideración de la inseguridad de los datos y el posible aporte de reserva de otras áreas del sistema interconectado.

En cada caso se mencionan las ventajas y limitaciones más relevantes de cada procedimiento.

En la última parte del trabajo se presentan, como ejemplos de aplicación, los resultados de investigaciones de importantes cuestiones vinculadas con el cálculo de reserva llevadas a cabo con los procedimientos descriptos. En primer lugar se muestran los resultados de una investigación comparativa de la influencia de distintos factores sobre la reserva necesaria. Estos resultados permiten deducir requerimientos de exactitud a los modelos y base de datos necesarios para la determinación de la reserva necesaria [7, 8].

Finalmente se muestran los primeros resultados obtenidos en la investigación de la posible influencia de las prioridades para la utilización de la reserva por parte de las distintas áreas de un sistema interconectado. Estos primeros resultados muestran que el estudio de este problema debe ser profundizado para llegar a una solución satisfactoria.

REFERENCIAS

- [1] Garcés, F., "Untersuchung der Einflussgrößen auf die notwendige Leistungsreserve bei der Tages-Kraftwerksbetriebsplanung", Tesis doctoral, Universidad de Aquisgrán (RWTH Aachen), República Federal de Alemania, 1982.
- [2] Cox, R., "Erneuerungstheorie". R. Oldenburg, Munich, 1966.
- [3] Garcés, F., "Cálculos de confiabilidad. Determinación de la reserva necesaria en sistemas eléctricos", Curso para graduados, Instituto de Energía Eléctrica, Universidad Nacional de San Juan, 1984.
- [4] Siemes, B., "Zur Berücksichtigung ungenauer Eingangsdaten bei der Zuverlässigkeitsberechnung von Systemen der elektrischen Energieversorgung", Tesis doctoral, Universidad de Aquisgrán (RWTH Aachen) República Federal de Alemania, 1980.
- [5] Edwin, K.W., Kochs, H-D., Traeder, G., "Untersuchung der Kraftwerksreserve im Verbundsystem", Westdeutscher Verlag, Opladen, 1979.
- [6] Garcés, F., Mercado, P., "Modelos y algoritmos para el cálculo del requerimiento de reserva operativa en sistemas de generación de energía eléctrica", 1a. Reunión nacional de sistemas eléctricos, Asociación Electrotécnica Argentina, Buenos Aires, 1985.
- [7] Edwin, K.W., Garcés, F., "Anforderungen an die Modellgenauigkeit und den Datenumfang für eine genauere Berechnung der Kraftwerksreserve", etz-Archiv, Vol. 6, 1984, pp. 17-23.
- [8] Garcés, F., "Requerimientos de exactitud a los modelos y base de datos necesarios para el cálculo de la reserva de generación", 1a. Reunión nacional de sistemas eléctricos, Asociación Electrotécnica Argentina, Buenos Aires, 1985.