

SERVICIOS DE INGENIERÍA DE CONFIABILIDAD

Colombia, Cali e-mail: rcmingeneiria@emcali.net.co

CONFIABILIDAD DE PLANTAS DE GENERACION

Ing. William M Murillo

Resumen:

En este artículo, se presenta una metodología para calcular la confiabilidad de componentes, sistemas y unidades de generación, así como el alcance de un sistema computacional para evaluar dicha confiabilidad. En el caso del cálculo de la confiabilidad de componentes y sistemas, el programa de cómputo no se limita a centrales eléctricas y puede utilizarse en otro tipo de sistemas.

Introducción:

El análisis de confiabilidad de componentes y sistemas complejos ha sido aplicado en diversas ramas de la ingeniería, entre las que se destacan la aeronáutica y las plantas eléctricas. En la actualidad, el análisis de confiabilidad se está utilizando en las plantas termoeléctricas y plantas petroquímicas, entre otras, para pronosticar posibles problemas en los sistemas que las conforman, así como para mejorar su funcionamiento, contribuyendo en la programación del mantenimiento preventivo de los componentes y sistemas que integran dichas plantas.

El análisis de confiabilidad también puede aplicarse en los componentes y sistemas de las plantas de generación hidroeléctrica para mejorar su funcionamiento.

Confiabilidad:

La confiabilidad de un componente, sistema o unidad se puede definir como la probabilidad de que dicha entidad pueda operar durante un periodo determinado (tiempo misión) sin pérdida de su función.

Confiabilidad de Componentes:

Modelo Exponencial

Para el cálculo de la confiabilidad de componentes se puede utilizar una distribución exponencial, asumiendo que el componente se encuentra en su etapa de vida útil, en la cual la tasa de fallas es constante.

Con estas suposiciones, la confiabilidad de un componente se puede expresar como:

$$\begin{aligned} R(t) &= 1 - \int_0^t \lambda e^{-\lambda s} ds \\ &= 1 - [1 - e^{-\lambda t}] \\ &= e^{-\lambda t} \end{aligned}$$

Donde :

SERVICIOS DE INGENIERÍA DE CONFIABILIDAD

Colombia, Cali e-mail: rcmingeneiria@emcali.net.co

$R(t)$ = confiabilidad del componente en función del tiempo.

T = tiempo de misión o tiempo real de operación del periodo de tiempo considerado.

λ = tasa de fallas

e = base de los logaritmos neperianos (2.718281 ...)

En algunos problemas, en vez de conocer el tiempo total real de operación T , se conoce el tiempo entre fallas, lo cual permite el cálculo del tiempo real de operación. Con esta información se puede probar si el mejor ajuste para los datos disponibles es el modelo exponencial o algún otro modelo de *Weibull*.

Modelo Weibull

Para el modelo *Weibull* (*Weibull 1960*) la función de densidad de probabilidad de falla se expresa como:

$$F(T) = 1 - e^{-\left(\frac{T}{\eta}\right)^{\beta}}$$

Donde :

η = parámetro de forma

β = parámetro de escala

$F(t)$ = función de densidad de probabilidad de falla.

T = tiempo entre fallas.

En general, para el cálculo de la confiabilidad con el modelo expresado por la ecuación anterior, la función $F(t)$ únicamente se evalúa con dos parámetros. Con lo cual se obtienen resultados aceptables para fines prácticos.

Confiabilidad de un Sistema en Serie:

Si es un sistema en serie se supone que los n componentes son independientes, es decir, que el comportamiento de alguno de ellos no afecta la confiabilidad de los restantes, su confiabilidad puntual puede calcularse como :

$$R_s = \prod_{i=0}^n R_i$$

R_i = confiabilidad del i - ésimo componente.

R_s = confiabilidad del sistema en serie.

Confiabilidad de un Sistema en Paralelo (sistemas con redundancia)

Los sistemas de n componentes independientes conectados en paralelo, en general funcionan satisfactoriamente con m de los n componentes en operación, mientras que los demás son redundantes y únicamente se requiere que alguno de los $n - m$

SERVICIOS DE INGENIERÍA DE CONFIABILIDAD

Colombia, Cali e-mail: rcmingeneiria@emcali.net.co

componentes sustituya a cualquiera de los que están en operación cuando por alguna razón fallen. se define como:

$$RS = 1 - [(1 - R1) \times (1 - R2) \times \dots \times (1 - Rn)]$$

Una forma de clasificar los sistemas en paralelo sujetos a mantenimiento e la siguiente [EPRI AP – 5974, 1988]:

- a) Sistemas en paralelo con mantenimiento de sus componentes mientras el sistema esta operando.
- b) Sistemas en paralelo con mantenimiento de sus componentes únicamente cuando el sistema esta fuera de servicio.

Los sistemas en paralelo con mantenimiento de sus componentes cuando el sistema se encuentra en operación son los que más se aproximan a los sistemas reales de las centrales generadoras.

Para llevar a cabo el calculo de la confiabilidad de los sistemas en paralelo con mantenimiento durante la operación, es necesario diferenciar los casos en los cuales los elementos redundantes se encuentran en reserva activa o pasiva. Estos sistemas se agrupan de acuerdo con el numero de componentes requeridos en operación como se muestra en el cuadro 1 [EPRI AP – 5974, 1988]:

En las expresiones dadas en el cuadro 1 para evaluar la confiabilidad, se asume lo siguiente:

- La activación de un componente que se encuentra en reserva es completamente confiable; es decir la probabilidad de que el sistema de activación falle es nula.
- Los componentes tienen las mismas tasas de falla y reparación

Los resultados obtenidos con las ecuaciones anteriores son aproximados.

Confiabilidad de un Sistema Compuesto

La confiabilidad de un sistema compuesto por componentes conectados en serie y en paralelo puede calcularse en dos pasos:

- Reducir el sistema compuesto a uno equivalente en serie. Esto quiere decir que cada uno de los grupos de componentes conectados en paralelo se reducirán a un elemento equivalente conectado en serie con los componente restantes del sistema.
- Aplicar las reglas dadas para un sistema en serie para obtener la confiabilidad del sistema equivalente.

SERVICIOS DE INGENIERÍA DE CONFIABILIDAD

Colombia, Cali e-mail: rcmingeneiria@emcali.net.co

Confiabilidad de una planta de generación

Confiabilidad de componentes

El cálculo de la confiabilidad del componente se puede obtener por medio de los siguientes pasos:

- Los datos de tiempo entre fallas se ordenan en forma creciente y se etiquetan con los números del uno hasta n , donde n corresponde al número de fallas.
- Se estima la función de densidad de probabilidad de falla $F(t)$ utilizando el criterio de Blom u otro [Mandel, J., 1984]. se calcula la confiabilidad $R(t)$ para los datos discretos con $1-F(t)$.
- Se ajusta una curva continua para los datos discretos, utilizando una distribución exponencial o distribución *Weibull*. Utilícese el mejor ajuste como modelo definitivo de confiabilidad $R(t)$.

EN LA ACTUALIDAD EL ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD SE ESTA UTILIZANDO EN LAS PLANTAS TERMOELÉCTRICAS Y PLANTAS PETROQUÍMICAS, ENTRE OTRAS, PARA PRONOSTICAR POSIBLES PROBLEMAS EN LOS SISTEMAS QUE LAS CONFORMAN, ASÍ COMO PARA MEJORAR SU FUNCIONAMIENTO, CONTRIBUYENDO EN LA PROGRAMACIÓN DEL MANTENIMIENTO PREVENTIVO DE LOS COMPONENTES Y SISTEMAS QUE INTEGRAN DICHAS PLANTAS.

Confiabilidad de sistemas:

Un sistema se integra por un conjunto de componentes conectados en serie, en paralelo o por una combinación de ambos. La confiabilidad del sistema integrado se puede calcular reduciendo los componentes de los subsistemas en paralelo a un componente equivalente. Para la reducción del subsistema en paralelo a un componente equivalente se requiere conocer el tipo de redundancia que conforma al subsistema en paralelo. Para llevar a cabo este cálculo, se considerarán de únicamente los casos de redundancia mostrados en el cuadro 1, debido a que con estos esquemas se contemplan la mayoría de los sistemas de las centrales hidroeléctricas. El procedimiento [para el cálculo de la confiabilidad del sistema es el siguiente:

- Calcular la confiabilidad de los componentes del sistema conectados en serie
- Calcular la confiabilidad de subsistemas redundantes de acuerdo con la configuración descrita en el cuadro 1.
 - Calcular la tasa de fallas λ_i de cada uno de los componentes de la redundancia
 - Calcular la tasa de reparación μ_i de cada uno de los componentes

SERVICIOS DE INGENIERÍA DE CONFIABILIDAD

Colombia, Cali e-mail: rcmingeneiria@emcali.net.co

- de la redundancia
- Calcular la tasa de fallas del sistema equivalente λ .
- Calcular la tasa de reparación del sistema equivalente μ .
- Calcular la inconfiabilidad $I(t)$ del sistema equivalente, en función de λ y μ de acuerdo con la ecuación propuesta en el cuadro 1.
- Calcular la confiabilidad del sistema equivalente en función de la inconfiabilidad.
- Calcular la confiabilidad del sistema por medio del producto de los componentes en serie y de los subsistemas redundantes.

Confiabilidad de Unidades:

La confiabilidad de una unidad generadora (turbogenerador) se puede calcular por medio del modelo exponencial, considerando a la unidad generadora como un componente. En este modelo, se supone que la unidad generadora se encuentra en su vida útil. Para la aplicación del modelo exponencial se requiere información para evaluar la tasa de fallas.

Este parámetro depende del número de fallas que ocurren en el periodo, considerando, así como del tiempo real de operación de la unidad en el mismo lapso. Los datos necesarios para calcular el tiempo real de operación son las horas del periodo, las horas equivalentes que la unidad está fuera de servicio por fallas, las horas equivalentes que la unidad está fuera de servicio por mantenimiento programado, las horas equivalentes fuera de servicio por mantenimiento excedidas, las horas equivalentes fuera de servicio por causas externas, el número de mantenimientos excedidos y el número de fallas, en función de los cuales se calcula la confiabilidad de una unidad generadora.

Ejemplos de Aplicación:

Calculo de la Confiabilidad de un Sistema

Para aplicar la metodología en el nivel de componentes y sistemas se considera un sistema que consta de cinco componentes, tres de los cuales forman una redundancia, mientras que las dos restantes se encuentran conectados en serie como se muestra en la figura 1. En el cuadro 2 se presentan los datos de los cinco componentes que integran el sistema. El subsistema formado por los componentes C₂, C₃ y C₄, se reduce a un componente equivalente conectado en serie con los componentes C₁ y C₅, y la confiabilidad del sistema completo se evalúa por medio del producto de la confiabilidad de los componentes en serie. Para todos los componentes se considera un tiempo de misión o de trabajo de 100 y 250 horas.

Los resultados de confiabilidad para cada uno de los componentes y del sistema se presentan en el cuadro 3.

SERVICIOS DE INGENIERÍA DE CONFIABILIDAD

Colombia, Cali e-mail: rcmingeneiria@emcali.net.co

Para todos los componente, se aplica el modelo de *Weibull*.. Por esta razón, se presentan unicamente los coeficientes α y β correspondientes al modelo de *Weibull*. En la grafica 2, también se presentan las confiabilidades calculadas por el programa de computadora para los componentes de manera individual y para el sistema integrado por dichos componentes.

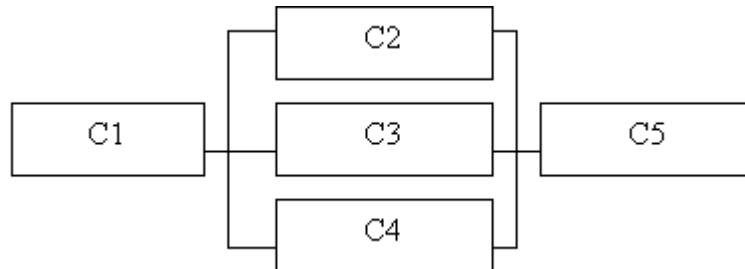


Figura 1: sistema serie-paralelo

En la figura 2 se muestra la variación de la confiabilidad particular en función del tiempo de los cinco componentes. En ella se observa que el componente C5 es el mas confiable, mientras que el C1 tiene la menor confiabilidad. También se presenta la confiabilidad resultante del sistema.

Componente	Numero de Fallas	Tiempo entre fallas (horas)	Numero de reparaciones	Tiempo de Reparacion (horas)
C1	4	230 200 140 100	0	
C2	4	250 780 2012 1349	2	2 10
C3	4	260 185 533 458	3	5 8 8
C4	4	330 190 890 210	3	10 10 10
C5	3	4546 6730 3201		

Cuadro1: Cuadro de datos de los componentes del sistema.

SERVICIOS DE INGENIERÍA DE CONFIABILIDAD

Colombia, Cali e-mail: rcmingeneiria@emcali.net.co

Estos resultados permiten, entre otras cosas, determinar que componentes del sistema presentan un funcionamiento deficiente, lo cual puede servir para comparar su desempeño relativo con otros componentes y sistemas similares.

Calculo de la confiabilidad de unidades (turbogeneradores):

Para mostrar la aplicación de la metodología para el calculo de la confiabilidad de una unidad hidroeléctrica, se consideran los datos estadísticos de tres turbogeneradores que forman parte de una central hidroeléctrica, de los cuales se conocen el numero de fallas y el numero de mantenimientos excedidos, así como el tiempo real de operación en un periodo determinado.

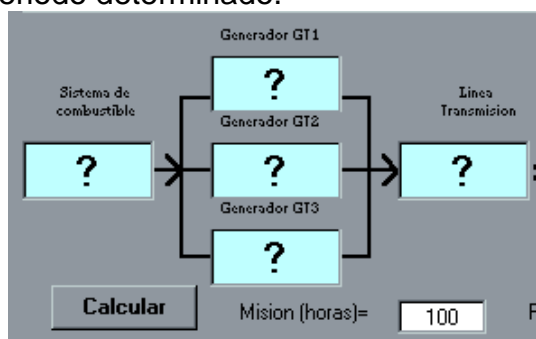


figura 2: grafica de bloques para el calculo de la confiabilidad

Calculo individual de los componentes:

Usando la distribucion weibull se obtienen los siguientes resultados para cada componente:

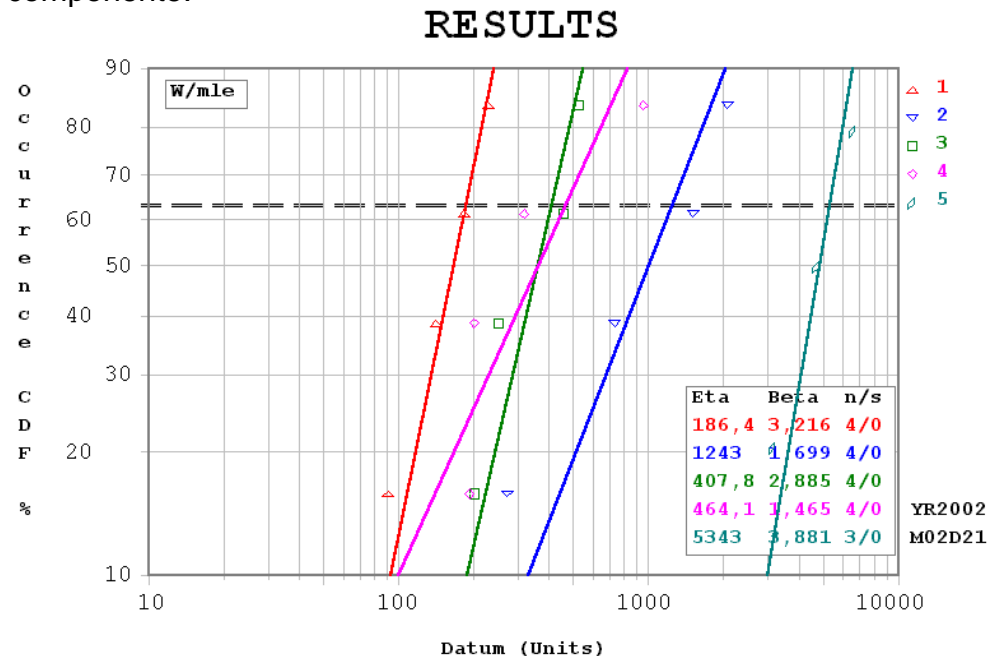


figura 3: Calculo de la confiabilidad por camponente.

SERVICIOS DE INGENIERÍA DE CONFIABILIDAD

Colombia, Cali e-mail: rcmingeneiria@emcali.net.co

Resumen de los datos para alimentar la simulacion:

Sistema	Exp	Wbl	Distr. Expon.	Distribucion Weibull		MTBF
			fallas/hora	Beta=forma	Alfa=Vida	horas/falla
COMB	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>		2.54	182.6	165,63
GEN1	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>		1.12	1351	1.299,90
GEN2	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>		2.27	409.2	368,62
GEN3	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>		1.56	445.3	403,00
LINEA	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>		2.61	5491	4.991,35

figura 4: Resumen de datos de los componentes

En el figura 4 se muestran los datos de los parametros Eta y Beta que corresponden al comportamiento de falla de cada componente, dichos datos, se modelan bajo Simulador montecarlo y se obtiene la confiabilidad del sistema para un tiempo o una mision determinada, para nuestro caso la mision es de 100 horas y 250 horas.

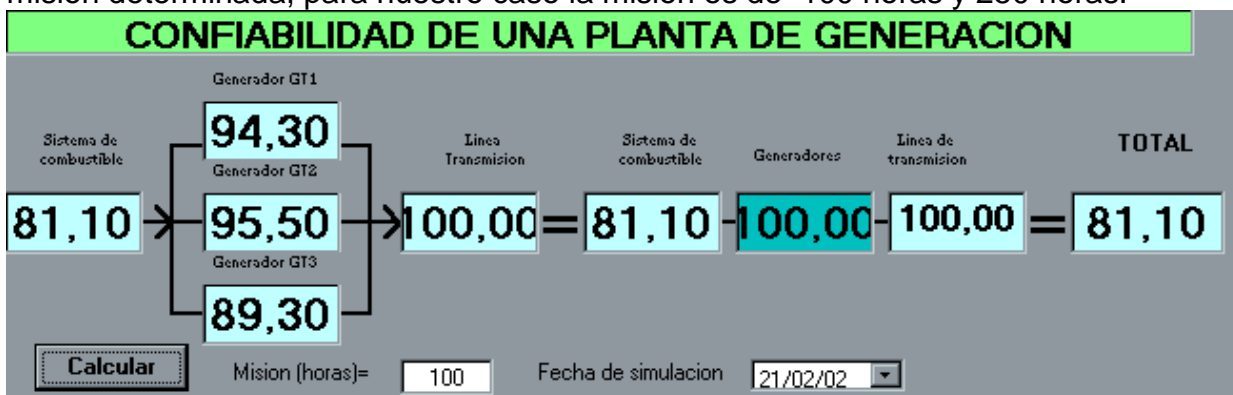


figura 5: Calculo de la confiabilidad para una mision de 100h, la confiabilidad total es 81.1%

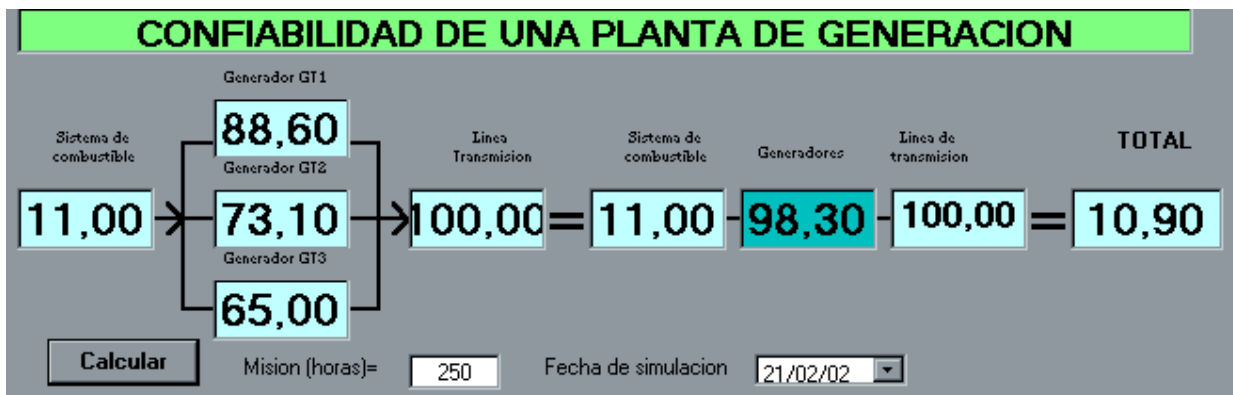


figura 6: Calculo de la confiabilidad para una mision de 250h, se observa que la confiabilidad baja a 10.92%

SERVICIOS DE INGENIERÍA DE CONFIABILIDAD

Colombia, Cali e-mail: rcmingeneiria@emcali.net.co

En las figura 5 y 6 se muestra la variación de la confiabilidad en función del tiempo para los tres generadores; en ella se observa que el mejor generador es el numero 1 (el más confiable), mientras que el numero 3 tiene la confiabilidad mas baja de los tres (el menos confiable) igualmente el sistema de combustible es el componente que presenta la menor confiabilidad y domina la confiabilidad del sistema.

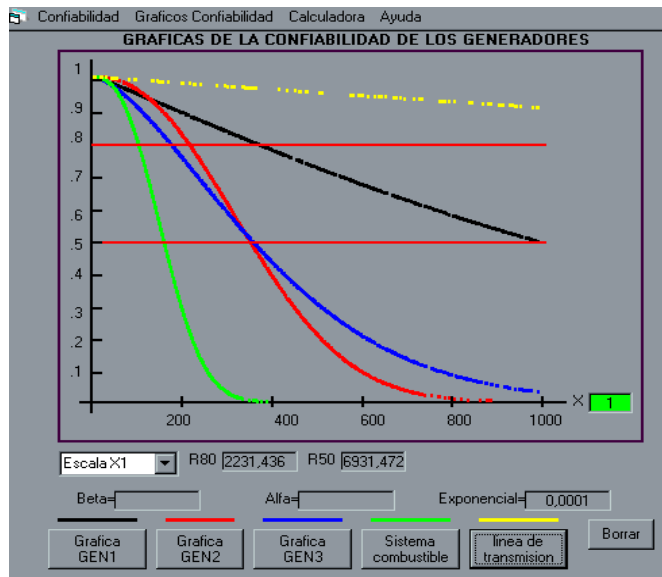


Figura 7: Confiabilidad de los componentes

En la figura 7 se muestra una grafica de la variación de la confiabilidad en función del tiempo de los cinco componentes de manera independiente.

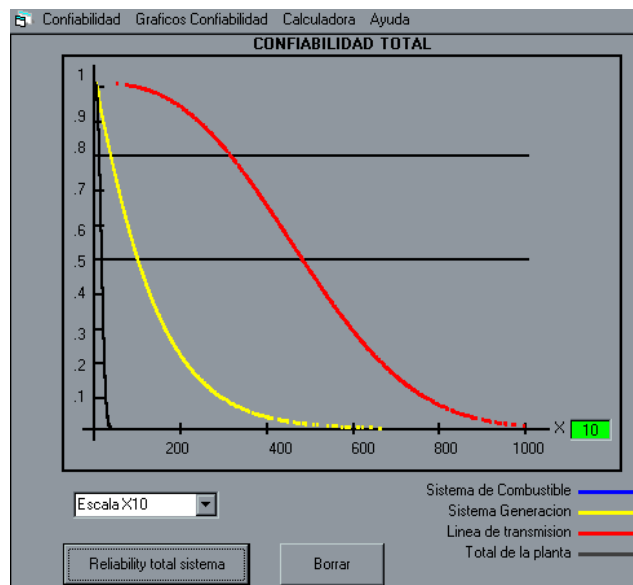


figura 8: calculo de la confiabilidad total y por sistemas

SERVICIOS DE INGENIERÍA DE CONFIABILIDAD

Colombia, Cali e-mail: rcmingeneiria@emcali.net.co

Se observa en la figura 7, que el componente 1, sistema de combustible, tiene la mas baja confiabilidad del sistema, para un tiempo de 101 horas la confiabilidad es del 80% y para 158h el componente se encuentra en 50% y para 400h h la confiabilidad de componente t del sistema cae ha cero porciento, esto indica que para la gestion del mantenimiento este componente debe ser analizado con detalle, realizandose analisis de fallas, paretos, revision de las rutinas y frecuencias del mantenimiento.

El calulo de la confiabilidad total esta mostrado en la figura 8, donde el sistema de combustible domina la pardida de la funcion de toda la planta.

Conclusiones

- En este artículo se presentó e ilustró con ejemplos, una forma de calcular la confiabilidad de sistemas con redundancia sujetos a mantenimiento y unidades genradoras. El método, aunque aproximado para calcular la confiabilidad de sistemas con redundancias, proporciona resultados prácticos que pueden tener una aplicación inmediata.
- Se presento el alcance y resultados de un sistema computacional para calcular la confiabilidad de arreglos multicomponentes, el cual no esta limitado a componentes y sistemas de generacion.
- La utilidad de los resultados obtenidos es muy variada, dependiendo de los objetivos propuestos. Algunos de los cuales son:
 - Permite establecer bandas de confiabilidad de los sistemas y unidades hidro o termoeléctricas, con la finalidad de establecer metas de desempeño realistas.
 - Identifica los equipos o sistemas que se encuentran en estado de desgaste o envejecimiento.
- Ayuda en la implantación del mantenimiento preventivo o mejorar las frecuencias de las rutinas del mantenimiento preventivo

Referencias

Endrenyi, J.(1980) Reliability Modeling in electrical power system. John Wiley & Son

Green A; Bourne, A. (1978) Reliability Technology. John Wiley & Son

Henley E, Kumamoto H. (1981), Reliability Engineering and risk assessment. Prentice-Hall, Inc

Abernethy, R. (1998). The New Weibull Handbook.