

Selection of components to be repaired, according to failure, redundancy and uncertainty to improve system reliability.

Esteban Lemaitre González, Dr-Ing, ,
Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica, elemaitre@itcr.ac.cr

Abstract— *This paper presents the evaluation of the present and future capacity of a redundant system to perform the productive tasks assigned in the production planning.*

The evaluation takes the elements presented by [8] with a generic function that takes a multi-component system, and based on the local forecast of its components, the management of the inaccuracies and uncertainties of these forecasts evaluates the reliability of a system.

The evaluation method considers the structural relationships that exist between the multiple components of a redundant system, but also considers the different states of health of its components and system functions, as well as the uncertainty of its local forecasts.

From this assessment, various indicators of operation, failure, loss of redundancy, out of order, etc. are derived, which together with the propagation of uncertainty assists decision making for maintenance management in cooperation with production planning.

Verification and validation of the usefulness of a generic function (GF) for decision making was achieved.

The proposed model allows predicting the propagation of component failures and their effects on the operation of the system entities. Its contribution to production systems will be greater when applied to a real case of production system.

Key words: *reliability, capacity, failure, redundancy, uncertainty.*

I. INTRODUCCIÓN

Para mejorar su competitividad, las empresas siempre necesitan más flexibilidad y capacidad de respuesta. Esto los lleva a invertir en sistemas técnicos cada vez más complejos y costosos para la producción de bienes o servicios. Por lo tanto, uno de los principales retos para las empresas es mantener estos sistemas funcionando con el mayor nivel de disponibilidad al menor costo. La implementación de los conceptos de Mantenimiento Basado en la Condición (CBM) y Gestión del Pronóstico y la Salud (PHM) generalmente conduce a mejorar la disponibilidad de los equipos y a reducir los costos de mantenimiento [1, 2 y 3].

El CBM y el PHM permiten optimizar el mantenimiento programando las reparaciones y sustituciones necesarias de los componentes técnicos del sistema en función de su estado de salud actual y futuro. Además, muchos estudios, como menciona Desforges en [4], que se ocupan del pronóstico se centran en la evaluación de los RUL de los componentes (por ejemplo, rodamientos de bolas, trenes de engranajes, pantógrafos de trenes, sistemas de frenado, baterías, etc.).

Sin embargo, la implementación de CBM y PHM también requiere la evaluación del estado de salud completo del sistema, así como el apoyo a la toma de decisiones para la planificación del mantenimiento [5, 6] y la programación de la producción que preferiblemente deben realizarse conjuntamente [7].

La evaluación de la salud futura de un sistema técnico necesita información relacionada con el diagnóstico y pronóstico de sus componentes. Esta información, particularmente la relacionada con el pronóstico, es inexacta o incierta porque se basa en técnicas de predicción. Por lo tanto, esta evaluación requiere el manejo de estas imprecisiones e incertidumbres.

En este sentido, [8] propone los primeros elementos de una función genérica que evalúa la capacidad de los sistemas técnicos multicomponente para llevar a cabo futuras tareas asignadas por la planificación de la producción.

La evaluación de los estados de salud futuros es la piedra angular del PHM. Muchos sistemas técnicos de producción están formados por numerosos componentes que ejecutan sus funciones.

[8] Propone un método para evaluar la capacidad de los sistemas multicomponentes para llevar a cabo futuras tareas de producción, con el fin de proporcionar soportes de decisión para la planificación de la producción y el mantenimiento para un mejor compromiso entre sus objetivos.

Basado en los pronósticos de los componentes, [8] trata las incertidumbres inherentes a estos pronósticos, el método se basa en la teoría de Dempster-Shafer y en inferencias de redes bayesianas. Los pronósticos locales se clasifican y transforman para que se ajusten a la teoría de Dempster-Shafer.

Se identifican patrones de sistemas para los que se definen inferencias. Estos patrones permiten modelar sistemas y evaluar sus capacidades para realizar tareas futuras.

De esta forma se identifican los componentes que deben someterse primero a mantenimiento. Se presenta un ejemplo de aplicación de un sistema Multiprocesador Redundante tomado de [9], para mostrar cómo pueden utilizarse las ayudas a la toma de decisiones proporcionadas con fines de planificación de la producción y el mantenimiento.

[8] presenta un breve análisis de las teorías que tratan sobre las imprecisiones e incertidumbres de los datos y la importancia de la Teoría de Dempster-Shafer (DST), también

conocida como teoría de la evidencia, para el tema en cuestión.

[8] utiliza un modelo para identificar los marcos, como la relación entre componentes y/o funciones. Para ello, modela los sistemas técnicos y, en particular, las relaciones entre los subsistemas, los componentes y las funciones para adaptar la función genérica.

Luego [8] muestra los tratamientos resultantes para evaluar la capacidad de los componentes y funciones técnicas del sistema para llevar a cabo tareas futuras de acuerdo con el modelo del sistema y los pronósticos locales.

Partiendo de esta Función Genérica (FG), la primera parte de este capítulo trata el modelo de simulación para con el sistema de procesadores redundantes.

La segunda parte será para definir las condiciones iniciales

La tercera parte será para el análisis e interpretación de los resultados.

Finalmente, se extraen conclusiones de estos resultados y se presentan las perspectivas de desarrollo de este trabajo.

II. MODELACIÓN DEL SISTEMA

En esta sección se muestra cómo se aplica la función genérica para calcular la fiabilidad del sistema en estudio. Para la evaluación de la capacidad del sistema, simularemos en el software ARENA el Sistema Multiprocesador Redundante tomado de [9].

Para el ejemplo, se presenta la función genérica que modela la fiabilidad del sistema y se muestran los correspondientes resultados sobre las asignaciones de creencias básicas para los Estados {OK, F, OO, FOO, LR, KO}, la Transformación pignística (BetP), la Identificación del componente "Ci" a reparar, y la Propagación en el Sistema {OK, KO, "OK; KO"} brindados por [8].

Se proponen diferentes escenarios para mostrar los resultados que proporciona y cómo estos indicadores pueden ser utilizados por la planificación del mantenimiento y de la producción.

Se presentan el sistema multicomponente, para mostrar el cálculo de los pronósticos tomando en cuenta sus diferentes estados de falla, pérdida de redundancia e incertidumbre de sus componentes o funciones.

El Sistema Multiprocesador Redundante es representado en la Fig.- 1, los componentes están constituidos por 4 Discos Duros (D11, D12, D21 y D22), 3 memorias (M1, M2 y M3), dos procesadores (P1 y P2) el Bus PS1 y la Fuente de Poder N; luego se conforman las Funciones en Paralelo D1, D2, M13, M23, S12; las Funciones en Serie S1, S2 y SFY4. Su reducido número de componentes facilita su comprensión.

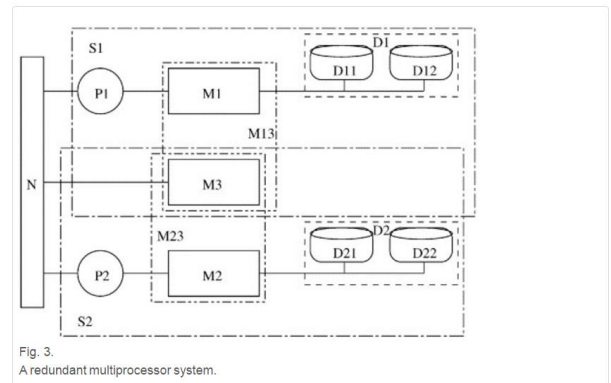


Fig. 3. A redundant multiprocessor system.

Fig.- 1. Sistema Multiprocesador Redundante

El objetivo es mostrar la capacidad de la Red Evidencial para calcular la fiabilidad del sistema. La Red Bayesiana del sistema multiprocesador redundante (Fig.- 2), se traduce en el Software ARENA para la propagación de las asignaciones de creencias básicas de acuerdo con las masas condicionales definidas en Cuadros en [8]. La Red Evidencial correspondiente se presenta en la Fig.- 2.

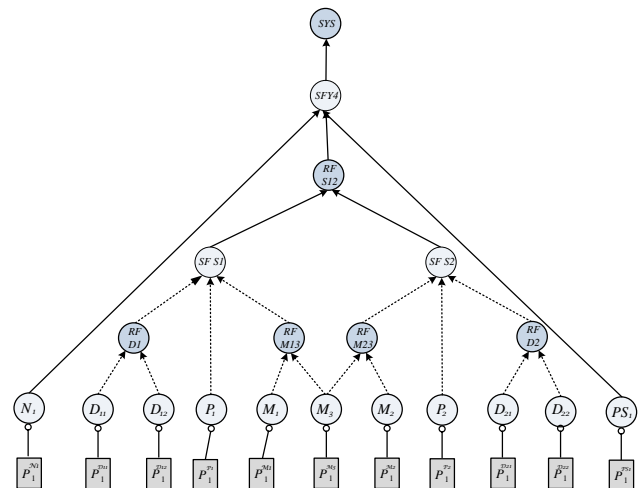


Fig.- 2. Diagrama de Confiabilidad del Sistema Multiprocesador Redundante

Este modelo se estudió para la fiabilidad de componentes en los que surge la pérdida de redundancia y la incertidumbre epistémica.

Para la modelización de este sistema Redundante, se establecen las equivalencias entre las entidades del diagrama de la Fig.- 2 y los patrones que se muestran en la Cuadro 1.

III. CONDICIONES INICIALES

CUADRO 1.
EQUIVALENCIAS ENTRE ELEMENTOS DEL DIAGRAMA DE
PUERTAS LÓGICAS, PATRONES Y BLOQUES ARENA. [8]

Élément de diagrammes à portes logiques	« Pattern »	ARENA
Up	OK	OK
$Down$	KO	KO
$\{Up, Down\}$	$\{OK, KO\}$	$\{OK, KO\}$

Cada componente del Sistema Redundante sólo puede estar en dos estados disjuntos OK y KO. Los sucesos elementales de las fallas hacen que el componente C_i pase del estado OK al estado KO y se suponen independientes y el sistema es homogéneo.

Utilizando el diagrama de la Fig.- 2 y las equivalencias de la Cuadro 1, se construye un modelo de fiabilidad del sistema redundante para calcular la fiabilidad del sistema en su conjunto. Este modelo se muestra en la Fig.- 3.

En el modelo del sistema Redundante de la Fig.- 3, el número de componente es el número de pronóstico local del componente, RF_i es la redundancia i , SF_j es la función serie j y $SFY4$ representa el sistema completo.

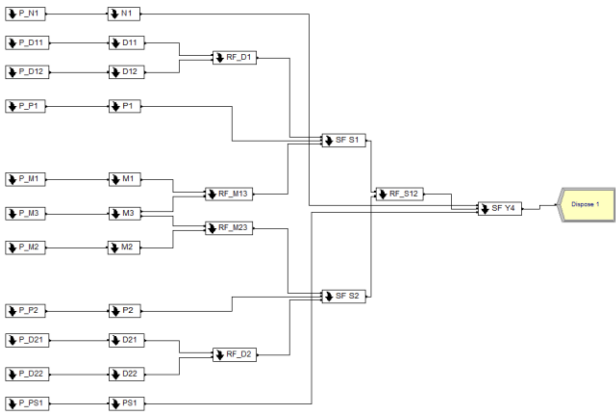


Fig.- 3. Modelo del sistema multiprocesador Redundante elaborado con bloques de software ARENA

Partiendo del modelo de simulación de la Fig.- 3, se presentan los valores de los pronósticos locales de los componentes para los 6 escenarios, según la Cuadro 2.

CUADRO 2.
VALORES DE CREENCIA PARA TODOS LOS COMPONENTES

Escenario	1	2	3	4	5	6
bba	Todos los pronósticos P1 hasta P12	P11 y P22	D11, D21 y M3	D11 y M2	P11	P22
(OK)	0.99677	0.99967	0.99967	0.99000	0.99177	0.99333
(KO)	0.00333	0.00033	0.00033	0.01000	0.00833	0.00667
(OK, KO)	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.20000

La FG se ejecuta para cada escenario y basada en los valores de las creencias de sus pronósticos locales con una tarea que dura $(te - t0) = 300$ UT (Unidades de Tiempo).

El escenario 1 es conocido como escenario de referencia. Y los pronósticos locales de los componentes se parametrizan de forma que se obtenga la estructura de creencias.

IV. RESULTADOS E INTERPRETACIÓN

En el primer escenario de referencia se obtuvo la siguiente Cuadro 3 de resultados:

CUADRO 3.
VALORES OBTENIDOS PARA EL SISTEMA GENERAL EN EL ESCENARIO 1.

Componet	#	OK	F	OO	FOO	LR	KO	{OK, KO}
N1	5	0.5134	0.4866	0.0000	0.0000	-	-	P_N1 0.5134 0.486583 0.0000
D11	18	0.5134	0.4866	0.0000	0.0000	-	-	P_D11 0.5134 0.486583 0.0000
D12	19	0.5134	0.4866	0.0000	0.0000	-	-	P_D12 0.5134 0.486583 0.0000
P1	3	0.5134	0.4866	0.0000	0.0000	-	-	P_P1 0.5134 0.486583 0.0000
M1	15	0.5134	0.4866	0.0000	0.0000	-	-	P_M1 0.5134 0.486583 0.0000
M3	14	0.5134	0.4866	0.0000	0.0000	-	-	P_M3 0.5134 0.486583 0.0000
M2	13	0.5134	0.4866	0.0000	0.0000	-	-	P_M2 0.5134 0.486583 0.0000
P2	4	0.5134	0.4866	0.0000	0.0000	-	-	P_P2 0.5134 0.486583 0.0000
D21	6	0.5134	0.4866	0.0000	0.0000	-	-	P_D21 0.5134 0.486583 0.0000
D22	7	0.5134	0.4866	0.0000	0.0000	-	-	P_D22 0.5134 0.486583 0.0000
PS1	2	0.5134	0.4866	0.0000	0.0000	-	-	P_PS1 0.5134 0.486583 0.0000

Function	#	OK	F	OO	FOO	LR	KO	{OK, KO}
RF_D1	20	0.2636	-	-	-	0.4996	0.2368	D11 0.7632 0.236763 0.0000
RF_D2	21	0.2636	-	-	-	0.4996	0.2368	D21 0.7632 0.236763 0.0000
RF_M1	1	0.2636	-	-	-	0.4996	0.2368	M1 0.7632 0.236763 0.0000
RF_M2	16	0.2636	-	-	-	0.4996	0.2368	M3 0.7632 0.236763 0.0000
SF_S1	22	0.2991	-	-	-	-	0.7009	P1 0.2991 0.700919 0.0000
SF_S2	23	0.2991	-	-	-	-	0.7009	P2 0.2991 0.700919 0.0000
RF_S1	24	0.0894	-	-	-	0.4193	0.4913	P1 0.5087 0.491287 0.0000
SF_Y4	27	0.1341	-	-	-	-	0.8659	P1 0.1341 0.865905 0.0000

La FG indica que para reducir la falla mayor del sistema (0.8659) se debe reparar P1 y P2 y si se desea reducir la pérdida mayor de redundancia del sistema (0.4996) se debe reparar los discos o las memorias; esta selección es gracias a los estados de falla y perdida de redundancia, que si se analiza a nivel individual por componentes todos tienen la misma falla.

Esto quiere decir que, si mejoramos los procesadores, reduce la falla del sistema y si mejoramos los discos o memorias, se reduce la pérdida de la redundancia. Este tipo de información es un apoyo al rediseño del sistema para hacerlo más robusto. En la Fig.- 4 se puede ver los diferentes estados del sistema general.

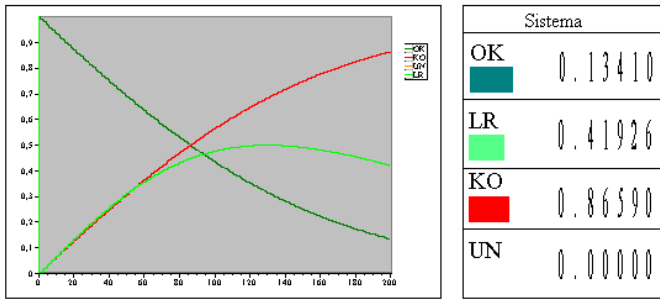


Fig.- 4. Diferentes estados del sistema general.

Para el Escenario 2 se reparan los dos procesadores P1 y P2, con $(KO)= 0,00033$ en el cual se reduce la Falla del sistema, pero no la redundancia mayor del sistema, el cual se puede ver en la Cuadro 4 y sus diferentes estados del sistema general en la Fig.- 5.

CUADRO 4.
VALORES OBTENIDOS PARA EL SISTEMA GENERAL EN EL ESCENARIO 2.

Function	#	OK	F	OO	FOO	LR	KO	#	OK	KO	{OK,KO}
RF_D1	20	0.2636	-	-	-	0.4996	0.2368	D11	0.7632	0.236763	0.0000
RF_D2	21	0.2636	-	-	-	0.4996	0.2368	D21	0.7632	0.236763	0.0000
RF_M1	1	0.2636	-	-	-	0.4996	0.2368	M1	0.7632	0.236763	0.0000
RF_M2	16	0.2636	-	-	-	0.4996	0.2368	M3	0.7632	0.236763	0.0000
SF_S1	22	0.5458	-	-	-	0.4550	0.4550	D11	0.5450	0.455038	0.0000
SF_S2	23	0.5458	-	-	-	0.4550	0.4550	M3	0.5450	0.455038	0.0000
RF_S1	24	0.2970	-	-	-	0.4960	0.2071	D11	0.7929	0.207060	0.0000
SF_Y4	27	0.2090	-	-	-	-	0.7910	N1	0.2090	0.790983	0.0000

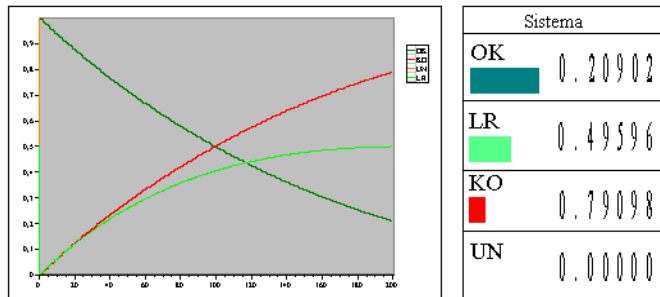


Fig.- 5. Diferentes estados del sistema general.

Para el Escenario 3 continua con las condiciones del escenario 2, pero se reparan los componentes D11, D21 y la memoria M3 con $(KO)= 0,00033$; en el cual se reduce la redundancia mayor del sistema, así como la Falla del sistema. Los valores se pueden ver en la Cuadro 5 y sus diferentes estados del sistema general en la Fig.- 6.

CUADRO 5.
VALORES OBTENIDOS PARA EL SISTEMA GENERAL EN EL ESCENARIO 3.

Function	#	OK	F	OO	FOO	LR	KO	#	OK	KO	{OK,KO}
RF_D1	20	0.4803	-	-	-	0.4883	0.0314	D12	0.9686	0.031381	0.0000
RF_D2	21	0.4803	-	-	-	0.4883	0.0314	D22	0.9686	0.031381	0.0000
RF_M1	1	0.4803	-	-	-	0.4883	0.0314	M1	0.9686	0.031381	0.0000
RF_M2	16	0.4803	-	-	-	0.4883	0.0314	M2	0.9686	0.031381	0.0000
SF_S1	22	0.8777	-	-	-	0.1223	0.8777	P1	0.8777	0.122286	0.0000
SF_S2	23	0.8777	-	-	-	0.1223	0.8777	P2	0.8777	0.122286	0.0000
RF_S1	24	0.7704	-	-	-	0.2147	0.0150	P1	0.9850	0.014954	0.0000
SF_Y4	27	0.2597	-	-	-	0.7403	-	N1	0.2597	0.740345	0.0000

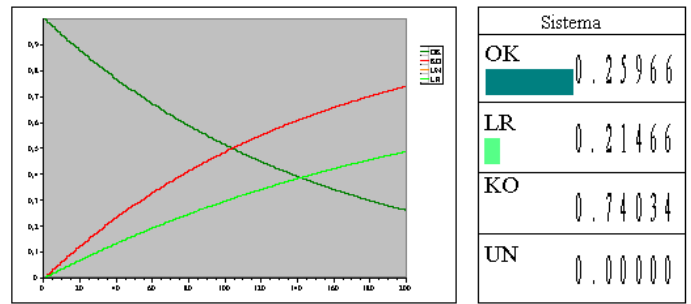


Fig.- 6. Diferentes estados del sistema general.

Para el Escenario 4 volvemos al escenario de referencia, y aceleramos la falla del D11 y M2 en con $(KO)= 0,0100$, el cual se puede ver en la Cuadro 6.

CUADRO 6.
VALORES OBTENIDOS PARA EL SISTEMA GENERAL EN EL ESCENARIO 4.

Component	#	OK	F	OO	FOO	LR	KO	#	OK	KO	{OK,KO}
N1	5	0.5134	0.4866	0.0000	0.0000	-	-	P_N1	0.5134	0.486583	0.0000
D11	18	0.1353	0.8647	0.0000	0.0000	-	-	P_D11	0.1353	0.864665	0.0000
D12	19	0.5134	0.4866	0.0000	0.0000	-	-	P_D12	0.5134	0.486583	0.0000
P1	3	0.5134	0.4866	0.0000	0.0000	-	-	P_P1	0.5134	0.486583	0.0000
M1	15	0.5134	0.4866	0.0000	0.0000	-	-	P_M1	0.5134	0.486583	0.0000
M3	14	0.5134	0.4866	0.0000	0.0000	-	-	P_M3	0.5134	0.486583	0.0000
M2	13	0.1353	0.8647	0.0000	0.0000	-	-	P_M2	0.1353	0.864665	0.0000
P2	4	0.5134	0.4866	0.0000	0.0000	-	-	P_P2	0.5134	0.486583	0.0000
D21	6	0.5134	0.4866	0.0000	0.0000	-	-	P_D21	0.5134	0.486583	0.0000
D22	7	0.5134	0.4866	0.0000	0.0000	-	-	P_D22	0.5134	0.486583	0.0000
PS1	2	0.5134	0.4866	0.0000	0.0000	-	-	P_PS1	0.5134	0.486583	0.0000

Function	#	OK	F	OO	FOO	LR	KO	#	OK	KO	{OK,KO}
RF_D1	20	0.0695	-	-	-	0.5098	0.4207	D11	0.5793	0.420731	0.0000
RF_D2	21	0.2636	-	-	-	0.4996	0.2368	D21	0.7632	0.236763	0.0000
RF_M1	1	0.2636	-	-	-	0.4996	0.2368	M1	0.7632	0.236763	0.0000
RF_M2	16	0.0695	-	-	-	0.5098	0.4207	M2	0.5793	0.420731	0.0000
SF_S1	22	0.2270	-	-	-	-	0.7730	P1	0.2270	0.773008	0.0000
SF_S2	23	0.2270	-	-	-	-	0.7730	P2	0.2270	0.773008	0.0000
RF_S1	24	0.0515	-	-	-	0.3509	0.5975	P1	0.4025	0.597542	0.0000
SF_Y4	27	0.1061	-	-	-	-	0.8939	P1	0.1061	0.893913	0.0000

La salida muestra que, aunque la falla del D11 y M2 (0.8646) es mayor que todos los componentes (Ver Fig.- 7), la FG indica que el componente a ser reparados es P1 o P2, y no D11 o M2 como lo diría una evaluación por componente. Pero no es así, según la estructura relacional dentro del sistema.

Esto demuestra la importancia de un análisis de confiabilidad funcional, estructural y comportamental y no aislado como un componente solamente.

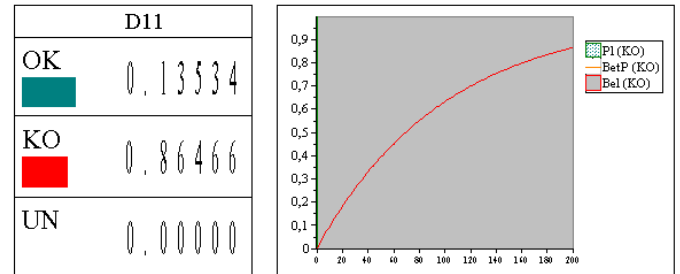


Fig.- 7. Comportamiento de la Falla del componente D11.

En la Fig.- 8 se puede ver los diferentes estados del sistema general.

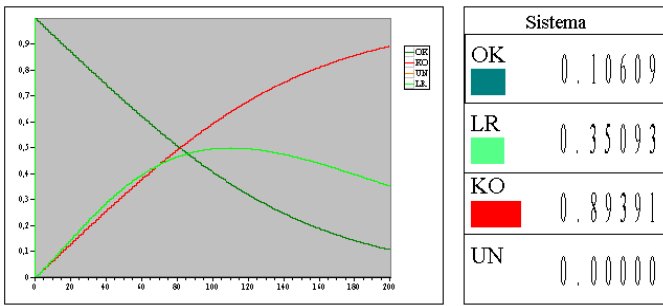


Fig.- 8. Diferentes estados del sistema general.

Para el Escenario 5, volvemos al escenario de referencia, y contrario al escenario 3 que reparo los procesadores P11 y P22, en este nuevo escenario aceleramos la Falla de estos procesadores con P1 en (KO)= 0,00833 y P2 con (KO)= 0,00667. Los valores se pueden ver en la Cuadro 7.

CUADRO 7.
VALORES OBTENIDOS PARA EL SISTEMA GENERAL EN EL ESCENARIO 5.

Component	#	OK	F	OO	FOO	LR	KO	#	OK	KO	{OK, KO}
N1	5	0.5134	0.4866	0.0000	0.0000	-	-	P_N1	0.5134	0.486583	0.0000
D11	18	0.5134	0.4866	0.0000	0.0000	-	-	P_D11	0.5134	0.486583	0.0000
D12	19	0.5134	0.4866	0.0000	0.0000	-	-	P_D12	0.5134	0.486583	0.0000
P1	3	0.1889	0.8111	0.0000	0.0000	-	-	P_P1	0.1889	0.811124	0.0000
M1	15	0.5134	0.4866	0.0000	0.0000	-	-	P_M1	0.5134	0.486583	0.0000
M3	14	0.5134	0.4866	0.0000	0.0000	-	-	P_M3	0.5134	0.486583	0.0000
M2	13	0.5134	0.4866	0.0000	0.0000	-	-	P_M2	0.5134	0.486583	0.0000
P2	4	0.2636	0.7364	0.0000	0.0000	-	-	P_P2	0.2636	0.736403	0.0000
D21	6	0.5134	0.4866	0.0000	0.0000	-	-	P_D21	0.5134	0.486583	0.0000
D22	7	0.5134	0.4866	0.0000	0.0000	-	-	P_D22	0.5134	0.486583	0.0000
PS1	2	0.5134	0.4866	0.0000	0.0000	-	-	P_PS1	0.5134	0.486583	0.0000

Function	#	OK	F	OO	FOO	LR	KO	#	OK	KO	{OK, KO}
RF_D1	20	0.2636	-	-	-	0.4996	0.2368	D11	0.7632	0.236763	0.0000
RF_D2	21	0.2636	-	-	-	0.4996	0.2368	D21	0.7632	0.236763	0.0000
RF_M1	1	0.2636	-	-	-	0.4996	0.2368	M1	0.7632	0.236763	0.0000
RF_M2	16	0.2636	-	-	-	0.4996	0.2368	M3	0.7632	0.236763	0.0000
SF_S1	22	0.1100	-	-	-	-	0.8900	P1	0.1100	0.889974	0.0000
SF_S2	23	0.1536	-	-	-	-	0.8464	P2	0.1536	0.846447	0.0000
RF_S1	24	0.0169	-	-	-	0.2298	0.7533	P1	0.2467	0.753316	0.0000
SF_Y4	27	0.0650	-	-	-	-	0.9350	P1	0.0650	0.934975	0.0000

Si vamos al comportamiento de la falla de los componentes P1 y P2, vemos en la Cuadro 7, que la falla para P1 es $Bel(KO) = 0.81112$, mientras que la falla para P2 es $Bel(KO) = 0.73640$. Vemos como el P1 tiene una $Bel(KO)$ mayor, por esta razón la FG indica que P1 debe ser reparado.

En la Fig.- 9 se muestra el comportamiento de los estados del sistema, así como la Falla $Bel(KO)$ del sistema.

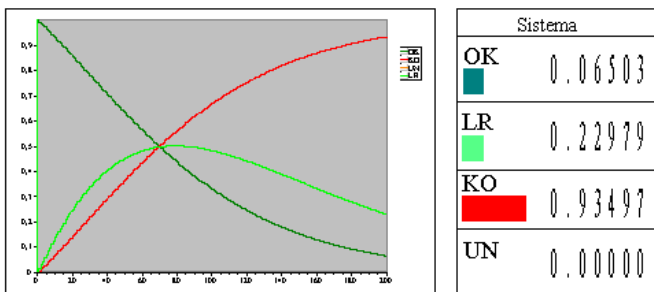


Fig.- 9. Comportamiento de la Falla del componente D11.

En el escenario 6, continuamos con los valores del escenario 5, pero vamos a incluir la incertidumbre epistémica de 0.20 en el pronóstico local del componente P2. La decisión

del componente a ser reparado se basa en la Plausibilidad de Falla $Pl(KO)$ [Gonzalez,2018], en la propagación en el sistema. Se obtiene los siguientes resultados del Cuadro 8:

CUADRO 8.
VALORES OBTENIDOS PARA EL SISTEMA GENERAL EN EL ESCENARIO 6.

Component	#	OK	F	OO	FOO	LR	KO	#	OK	KO	{OK, KO}
N1	5	0.5134	0.4866	0.0000	0.0000	-	-	P_N1	0.5134	0.486583	0.0000
D11	18	0.5134	0.4866	0.0000	0.0000	-	-	P_D11	0.5134	0.486583	0.0000
D12	19	0.5134	0.4866	0.0000	0.0000	-	-	P_D12	0.5134	0.486583	0.0000
P1	3	0.1889	0.8111	0.0000	0.0000	-	-	P_P1	0.1889	0.811124	0.0000
M1	15	0.5134	0.4866	0.0000	0.0000	-	-	P_M1	0.5134	0.486583	0.0000
M3	14	0.5134	0.4866	0.0000	0.0000	-	-	P_M3	0.5134	0.486583	0.0000
M2	13	0.5134	0.4866	0.0000	0.0000	-	-	P_M2	0.5134	0.486583	0.0000
P2	4	0.1636	0.8364	0.0000	0.0000	-	-	P_P2	0.1636	0.836403	0.2000
D21	6	0.5134	0.4866	0.0000	0.0000	-	-	P_D21	0.5134	0.486583	0.0000
D22	7	0.5134	0.4866	0.0000	0.0000	-	-	P_D22	0.5134	0.486583	0.0000
PS1	2	0.5134	0.4866	0.0000	0.0000	-	-	P_PS1	0.5134	0.486583	0.0000

Function	#	OK	F	OO	FOO	LR	KO	#	OK	KO	{OK, KO}
RF_D1	20	0.2636	-	-	-	0.4996	0.2368	D11	0.7632	0.236763	0.0000
RF_D2	21	0.2636	-	-	-	0.4996	0.2368	D21	0.7632	0.236763	0.0000
RF_M1	1	0.2636	-	-	-	0.4996	0.2368	M1	0.7632	0.236763	0.0000
RF_M2	16	0.2636	-	-	-	0.4996	0.2368	M3	0.7632	0.236763	0.0000
SF_S1	22	0.1100	-	-	-	-	0.8900	P1	0.1100	0.889974	0.0000
SF_S2	23	0.0953	-	-	-	-	0.9047	P2	0.0970	0.846447	0.1165
RF_S1	24	0.0169	-	-	-	0.1844	0.8052	P2	0.1430	0.753316	0.1837
SF_Y4	27	0.0514	-	-	-	-	0.9486	P2	0.0377	0.934975	0.0273

La salida muestra como la incertidumbre del componente P2, se propaga entre las funciones mostrando la falla en el sistema con una creencia de $Bel(KO)=0.93497$, y que según la FG es P2 quien debe ser reparado.

En la siguiente Fig.- 10 se muestra el comportamiento de los otros estados del sistema.

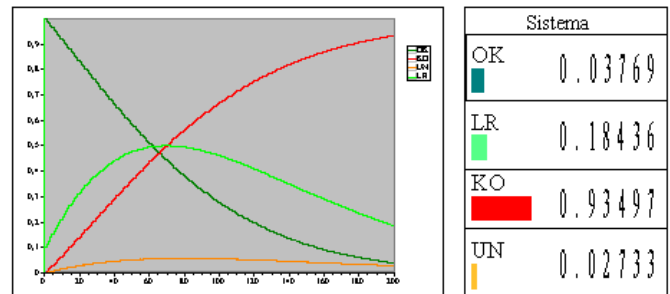


Fig.- 10. Comportamiento de la Falla del componente D11.

Si analizamos el comportamiento de la falla de los componentes P1 y P2, vemos en la Fig.- 11 que la plausibilidad de falla para P1 es $Pl(KO)=0.8111$, mientras que la plausibilidad de falla para P2 es $Pl(KO)=0.93640$, por eso la FG indica que se debe reparar P2, al tomar en cuenta la incertidumbre.

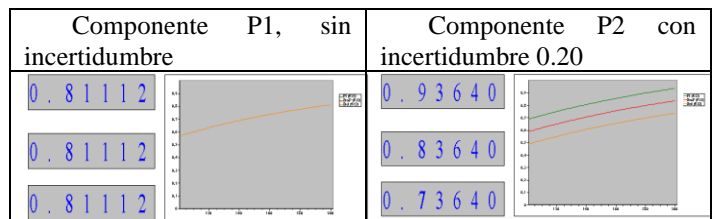


Fig.- 11. Comportamiento de la Falla del componente D11.

En la Fig.- 12 se muestra cómo se propaga la Falla y la incertidumbre en las diferentes entidades y según la estructura, mostrando la forma del Sistema:

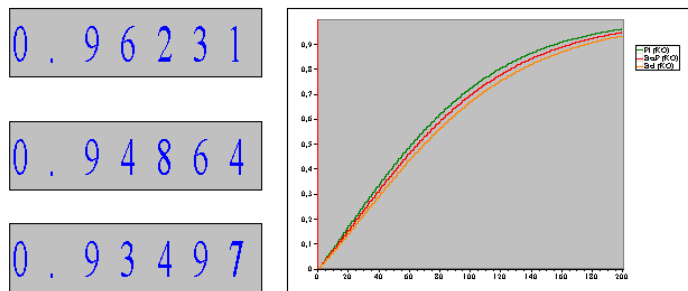


Fig.- 12. Comportamiento de la Falla del componente D11.

Vemos en la Fig.- 12 que la falla a nivel de sistemas tiene una creencia de $Bel(KO)=0.93497$, un valor epistémico de $BetP(KO)=0.94864$ y una plausibilidad de $Pl(KO)=0.96231$.

V. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

Se logró la verificación y validación de la utilidad de una función genérica (FG) para la toma de decisiones.

La FG proporciona resultados coherentes con la literatura.

La FG demostró que tomar en cuenta los diferentes estados de los componentes y los de las funciones, es mucho más certero, para la toma de decisiones.

La FG presenta algunas formas de utilizar los indicadores de ayuda a la decisión que proporciona para la planificación conjunta de la producción y el mantenimiento.

La FG permite obtener una imagen a todos los niveles de un Sistema en estudio (sistema, subsistema, funciones y sus componentes).

La FG permite determinar la capacidad para realizar futuras tareas de producción, y proponer los componentes que deben mantenerse, teniendo en cuenta al mismo tiempo las incertidumbres epistémicas que puede contener la información producida por los pronósticos locales.

El sistema modelizado en estudio, realizado con el programa ARENA, permitió poner de relieve la capacidad del FG del sistema para predecir la propagación de los fallos de los componentes y sus efectos en el funcionamiento de las entidades del sistema, como en [Desforges, 2017].

La FG puede proporcionar información relevante de todos los niveles del sistema, como por ejemplo los estados OK, F, OO, LR, KO, que ayudarán al CBM y al PHM a tomar decisiones de apoyo para la planificación del mantenimiento y la programación de la producción para realizar las futuras tareas asignadas.

El modelo planteado permite predecir la propagación de los fallos de los componentes y sus efectos en el funcionamiento de las entidades del sistema. Su contribución a los sistemas de producción será mayor cuando se aplique a un

caso real de Sistema de Producción.

Queda como perspectiva aplicar a un caso de sistema de Producción, con una meta establecida, para evaluar la capacidad del sistema.

REFERENCIAS

- [1] Jardine AKS, Lin D, Banjevic D. Una revisión sobre el diagnóstico y pronóstico de la maquinaria que implementa el mantenimiento basado en la condición. *Sistemas Mecánicos y Procesamiento de Señales* 2006; 20: 1483-1510.
- [2] Bufanda P. Un marco para el monitoreo de la condición y el mantenimiento basado en la condición. *Tecnología de la Calidad y Gestión Cuantitativa* 2007; 4: 301-312.
- [3] Julka N, Thirunavukkarasu A, Lendermann P, Gan BP, Schirrmann A, Fromm H, Wong E. Uso de la información de gestión de la salud del pronóstico para la optimización de la red logística de componentes de repuesto aeroespaciales. *Computadoras en la Industria* 2011; 62: 613-622
- [4] Desforges X, Diévar M, Archimède B. Función de pronóstico para sistemas complejos para apoyar la planificación cooperativa de producción y mantenimiento basada en una extensión de redes bayesianas orientadas a objetos. *Computadoras en la Industria* 2017; 86: 34-51.
- [5] Lee J, Ni J, Djurdjanovic D, Qiu H, Liao H. Herramientas de pronóstico inteligente y mantenimiento electrónico. *Computadoras en la Industria* 2006; 57: 476-489.
- [6] Voisin A, Levrat E, Cocheteux P, Iung B. Modelo de pronóstico genérico para el apoyo a la toma de decisiones de mantenimiento proactivo: aplicación al banco de pruebas de mantenimiento electrónico preindustrial. *Revista de Fabricación Inteligente* 2010; 21: 177-193.
- [7] Oudert T, Grabot B, Archimède B. Programación cooperativa de producción/mantenimiento mediante lógica difusa y multiagente. *Revista Internacional de Investigación de la Producción* 2002; 40: 4611-4632.
- [8] Le Maitre Gonzalez, Esteban, Xavier Desforges and Bernard Archimède. "Assessment method of the multicomponent systems future ability to achieve productive tasks from local prognoses." *Reliability Engineering and System Safety*, 180, 403-415., 2018.
- [9] Bobbio A, L. Portinale, M. Minichino, E. Ciancamerla. "Improving the analysis of dependable systems, by mapping fault trees into Bayesian networks." *Reliability Engineering & System Safety*, Elsevier Journal, 2001. 71(3): 249 - 60, ISSN 0951-8320. <[http://doi.org/10.1016/S0951-8320\(00\)00077-6](http://doi.org/10.1016/S0951-8320(00)00077-6)>.