

Metodología para resolver la fiabilidad y riesgos en ambientes de radiación nuclear

Ramiro Álvarez Santos, Eduardo Garcia-Breijo y Javier Ibáñez Civera

De todos los ambientes, el nuclear es el más agresivo, para personas e instalaciones, debido a la incidencia de las radiaciones nucleares sobre la salud y la funcionalidad en los materiales, componentes, dispositivos electrónicos, optoelectrónicos y mecatrónicos. Los modelos matemáticos de los manuales usados para resolver las tasas de fallo predictivas, como el MIL-HDBK 217 F N2, Bellcore Telcordia, SN 29500, 217 Plus, etc., no incluyen factores de riesgo Px en ambientes nucleares para familias de componentes y dispositivos electrónicos, por lo que en este trabajo se desarrolla la metodología alternativa para resolver la fiabilidad.

Introducción

Todo equipo electrónico y/o mecatrónico (analógico, digital, electromecánico) que no haya sido especialmente diseñado para resistir las radiaciones de origen nuclear falla por diversas causas y mecanismos cuando se expone a dosis de radiaciones mayores a 10^3 rads, caso del cinturón de radiaciones de Van Allen en la magnetosfera, o de 10^{11} neutrones/cm², en caso de funcionar en el entorno de reactores nucleares.

Por ello, en el diseño de los ensamblados electrónicos y/o mecatrónicos que deban funcionar en esos ambientes, la ingeniería de diseño debe incluir los efectos de las radiaciones incidentes sobre los parámetros característicos de sus componentes, dispositivos y materiales, considerando las posibles causas, modos y mecanismos de fallo potenciales, así como los riesgos y acciones de protección adecuadas al caso.

Efectos

Es importante entender que la peligrosidad de la radiación depende no solo de su energía y naturaleza (protones, rayos gamma, neutrones, etc.), sino también del tiempo de exposición.

Efectos sobre los ensamblados mecatrónicos

- **Neutrones rápidos:** pueden conducir a la degradación permanente de la ganancia de los dispositivos bipolares y MOS (metal óxido semiconductor) y aumentar la tensión de saturación de los BJT (transistores bipolares), es decir, causar el fallo. Los materiales orgánicos, aislantes y dieléctricos degradan sus parámetros característicos (Ri, er, etc.) bajo radiaciones incidentes de neutrones.

- **Radiación ionizante en régimen permanente:** puede aumentar la corriente de fuga de los BJT y modificar los valores de la tensión umbral de los MOS, sobre todo los CMOS, como causa de fallo.
- **Tasas de ionización transitorias:** con dosis elevadas de rayos gamma (γ) se generan fotocorrientes en las uniones PN polarizadas inversamente, lo que modifica sus niveles lógicos y bloqueos en un cierto estado conocido como *latch-up* en los CMOS, como causa de fallo.
- **Detonaciones nucleares:** en los circuitos híbridos Thick Film y Thin Film, los impulsos térmicos originados por *detonaciones nucleares* determinan derivas de sus parámetros y especificaciones (Tabla 1).

Susceptibilidades límite para los dispositivos semiconductores

Las normas vigentes especifican que no se deben superar los siguientes niveles para asegurar la fiabilidad:

- **Radiación ionizante:**
 10^{13} neutrones/cm²
 10^{10} rads
 Dosis total de 10^3 rads
- **Impulsos electromagnéticos (EMP):**
 10^4 V/m de nivel máximo
 10^2 A.v/m

Protección contra las radiaciones

La ingeniería de diseño de las protecciones contra la radiación nuclear es muy compleja y requiere la formación de grupos de trabajo integrado por especialistas en los diferentes campos científicos y tecnológicos.

No es posible asegurar una protec-

ción total de los componentes y ensamblados mecatrónicos contra las radiaciones nucleares incidentes, como lo es en el caso de otros ambientes. La variedad de efectos generados por el ambiente nuclear dificulta su diseño.

Como método alternativo, es mejor definir un nivel de resistencia a la radiación nuclear en un punto determinado del sistema y, luego, diseñar un test a ese nivel. Este es el enfoque utilizado en las norma MIL-STD-M 279 *Total Dose Hardness Assurance Guidelines for Semiconductors and Microcircuits* y MIL-STD-280 *Neutron Hardness Guidelines for Semiconductors and Microcircuits*.

Otras normas: *ESA Qualification Status of PCB technology, ESA Approved PCB Manufacturers - contact details, ECSS-Q-ST-70-10C Qualification of printed circuit boards, ECSS-Q-ST-70-11C Procurement of printed circuit boards, ECSS-Q-ST-70-12C Design of printed circuit board.*

La protección consiste en emplear componentes adecuados, con una especial resistencia a estas radiaciones y características de blindaje a nivel de sistema mecatrónico, pero esta solución no es suficiente.

Las provisiones de los sistemas de protección nucleares son, por lo general, un ir o no ir a propuestas de compensación aparente.

Se pueden citar algunos métodos:

- Caso de *Electro Magnetic Pulse (EMP)*. Emisión de energía electromagnética de alta intensidad en un breve periodo de tiempo:

Derivación a tierra.

- Fotocorrientes:
Mínimo ancho de base W de la unión PN.

Ambientes		Tecnologías								
		Transistores bipolares y JFET	Tiristores	TTL	Schottky TTL Baja potencia	IC lineales	CMOS	NMOS	LEDs	Isoplanar II ECL
Neutrones (n/cm ²)		10 ¹⁰ -10 ¹²	10 ¹⁰ -10 ¹²	10 ¹⁴	10 ¹⁴	10 ¹³	10 ¹⁵	10 ¹⁵	10 ¹³	>10 ¹⁵
Radiación ionizante	Dosis total (rads [SI])	>10 ⁴	10 ⁴	10 ⁶	10 ⁶	5x10 ⁴ -10 ⁵	10 ³ -10 ⁴	10 ³	>10 ⁵	10 ⁷
	Tasas de dosis transitorias (rads [SI/s]). Rotura inversa o saturación	---	10 ³	10 ⁷	5x10 ⁷	10 ⁶	10 ⁷	10 ⁵	---	>10 ⁸
	Tasas de dosis transitorias (rads [SI/s]). Rotura inversa o saturación	---	10 ³	10 ⁷	5x10 ⁷	10 ⁶	10 ⁷	10 ⁵	---	>10 ⁸

(*) (SI): Gray (GY) = 100 rads

Tabla 1. (Bajenescio, T)..

Disminución de las dimensiones de los dispositivos.

- Neutrones:
Usar dispositivos semiconductores con dopados elevados, bajos voltajes, altas densidades de corriente, y alta frecuencia de corte.

Metodologías para resolver la fiabilidad en entornos nucleares

- Ensayos de demostración de la fiabilidad/históricos.
- Métodos de predicción de las tasas de fallo.

Ensayos de demostración de la fiabilidad

Se hacen normalmente ensayos de radiación gamma (en instalaciones como el Centro Nacional de Aceleradores [CNA] en Sevilla y el Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas [Ciemat] en Madrid).

Para aplicaciones espaciales solo hay que radiar con rayos gamma hasta 100 Krad, en aplicaciones nucleares se requieren valores mucho más altos, del

orden de Mrad.

Para radiar con protones se dispone de varias opciones:

- En el CNA de Sevilla se puede radiar con protones de baja energía (entre 10 MeV y algo más de 15 MeV).

Los protones de baja energía son muy interesantes para circuitos integrados porque su penetración no es muy grande (alrededor de 500 μm) y producen mucho daño en la zona activa de los componentes.

- De todas formas, la energía del haz de protones que se suelen pedir es de 60 MeV. Se puede hacer en la Universidad Católica de Lovaina (UCL), en Bélgica.

Para haces de más energía se pueden hacer en el Paul Scherrer Institute (PSI) de Suiza. Llegan hasta 200 MeV o a KV (Holanda), donde llegan a 180 MeV.

- También en TSL (Suecia) se puede radiar con protones de hasta 180 MeV.
- En el TSL de Toulouse también se puede radiar con neutrones.

- La ESA tiene también un *Radiation Desing Handbook* en el que se incluyen los efectos de la radiación en muchos ítems, como componentes, dispositivos electrónicos y, también, materiales (polímeros y otros).

Caso de estudio

- Adquisición, explotación de datos y resultados para una muestra de talla 10 PBA ensambladas con un BOM de la tabla 1 para conformar un amplificador de señal sometida a un ensayo de radiación con protones (10 MeV + estrés térmico de 70 °C). Nivel de confianza (NC) > 90%.
- Objetivo: determinar los parámetros de fiabilidad para el caso por Weibull, que cubre los tres periodos del ciclo de vida de producto, extrapolables a otros casos o a familias de componentes (resistores, condensadores, etc.) y dispositivos (transistores, IC, etc.)

Los resultados fueron los siguientes:

- Parámetros de Weibull (Fig. 1):
Forma β = 1,071

Origen $\gamma = -3.020$ h
 Escala $\eta = 115.447,35$ h
 MTFB = $\theta = 109.000,00$ h
 $t =$ variable tiempos (h)
 Ajuste por Rangos medios (mse) = 0, 00376

- Funciones de Weibull (t):
 - Distribución fiabilidad R(t):

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} = e^{-\left(\frac{t+3.020}{115.447,35}\right)^{1,071}} \quad (1)$$

- Tasa de fallos $\lambda(t)$:

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} = \frac{1,071}{115.447,35} \left(\frac{t+3.020}{115.447,35}\right)^{0,071} \quad (2)$$

- Distribución de fiabilidad F(t):

$$F(t) = 1 - R(t) \quad (3)$$

- Función densidad de fallos (FDF) f(t):

$$f(t) = \frac{1,071}{115.447,35} \left(\frac{t+3.020}{115.447,35}\right)^{0,071} e^{-\left(\frac{t+3.020}{115.447,35}\right)^{1,071}} \quad (4)$$

- De la (2) se deduce que de los ensayos se pueden extraer tasas de fallos $\lambda(t)_{fam i}$ para cada familia i de componentes y dispositivos electrónicos.

Métodos de predicción de las tasas de fallo

- Método a):

- Calcular las λ_p predicciones con los modelos tradicionales (MIL HDBK 217 F N2, Bellcore, SN29500, MIL 217 plus, etc.), con la condición de **no superar los valores de radiación incidente indicados** para no modificar los parámetros característicos eléctricos, electrónicos y fiabilistas de las familias de materiales, componentes y dispositivos electrónicos, optoelectrónicos más sensibles (semiconductores, por el riesgo de que se generen pares electrón-hueco de forma exponencial, LED, PIC, IC, materiales aislantes y dieléctricos orgánicos [condensadores, motores, transformadores, etc.]).

- Método b):

- Extraer las $\lambda(t)_{fam i}$ de los ensayos o históricos de las familias i de componentes, dispositivos y subsistema y compararlos con las λ_{pifam} predicciones.
- Predecir las λ_{pifam} con los modelos de predicción conocidos de familias de componentes, subsistemas, sistemas equivalentes.
- Hallar el factor de corrección estimado para ambientes de radiación nuclear $\Pi_{xifam i}$:

$$\Pi_{xifam i} = \frac{\lambda(t)_{fam i}}{\lambda(t)_{pifam i}} \quad (5)$$

- $\lambda(t)_{fam i}$: tasa de fallos de los ensayos, históricos, norma/familia i
- $\lambda(t)_{pifam i}$: tasa de fallos prediccional/familia i

$$\lambda_{pci} = \lambda_b \prod_{i=1}^m \pi_{r(1..j)} \quad (6)$$

- λ_b : tasa de fallos base/familia i.
- m: serie de componentes/familia i.
- j: factores de riesgo π_r /familia i.

- Corregir los resultados con el factor de riesgo para ambientes nucleares $\Pi_{xfam i}$.
- Tasa de fallos sistema serie y fiabilidad (el peor caso) de familias i de componentes λ_{pci} y sistema λ_{ssi} :

$$\lambda_{ssi} = \Pi_{xifam.} \sum_{i=1}^n N_i \lambda_{pci} \quad (7)$$

$$R(t)_{pci} = e^{-\lambda_{pci} t} \quad (8)$$

$$R(t)_{ssi} = e^{-\lambda_{ssi} t} \quad (9)$$

Π_{xifam} : factor de riesgo/componente/familia para ambientes nucleares.

N_i : población de familias de componentes i.

n_i : nº de tipos de componentes/familia i.

$R(t)_{pci}$: Fiabilidad prediccional para un componente i de la familia.

R_{ssi} : Fiabilidad del sistema familia i

- No excluir la protección segura de los componentes y ensamblados PBA para anular o atenuar las radiaciones incidentes (v. documento CSN, ICRP, CIEMAT, EURATOM, Service Centrale de Sécurité des Installations Nucléaires [France], etc.).
- Para los dispositivos programables, incluir SW de recuperación.
- Estos últimos corresponden a la ingeniería de diseño del producto, no a la ingeniería IRAMS.
- Prever redundancias en espera optimizadas (*stand-by*).
- Dimensionar el stock de repuestos de componentes y ensamblados PBA.
- Diseñar la logística de mantenimiento.
- Aplicar algunos valores de factores Π de riesgo, correctores de tasas de fallo **para componentes mecánicos** en sistemas mecatrónicos que se especifican en la IEEE-500-1984.

Conclusiones

- Los entornos nucleares, el espacio y los lugares de trabajo de las centrales nucleares afectan tanto a las personas como a las instalaciones y representan un riesgo para la salud de los primeros y una causa de fallo para los segundos.

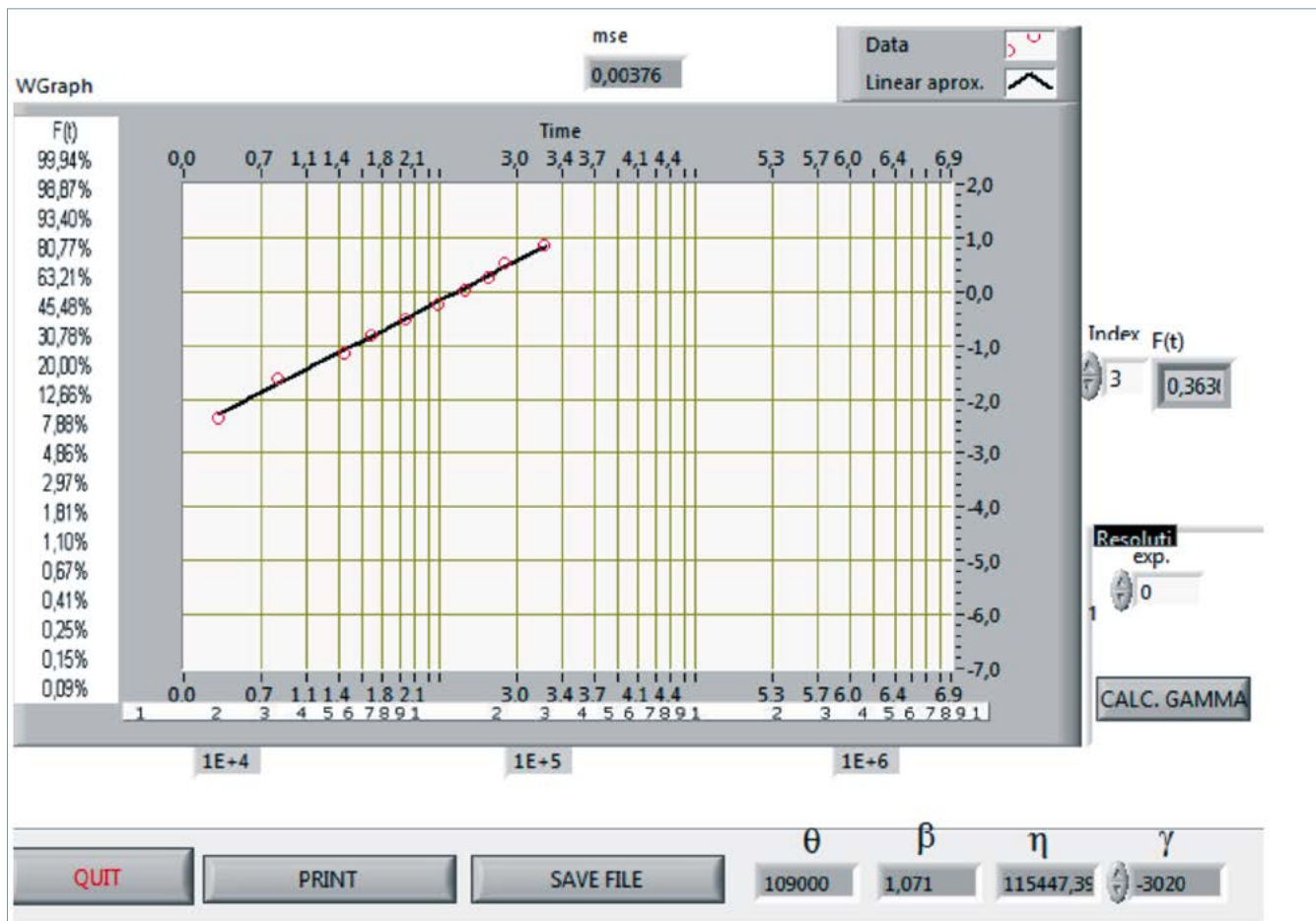


Figura 1. Adquisición, explotación de datos y resultados asistidos por SW Weibull 10.

- Para la protección de las personas, los niveles de radiación no deben excederse y esto requiere un análisis de riesgo que cumpla la legislación vigente.
- Las medidas de protección contra radiaciones β , $\beta+$, γ , α , neutrones, rayos X, etc. están recogidas por el RD 783/201, la norma NTP 614 (radiaciones ionizantes, normas de protección), Directiva 96/29 de EURATOM en cuanto a su interacción con el organismo y efectos biológicos.
- Para resolver la fiabilidad de las instalaciones, materiales y equipos mecatrónicos, no se deben exceder los niveles especificados de radiación, aplicando métodos de prueba y predicción de acuerdo con los estándares y manuales de datos. En este caso no hace falta el factor Π_{xifam} .
- Las bases de datos y los manuales incluyen modelos matemáticos para calcular tasas de fallo con factores de riesgo Π para todos los ambientes, excepto el nuclear, denominado (Π_{xifam}).

- El autor de este trabajo establece una metodología de ensayos y predicción para poder resolver el factor Π_{xifam} , y la fiabilidad de componentes y sistemas electrónicos, llegando a extraer resultados para un caso de estudio extrapolable a otros casos.

Bibliografía

Bajenesco T. Problemes de la Fiabilité des Composants Électroniques Actifs Actuels. Ed. Masson/Paris (1980).

Cor C., and Simoen E. Radiation effects in advanced semiconductor materials and devices. Vol. 57. Springer Science & Business Media, 2013.

Dongiovanni D. N., Pinna T., and Carloni D. RAMI analysis for DEMO HCPB blanket concept cooling system. Fusion Engineering and Design 98 (2015): 2125-2129.

F. J. Jiménez. SW_Weibull 10. ETSIST-UPM.

Herder P. M., Van Luijk J. A., and Bruijinoogje J. Industrial application of RAM modeling: Development and implementation of a RAM simulation model for the Lexan® plant at GE Industrial, Plastics. Reliability Engineering and System Safety 93.4 (2008): 501-508.

Kitazawa S. I., Okayama K., Neyatani Y., Sagot F., and Van Houtte D. RAMI analysis of the ITER CIS. Fusion Engineering and Design, 89(2), 88-93.

Kitazawa S. I., Okayama K., Neyatani Y., Sagot F., Van Houtte D., Abadie L., and Klotz W. D. RAMI analysis of ITER CODAC. Fusion Engineering and Design 87.7 (2012): 1510-1513.

Kitazawa S. I., Okayama K., Neyatani Y., Sagot F., and Van Houtte D. RAMI analysis of the ITER CIS. Fusion Engineering and Design, 89(2), 88-93.

Okayama K., Van Houtte D., Sagot F., and Maruyama S. RAMI analysis for ITER fuel cycle system. Fusion Engineering and Design 86.6 (2011): 598-601.

Qin S., Hu L., Chen K., Barnsley R., Sirinelli A., Song Y., and Cao H. RAMI analysis for ITER radial X-ray camera system. Fusion Engineering and Design 112 (2016): 169-176.

Qin S., Song Y., Yao D., Wan Y., Wu S., Li J., and Wei J. RAMI Analysis Program Design and Research for CFETR (Chinese Fusion Engineering Testing Reactor) Tokamak Machine. Journal of Fusion Energy 33.5 (2014): 516-522.

Sharma R. K., and Kumar S. Performance modeling in critical engineering systems using RAM analysis. Reliability engineering and system safety 93.6 (2008): 913-919.

Van Houtte D., Okayama K., and Sagot F. RAMI approach for ITER. Fusion Engineering and Design 85.7 (2010): 1220-1224.

Wang D., Yuan R., Wang J., Wang F., and Wang J. Preliminary RAMI analysis of DFLL TBS for ITER. Fusion Engineering and Design 112 (2016): 192-197.

Ramiro Álvarez Santos es Perito industrial, Ph Dr catedrático de Tecnología Electrónica de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) y académico correspondiente de Ciencias Bellas Artes y Letras de la Academia Nacional de France-Bordeaux.