



# EVALUACIÓN DE REQUISITOS DE VIGILANCIA INTEGRANDO INCERTIDUMBRES DE MODELO Y PARÁMETRO

**Maryory Patricia Villamizar Leon<sup>\*(1)</sup>**

**S, Martorell<sup>(1)</sup>, I. Martón<sup>(1)</sup>, J. F. Villanueva<sup>(1)</sup>, S. Carlos<sup>(1)</sup>, A. Sánchez<sup>(2)</sup>**

<sup>(1)</sup> Departamento de Ingeniería Química y Nuclear

<sup>(2)</sup> Departamento de Estadística, Investigación Operativa Aplicadas y Calidad  
Universitat Politècnica de València

<sup>(\*)</sup> [reymaya@yahoo.es](mailto:reymaya@yahoo.es)

**Carmen Armero**

Departament d'Estadística i Investigació Operativa,  
Universitat de València

[Carmen.Armero@uv.es](mailto:Carmen.Armero@uv.es)



1. Introducción
2. Objetivo General
3. Marco Metodológico
  - I. Análisis Probabilista de Seguridad
  - II. Especificaciones Técnicas de Funcionamiento ETF
  - III. Evaluación de la propuesta de cambio de ETF
  - IV. Desarrollo y aplicación del APS por etapas para evaluación de cambios de ETF
4. Casos de Aplicación
  - I. Casos de aplicación a nivel de Sistema
  - II. Casos de aplicación a nivel de Planta
5. Conclusiones, Trabajo Futuro y Agradecimientos.

- La operación segura de las Centrales Nucleares (CCNN) descansa en gran medida sobre las Especificaciones Técnicas de Funcionamiento (ETF).
- Las ETF forman parte de las bases de licencia de explotación y no pueden ser modificadas sin autorización del organismo regulador (CSN) .
- La observación de diferentes problemas ha motivado el desarrollo y aplicaciones de métodos probabilistas para el estudio de cambios en ETF con información en riesgo (desde comienzos de los años 80 en EEUU).
- Han sido muchos los análisis llevados a cabo y los cambios propuestos en ETF y aceptados en base a dicha información sobre el riesgo (Vesely, 1983; Martorell, 1991). **Sin embargo, la toma de decisiones se venía desarrollando sin un tratamiento sistemático del efecto que las incertidumbres**, en los modelos y en los datos utilizados, lo que dejaba abierta la puerta a la duda sobre la certeza de que realmente se había conseguido el objetivo de mejora de la seguridad tras el cambio.

**El objetivo** es desarrollar, dentro del marco del APS, las metodologías, modelos y herramientas que permitan incorporar, cuantificar y analizar el efecto de las incertidumbres en la evaluación de cambios de las ETF **concretamente en la modificación del tiempo entre dos pruebas consecutivas de la vigilancia programada** sobre las componentes del sistema de seguridad de Disparo del Reactor en una Central Nuclear (CN).

Dicho objetivo general contempla dos niveles de análisis:

**Sistema y Planta.**

### 3. Marco Metodológico

- I. Análisis Probabilista de Seguridad
- II. Especificaciones Técnicas de Funcionamiento ETF
- III. Evaluación de la propuesta de cambio de ETF
- IV. Desarrollo y aplicación del APS por etapas para evaluación de cambios de ETF



## Análisis Probabilista Seguridad APS

- Los APS permiten evaluar el nivel de seguridad de una central nuclear.
- Utiliza los modelos y datos, para modelizar los sucesos básicos en combinación con arboles de eventos y fallos para evaluar el riesgo como estimador de la seguridad.
- El APS es específico de cada central y es requerido por el organismo regulador (CSN) GS 1.14, 2007. Hay APS de nivel 1, 2 y 3.

**Además ....**

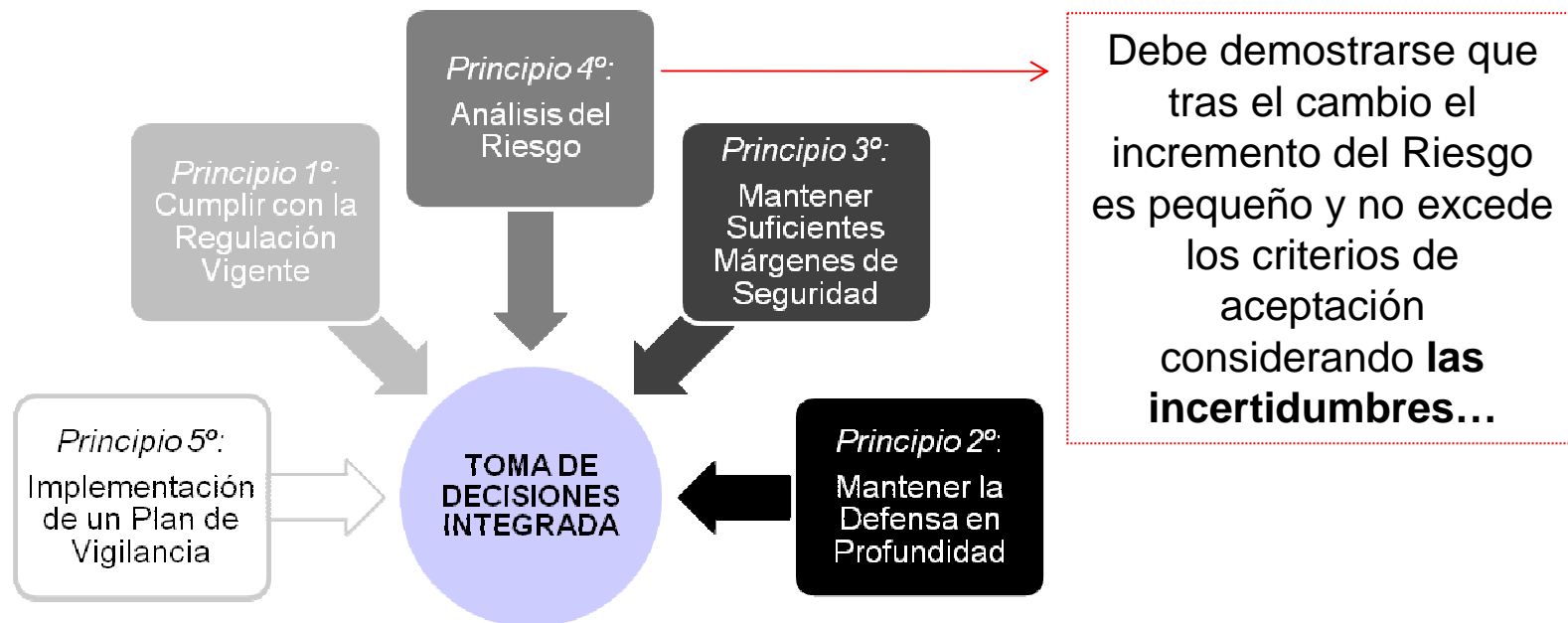


## Análisis Probabilista Seguridad APS

El APS se utiliza para evaluar los requisitos específicos de seguridad en las CCNN, por ejemplo **ETF** (STI ).

**STI: “tiempo entre pruebas”**

Las propuestas sobre cambios en bases de licencia utilizando el APS deben cumplir con 5 principios: (RG 1.174 y GS 1.14)





# Especificaciones Técnicas de Funcionamiento ETF



## Especificaciones Técnicas de Funcionamiento ETF

Las ETF se pueden definir, como un conjunto de reglas y criterios de seguridad, **para controlar la fiabilidad de las estructuras, sistemas y componentes (ESC) que tengan impacto en los sistemas de seguridad.**

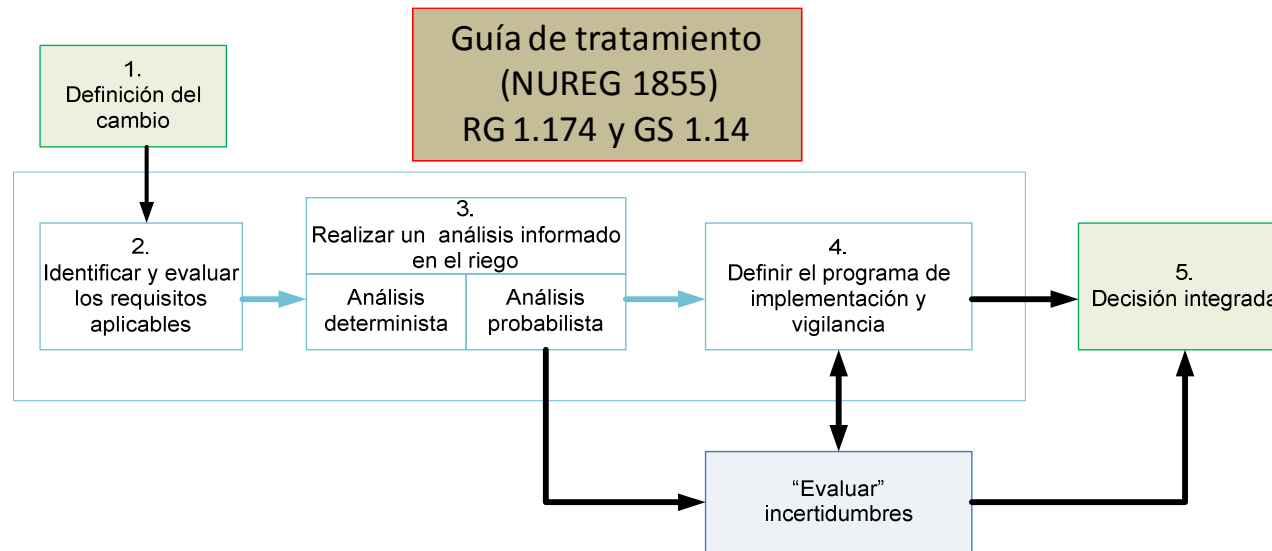
Existen cinco niveles en los que usualmente se evalúan las ETF, en la presente ponencia se tendrá en cuenta dos niveles:

- **Nivel de Sistema**
- **Nivel de Planta**

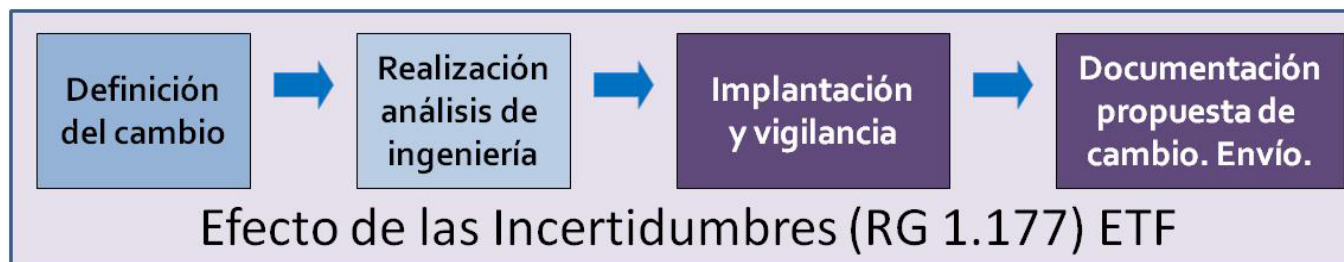


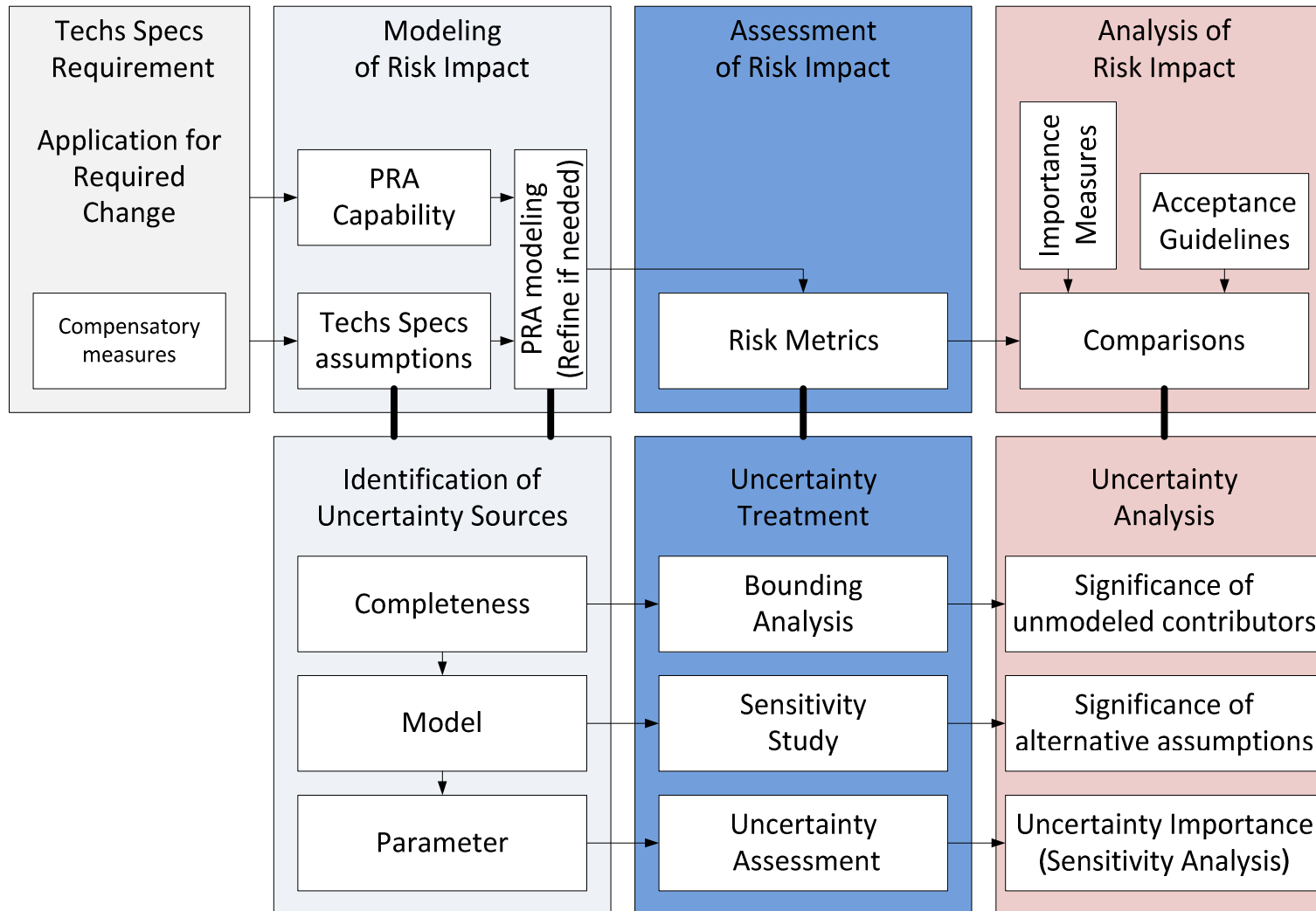


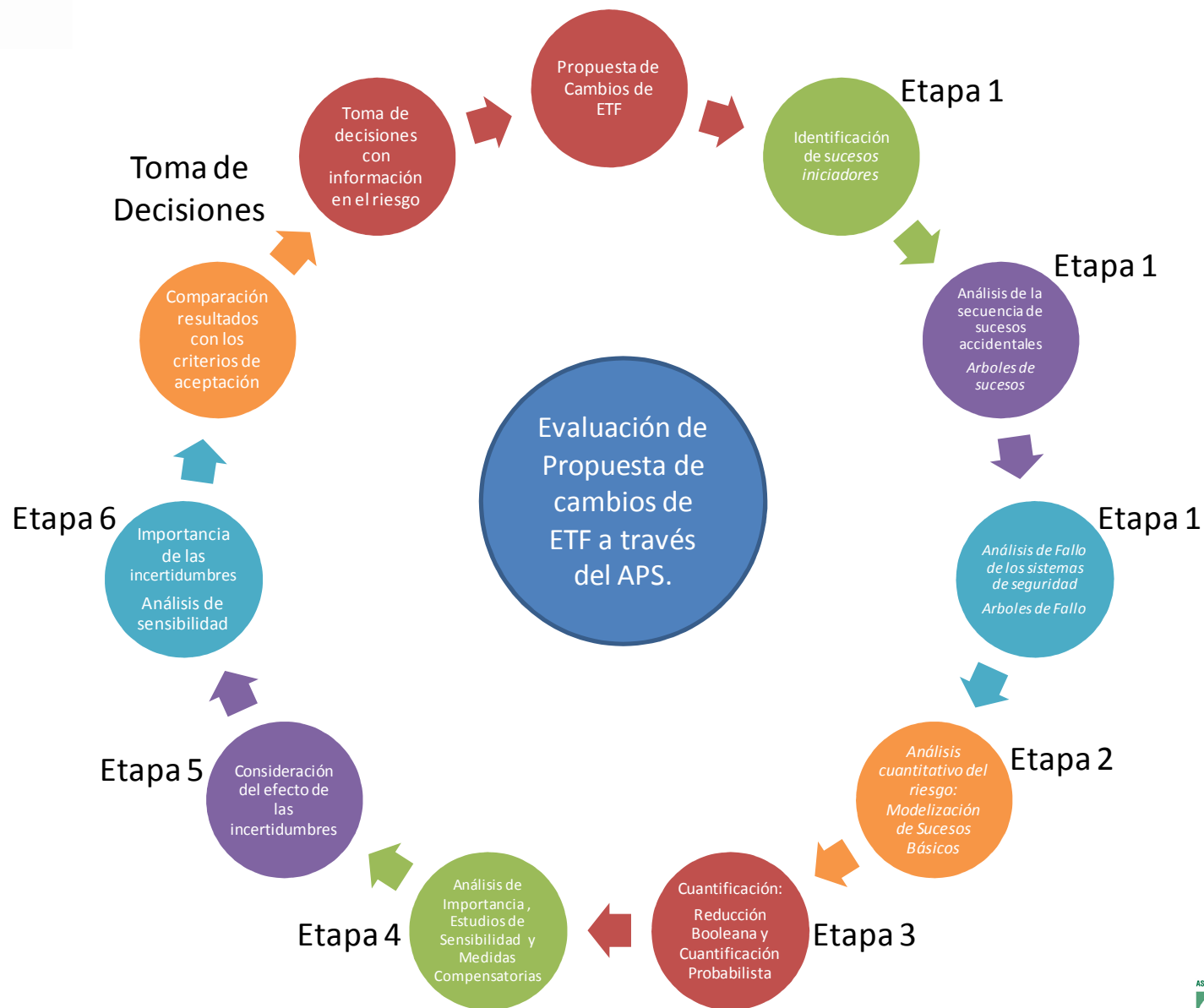
Existe una **guía para el tratamiento de las incertidumbres** en el marco de la RG 1.174, GS 1.14:



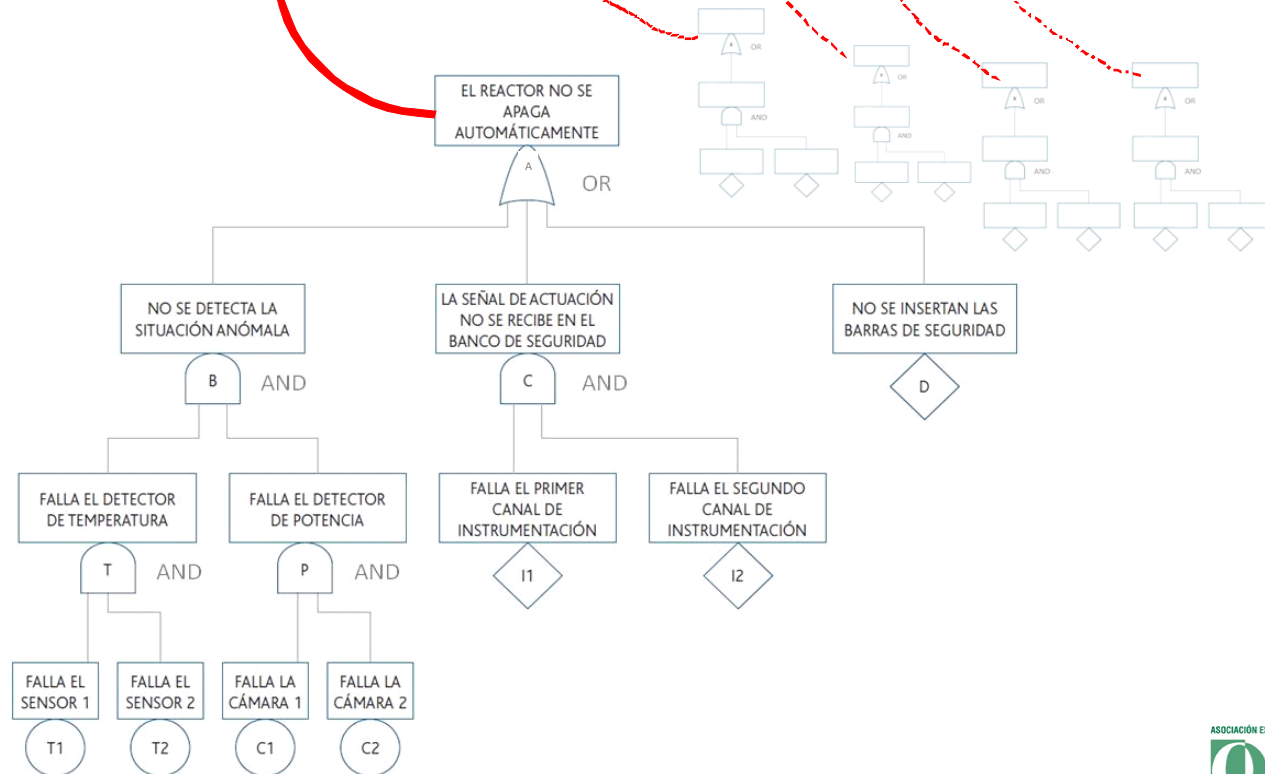
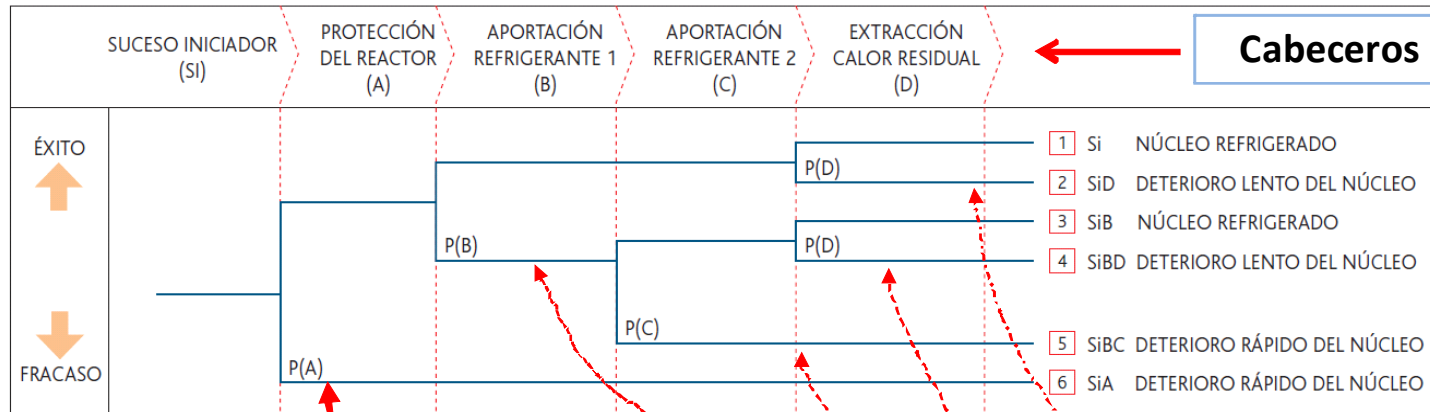
Pero es **preciso adaptarla al marco de análisis de cambios en ETF y mantenimiento**, regulado por la RG 1.177.







**Sucesos de Éxito**  
**Sucesos de Fracaso**



**Sucesos básicos de fallo en demanda:** El modo de fallo esta asociado a cambios del estado del componente al ser requerido (esta parado y se arranca, esta abierto y se cierra o viceversa). **Es la probabilidad de que una demanda tenga como resultado una respuesta de fallo.**

$$u_d = P(\text{fallo en demanda}) = \rho$$

**Sucesos básicos de fallo en misión:** El modo de fallo esta asociado a componentes que deben actuar durante un tiempo fijo en los que el fallo se detecta de forma inmediata. **El tiempo, T, hasta que se detecta un fallo** se modeliza como una variable aleatoria con distribución exponencial de parámetro  $\lambda_m$ , (tasa de fallo en misión) y la indisponibilidad asociada a un suceso básico de fallo en misión,  $u_m$ , **es la probabilidad de que dicho tiempo supere el tiempo de misión  $T_m$ , que normalm**

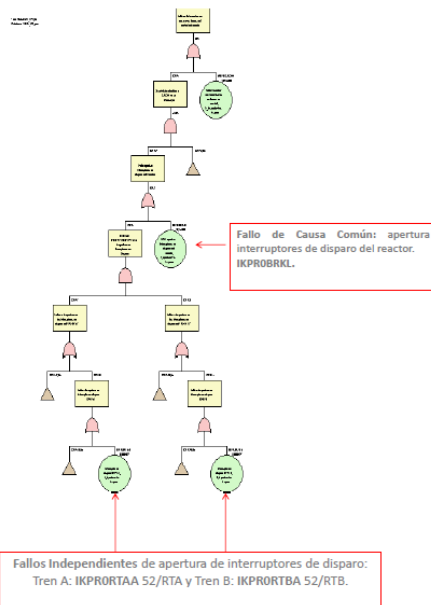
$$u_m = P(T > T_m) = 1 - e^{-\lambda_m T_m}$$

**Sucesos básicos de fallo en espera:** El modo de fallo requerido está asociado a componentes y modos de funcionamiento en los que cuando se produce el fallo, este no se detecta de forma inmediata y hay que esperar a que su funcionamiento sea requerido para saber si el componente ha fallado o no. La indisponibilidad asociada a los sucesos básicos de fallo en espera considera la distribución exponencial como base y es una media que valora **la probabilidad de que no se registre ningún fallo en el periodo de tiempo entre pruebas del componente  $T_e$ ,  $1 - e^{-\lambda_e T_e}$ , en relación al número de fallos esperado en dicho tiempo entre pruebas,  $\lambda$**

$$u_e = 1 - \left[ \frac{1 - e^{-\lambda_e T_e}}{\lambda_e T_e} \right]$$

siendo  $\lambda_e$  la tasa de fallo en espera (número de fallos por unidad de tiempo).

**Sucesos básicos asociados a los fallos de causa común:** En la industria nuclear el termino fallos de causa común (FCC) se usa para definir fallos o problemas de funcionamiento de componentes relacionados con una misma causa de fallo, por lo que son eventos que a través de algún mecanismo producen el fallo de dos o mas componentes, tren o sistema simultáneamente dentro de un corto periodo de tiempo. Puesto que todas las secuencias de accidente suponen el fallo de múltiples componentes o sistemas, un análisis de los fallos dependientes es de vital importancia para no cometer errores de varios ordenes de magnitud en la cuantificación de las secuencias accidentales que terminan con daño al núcleo.



### Estrategia Secuencial

$$\text{Indisponibilidad} \\ u_{ind} = 1 - \frac{1 - e^{-\lambda_1 T_e}}{\lambda_1 T_e} \text{ con } \lambda_1 = \frac{\alpha_1}{\alpha_t} \lambda_e$$

$$\text{Indisponibilidad} \\ u_{fcc} = 1 - \frac{1 - e^{-\lambda_{fcc} T_e}}{\lambda_{fcc} T_e} \text{ con } \lambda_{fcc} = \frac{2\alpha_2}{\alpha_t} \lambda_e$$

### Estrategia Escalonada

$$\text{Indisponibilidad} \\ u_{ind} = 1 - \frac{1 - e^{-\lambda_1 T_e}}{\lambda_1 T_e} \text{ con } \lambda_1 = \alpha_1 \lambda_e$$

$$\text{Indisponibilidad} \\ u_{fcc} = 1 - \frac{1 - e^{-1/2\lambda_{fcc} T_e}}{1/2\lambda_{fcc} T_e} \text{ con } \lambda_{fcc} = \alpha_2 \lambda_e$$

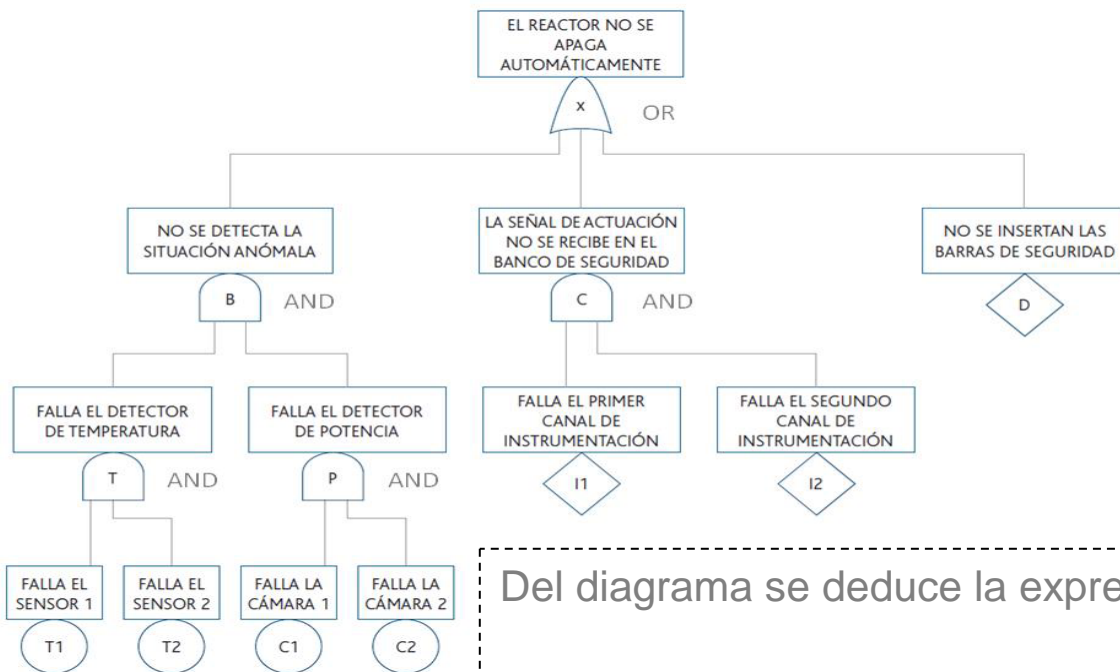
**Sucesos básicos asociados a la fiabilidad humana:** El objeto del análisis de la fiabilidad humana **es la definición e identificación de las acciones de los operadores**, selección de acciones para el análisis detallado y la asignación de las estimaciones para los sucesos básicos de origen humano para la cuantificación de las secuencias de accidente, (APS-IT-302).

Acción FOCAATWSH	PARTE MANUAL			PARTE COGNOSCITIVA
	Probabilidad de fallo	Nivel de STRESS EXPERTO	P. fallo* STRESS	
Asociado a REGLAS				
Omisión del paso relativo a la desenergización. Fuente: Tabla 20-8, Tabla 20-16 (NUREG/CR-1278).	7.0E-3	5	3.35E-2	0
Error en la lectura de la información de las pantallas. Fuente: Tabla 20-10, Tabla 20-16 (NUREG/CR-1278).	2 * 3.0E-3	5	3.30E-2	0
Fallo operador en la desconexión de la alimentación de los motores-generadores. FOCAATWSH. Valor asociado a la mediana de una distribución Lognormal con un FE = 5, NUREG/CR-1278, Tabla 20-20 item (5).			6.5063E-2	



Acción FOCAATWSH	PARTE MANUAL		PARTE COGNOSCITIVA	
	Probabilidad de fallo	Nivel de STRESS NOVATO	P. fallo* STRESS	
Asociado a REGLAS				
Omisión del paso relativo a la desenergización. Fuente: Tabla 20-8, Tabla 20-16 (NUREG/CR-1278).	7.0E-3	10	7.00E-2	0
Error en la lectura de la información de las pantallas. Fuente: Tabla 20-10, Tabla 20-16 (NUREG/CR-1278).	2 * 3.0E-3	10	6.00E-2	0
Fallo operador en la desconexión de la alimentación de los moto-generadores. FOCAATWSH. Valor asociado a la mediana de una distribución Lognormal con un FE = 5, NUREG/CR-1278, Tabla 20-20 item (5).			1.3E-1	

Tabla 3.24: Probabilidad de fallo humano asociado a la desconexión de la alimentación de los moto-generadores (Nivel de STRESS asociado a un operario NOVATO).



Definimos un **conjunto mínimo de fallos** al “suceso CMF” formado por el menor numero de sucesos básicos cuya ocurrencia es necesaria y suficiente para causar un Fallo Principal (top event).

Del diagrama se deduce la expresión lógica:

$$X = T1 \cdot T2 \cdot C1 \cdot C2 + I1 \cdot I2 + D$$

$$\downarrow \qquad \qquad \qquad \downarrow \qquad \qquad \qquad \downarrow$$

**CMF1:** T1 · T2 · C1 · C2      **CMF2:** I1 · I2      **CMF3:** D

que relaciona el suceso de salida, o suceso buscado, en función de los sucesos iniciales.

Espera  
Misión  
Demanda

Definimos un **conjunto mínimo de fallos** al “suceso CMF” formado por el menor número de sucesos básicos cuya ocurrencia es necesaria y suficiente para causar un Fallo Principal (top event).

RiskSpectrum PSA Professional - C:\TEMP\CASOBASE\CASOBASE.RSD - [MCS Results( 1):EFDN]

ID	Description	Calc.type	Mean	5th perc.	Median	95th perc.
EFDN		F	2,92E-05	7,77E-06	1,96E-05	8,19E-05
RT		F	1,82E-06	5,14E-09	6,93E-07	7,01E-06
RT-5		F	1,09E-06			
T1		F	2,84E-06	9,92E-08	1,75E-06	9,63E-06
T1-T12-16		F	1,45E-07			
T10		F	6,56E-09	5,09E-11	1,35E-09	2,35E-08
T12		F	2,12E-07	2,52E-09	4,46E-08	8,01E-07
T12-16		F	1,61E-07			
T14		F	3,47E-08	2,36E-09	1,28E-08	1,06E-07

Top event frequency F = 2,919E-05							
No.	Freq.	%	Event 1	Event 2	Event 3	Event 4	Event 5
1	7,851E-06	26,90	11E0000S2F	1F0IHRECAH			
2	3,185E-06	10,91	11E0000T2F	1FD0EDYBLH	1F0AACONTH		
3	9,226E-07	3,16	11E0000T2F	1F0AACONTH	1F0IHRECAH		
4	6,238E-07	2,14	11E0000T4F	1FD0EDYBLH	1F0AACONTH		
5	5,680E-07	1,95	11E00000VF				
6	5,118E-07	1,75	11E0000S2F	1B0M14001AL			
7	5,040E-07	1,73	11E0000RTF	1FORRMANUH			
8	4,329E-07	1,48	11E0000S3F	1F0DISINYH	1F0IHRECAH		
9	4,290E-07	1,47	11E0000RVF				
10	4,178E-07	1,43	11E0000T2F	10NBVEGCAF	1P1PKTRNBP		
11	4,178E-07	1,43	11E0000T2F	10NBVEGCDF	1P1PKTRNAP		
12	3,871E-07	1,33	11E0000T3F	1FD0EDYBLH	1F0AACONTH		
13	3,451E-07	1,18	11E0000T8F	1FD0EDYBLH	1F0AACONTH		
14	3,058E-07	1,05	11E0000S2F	1VM140010L			
15	2,862E-07	0,98	11E0000T9AF	10NBVEGCDF			
16	2,372E-07	0,81	11E0000S3F	1B0M14001AL			
17	2,262E-07	0,78	11E0000S2F	1VM1115BDL			
18	2,103E-07	0,72	11E0000S1F	1F0IHRECAH			
19	1,932E-07	0,66	11E0000S3F	1F1RRSTOPH	1F0IHRECAH		
20	1,807E-07	0,62	11E0000T4F	1F0AACONTH	1F0IHRECAH		
21	1,627E-07	0,56	11E0000T1F	1GDGD000BR	1NECALMIO	1VA100037C	
22	1,623E-07	0,56	11E0000T5F	1F0IHRECAH	1PSGTRINDU		
23	1,593E-07	0,55	11E0000T12F	1FD0EDYBLH	1F0AACONTH		
24	1,354E-07	0,46	11E0000RTF	1CBBVA402F	1VA300001C		
25	1,354E-07	0,46	11E0000RTF	1CBBVA103F	1VA300001C		
26	1,337E-07	0,46	11E0000T2F	10NBVEGCAF	10NBVEGCDF		
27	1,318E-07	0,45	11E0000T1F	1FD0EDYBLH	1F0AACONTH		
28	1,276E-07	0,44	11E0000T6F	1F0IHRECAH	1PSGTRINDU		
29	1,259E-07	0,43	11E0000T5F	1FD0EDYBLH	1F0AACONTH		
30	1,225E-07	0,42	11E0000RTF	1VPPQRVSL			
31	1,196E-07	0,41	11E0000T2F	1CTEMP7PCF	1MBPRCRDMF		
32	1,121E-07	0,38	11E0000T3F	1F0AACONTH	1F0IHRECAH		
33	1,085E-07	0,37	11E0000S3F	1VE430A04L			
34	9,995E-08	0,34	11E0000T8F	1F0AACONTH	1F0IHRECAH		
35	8,688E-08	0,30	11E0000RTF	1F1DISPRFH	1F0IHRECAH		

MCS System    Mod.MCS Ev. Gips    Bas.ev. CDF    CCF Gr. PDF    Param. Time-dep.    Attrib. Stat.    Comp. Chart

## Medidas de importancia

Definición	Nombre	Descripción
$B_i = R_{1,i} - R_{0,i}$	Birnbaum	Es la diferencia entre el riesgo condicional incrementado y el riesgo condicional reducido. Valora el rango del riesgo asociado a un funcionamiento correcto y un fallo del elemento $i$ . Para obtener $R_{1,i}$ , al elemento $i$ se le asigna una indisponibilidad total = 1 y para obtener $R_{0,i}$ , al elemento $i$ se le asigna una fiabilidad total = 0.
$A_i = R_{1,i} / R_n$	Factor de incremento de riesgo (FIR) o Risk Increase Factor (RIF) o Risk Archivement Worth (RAW)	Es el cociente entre el riesgo asociado al fallo del elemento $i$ en relación al riesgo general. Esta medida proporciona información sobre la degradación del sistema en relación al fallo del elemento $i$ . Los valores del RAW están entre $[1, \infty]$ .
$D_i = R_n / R_{0,i}$	Factor de disminución de riesgo (FDR) o Risk Reduction Factor (RRF) o Risk Reduccion Worth (RRW)	Es el cociente entre el riesgo nominal general y el riesgo condicionado reducido debido al fallo del elemento $i$ . Proporciona información sobre la importancia del fallo del elemento $i$ en el riesgo general. Los valores del RRW están entre $[1, \infty]$ .
$C_i = (R_n / R_{0,i}) / R_n$	Fracción de contribución al riesgo (FCR) o Fussell Vesely (FV)	Es el cociente en incremento del riesgo nominal derivado del fallo del elemento $i$ en relación al riesgo nominal. Describe la fracción del riesgo nominal afectada por un correcto funcionamiento del elemento $i$ . Los valores de FV están entre $[0, 1]$ .

Tabla 2.3: Definición de algunas medidas de importancia

## Estudios de sensibilidad.

Los estudios de sensibilidad resultan **necesarios para justificar las hipótesis realizadas en el análisis de cambios de ETF**, ya que una vez se ha obtenido la FDN puede resultar necesario evaluar en qué forma se ven afectados estos resultados al modificar los modelos o las estimaciones correspondientes a algunos sucesos básicos. Dentro de los estudios de sensibilidad pueden destacarse: **Evaluación del efecto de un cambio en la probabilidad de fallo humano en el nuevo contexto (tras la extensión de pruebas de vigilancia).**

## Medidas compensatorias.

Los cambios en las ETF pueden causar, como máximo, pequeños incrementos del riesgo en la seguridad de la planta. Consecuentemente, en las evaluaciones del cambio de ETF propuesto puede **resultar necesario considerar ciertas medidas compensatorias que puedan contrarrestar el incremento del riesgo** a la vista de los criterios de aceptación o como consecuencia de las consideraciones sobre la capacidad de prevención de configuraciones de planta significativos para el riesgo. Dentro de las medidas compensatorias destaca la incorporación de una **estrategia de pruebas escalonada en componentes que presentan fallos de causa común, dentro de una solicitud de extensión del tiempo entre pruebas.**

La aplicación APS a mejora de requisitos de seguridad, esta sujeta a incertidumbres:

## INCERTIDUMBRES EPISTÉMICAS

Incertidumbre de completitud

Incertidumbre de modelos

Incertidumbre de parámetros



Aproximación racional al problema del análisis de Incertidumbres

### ❖ Incertidumbre de completitud:

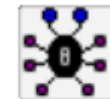
Se debe a las carencias en la comprensión teórica y formal de los procesos.

### ❖ Incertidumbre de modelos:

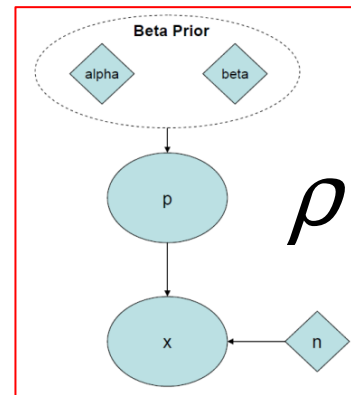
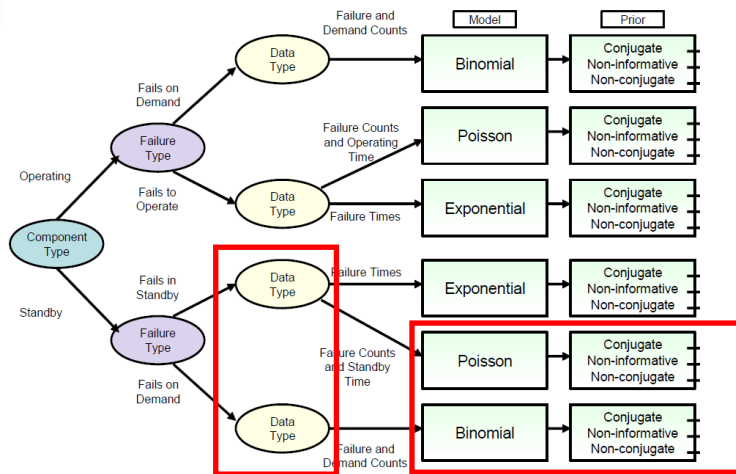
Se debe a la inexactitud de nuestro modelo.

### ❖ Incertidumbre de los parámetros:

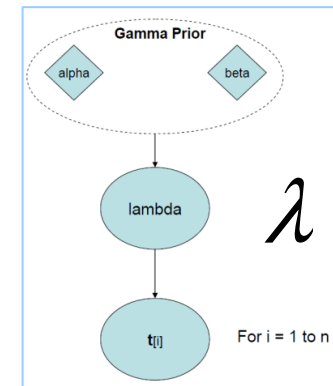
Se debe a la falta de precisión en la determinación de los factores.



WinBUGS



**Beta como conjugada con respecto a los experimentos binomiales**

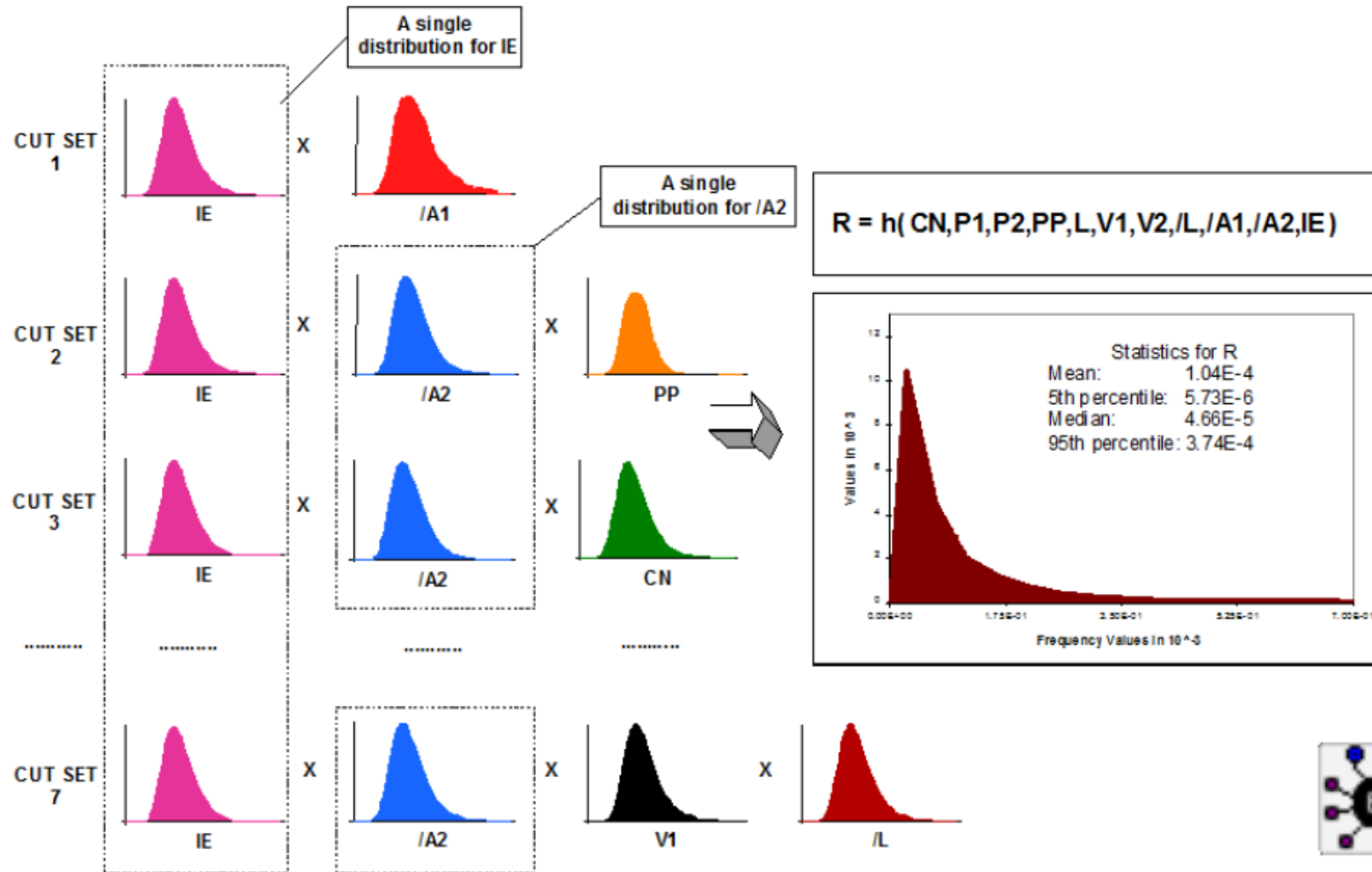


**Gamma como conjugada de la distribución Poisson**

En el caso del APS nivel 1, el proceso bayesiano utiliza una distribución previa, y una función de verosimilitud que recoge la experiencia de la planta, cuya combinación a través del teorema de Bayes produce la distribución a posteriori del parámetro de interés. Las distribuciones previas para las probabilidades y tasas de fallos involucradas en los diferentes sucesos básicos son Beta y Gamma, respectivamente.

La condición de la familia de **distribuciones Beta como conjugada con respecto a los experimentos binomiales** y de la familia de **distribuciones Gamma como conjugada de la distribución Poisson** proporcionan **distribuciones a posteriori Beta y Gamma, respectivamente, perfectamente identificadas.**

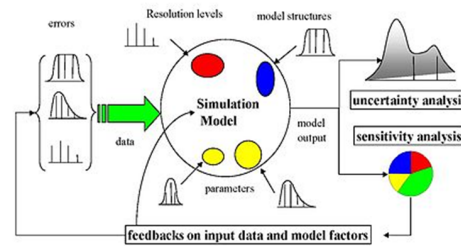




Fuente: NASA/SP-2011-3421. Probabilistic Risk Assessment Procedures Guide for NASA Managers and Practitioners. National Aeronautics and Space Administration (NASA), 2011.



En general, el método de Sobol proporciona dos índices de sensibilidad como medida de importancia: el **índice de primer orden** y el **índice de segundo orden**. El **índice de primer orden** mide la influencia promedio de un factor sobre la salida del modelo y el **índice de segundo orden** mide el efecto de la interacción entre factores sobre la varianza, (Saltelli *et al.*, 2000).

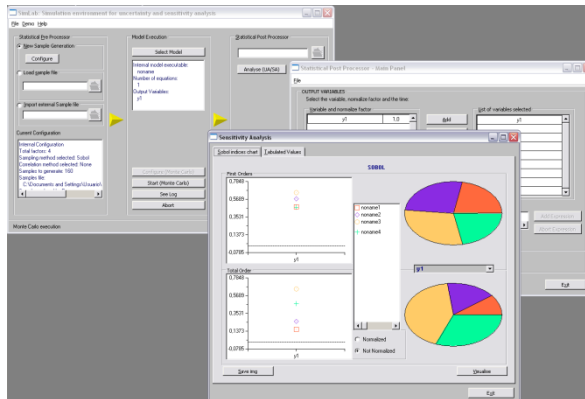


SimLab

Opciones



Meta-Models



<http://ipsc.jrc.ec.europa.eu/?id=756>

Reliability Engineering and System Safety 94 (2009) 1735–1763

Contents lists available at ScienceDirect

ELSEVIER Reliability Engineering and System Safety journal homepage: [www.elsevier.com/locate/ress](http://www.elsevier.com/locate/ress)

Implementation and evaluation of nonparametric regression procedures for sensitivity analysis of computationally demanding models

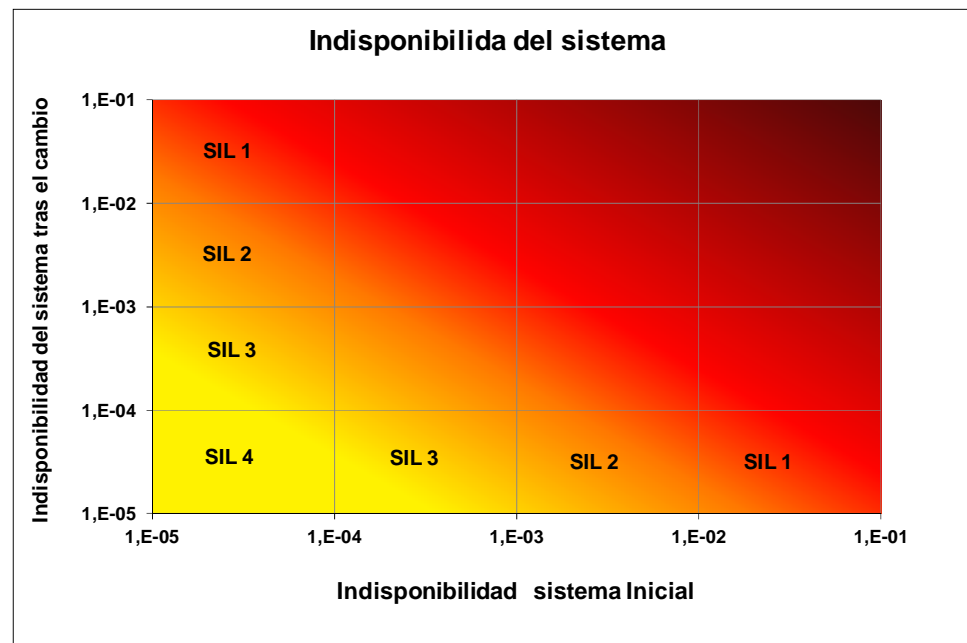
Curtis B. Storlie<sup>a,\*</sup>, Laura P. Swiler<sup>b</sup>, Jon C. Helton<sup>c</sup>, Cedric J. Sallaberry<sup>b</sup>

<sup>a</sup> University of New Mexico, Department of Mathematics and Statistics, Albuquerque, NM 87131-0001, USA  
<sup>b</sup> Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM 87185-1388, USA  
<sup>c</sup> Arizona State University, Department of Mathematics and Statistics, Tempe, AZ 85287-1804, USA

## Criterios de aceptación a nivel de sistema

Los requisitos de integridad para cada función de seguridad deben especificarse en términos probabilísticos a través de la **Probabilidad media de disfunción peligrosa bajo demanda de la función de seguridad, PFDavg**, un modo de funcionamiento en baja demanda, como es el caso de sistemas de seguridad. Estos requisitos deben especificarse en términos de los denominados Niveles de Integridad de Seguridad, SIL,

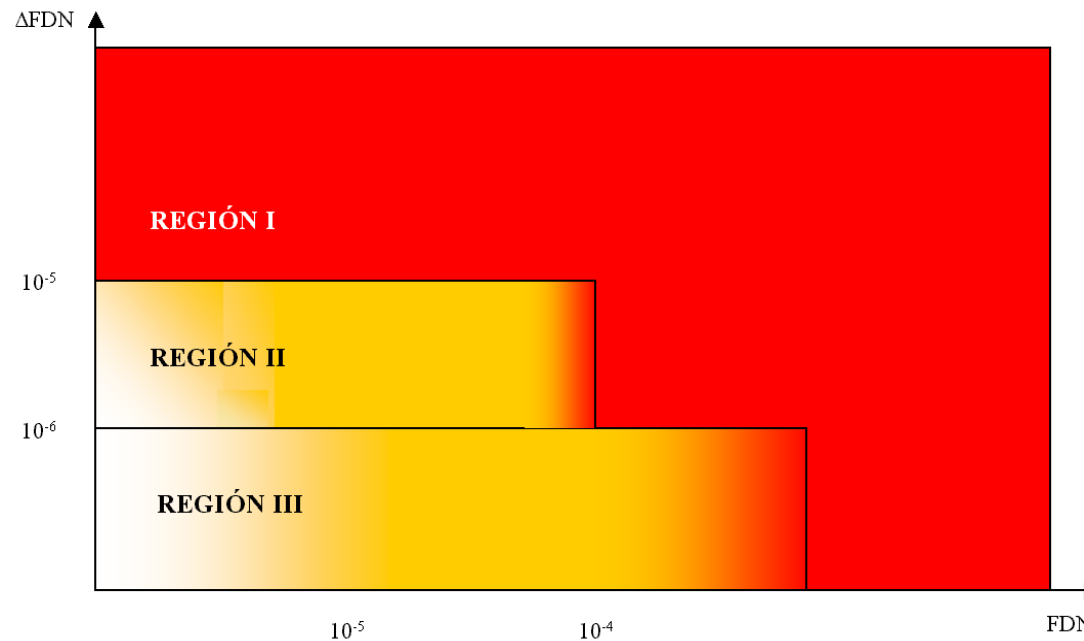
**Probabilidad media de disfunción peligrosa bajo demanda de la función de seguridad, PFDavg,**



## Criterios de aceptación a nivel de planta, RG 1.174:2011.

Los criterios de aceptación generales que utilizaremos para la valoración del impacto en el riesgo de un cambio de ETF son los propuestos para cualquier cambio en las bases de licencia, que valoran el incremento del riesgo en términos de la **Frecuencia de Daño al Núcleo FDN** para APS nivel I.

### Frecuencia de Daño al Núcleo FDN y $\Delta$ FDN



## Toma de Decisiones con información en el riesgo.

Una vez desarrolladas cada una de las etapas del análisis del APS encaminadas a evaluar la propuesta de cambio de ETF, en las que se estima que, **tras el cambio, el incremento de la FDN y/o riesgo, son pequeños y no excederán los criterios de aceptación (Primer principio básico), se incluyen los estudios de sensibilidad y las medidas compensatorias, la propuesta podrá ser tenida en cuenta para su posterior evaluación ante el organismo regulador.**

Para ello se debe presentar un informe detallado de los resultados alcanzados en cada una de las etapas, se deben justificar todas y cada una de las hipótesis planteadas y se debe entregar toda la documentación soporte de los análisis realizados. **La documentación debe ser escrutable y rastreable.** Esta información debe formar parte del programa normal de archivo de garantía de calidad y debe mantenerse de acuerdo a la regulación vigente (GS-1.17, 2007).



# Casos de Aplicación

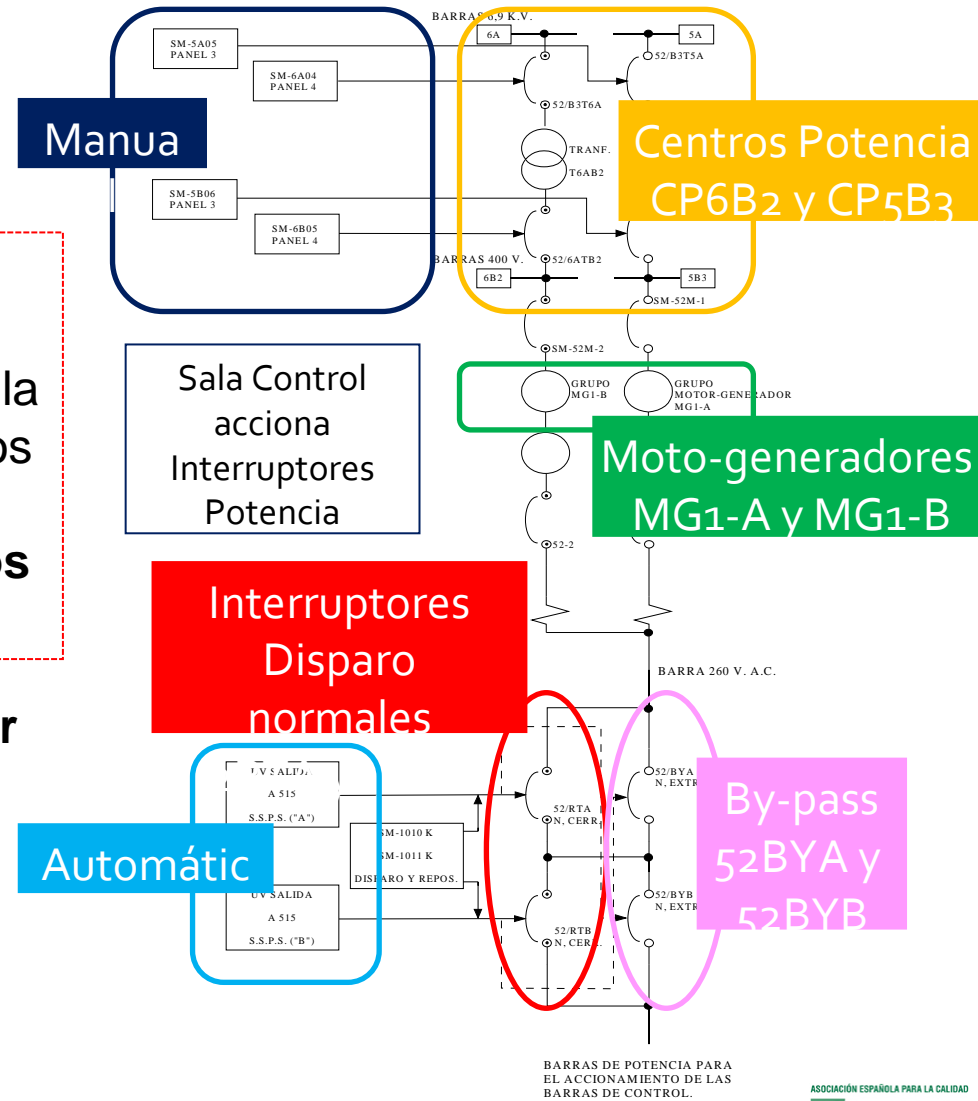
- I. Casos de aplicación a nivel de Sistema
- II. Casos de aplicación a nivel de Planta



## Descripción del Sistema

El sistema de protección del reactor de una central nuclear PWR mantiene automáticamente la operación del reactor dentro de los límites de seguridad **parándolo siempre que se alcancen dichos límites.**

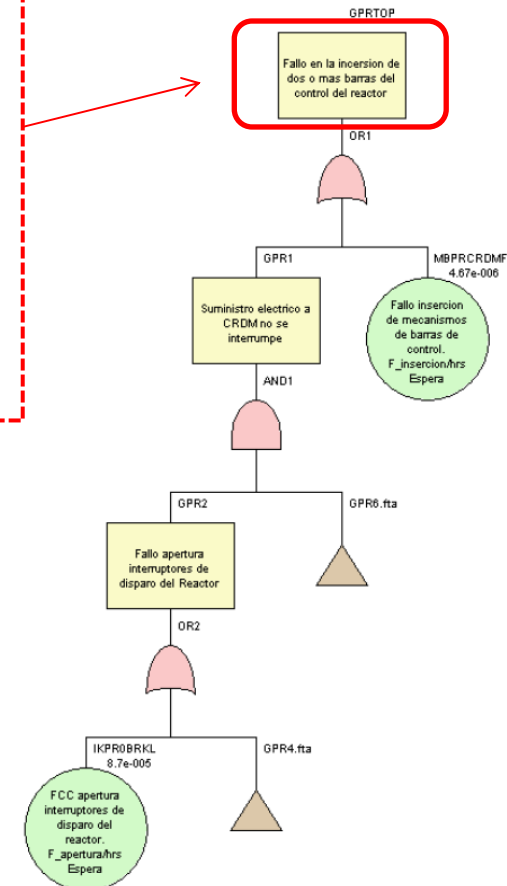
**¡ Es redundante para garantizar la fiabilidad !**



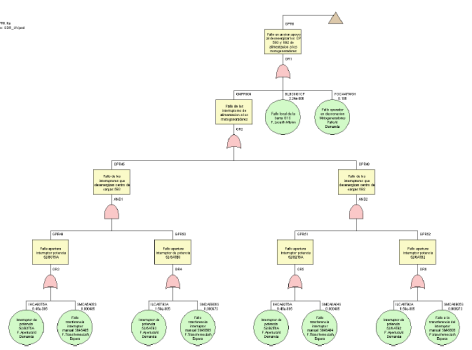
## Se identifican 34 sucesos básicos del Sistema

SUCESO BASICO	DESCRIPCION	MODELO
1BLBCOG1CF	Fallo local de la barra G1C de 125 V CC	Misión
1FOCAATWSH	Operador falla a desconexión de los motogeneradores	Demanda
1FOPRATWSH	Error humano actuación sistema de disparo reactor	Demanda
1FUPROOF1T	Apertura prematura del fusible F1	Espera
1FUPROOF2T	Apertura prematura del fusible F2	Espera
1FUPROOF5T	Apertura prematura del fusible F5	Espera
1FUPROOF6T	Apertura prematura del fusible F6	Espera
1IHCAB2T6A	Interruptor de potencia 52/B2 T6A falla a la apertura	Demanda
1IHCAB3T5A	Interruptor de potencia 52/B3 T5A falla a la apertura	Demanda
1IKPROBRKL	FCC Apertura Interruptor de Disparo del Reactor	Espera
1IKPROBYAA	Interruptor de by-pass 52/BYA falla a la apertura	Espera
1IKPROBYBA	Interruptor de by-pass 52/BYB falla a la apertura	Espera
1IKPRORTAA	Interruptor de disparo 52/RTA falla a la apertura	Espera
1IKPRORTBA	Interruptor de disparo 52/RTB falla a la apertura	Espera
1M1P RORTAM	Interruptor de disparo 52/RTA en mantenimiento	Demanda
1M1P RORTBM	Interruptor de disparo 52/RTB en mantenimiento	Demanda
1MBPRCRDMF	Fallo inserción de mecanismos de barra de control	Espera
1MCPK515AF	Fallo módulo de control lógico A515 (tren A) Señal alta	Espera
1MCPK515BF	Fallo módulo de control lógico A515 (tren B) Señal alta	Espera
1P1PRORTAP	Interruptor de disparo 52/RTA en pruebas	Demanda
1P1PRORTBP	Interruptor de disparo 52/RTB en pruebas	Demanda
1REPRSHTAE	Fallo a la energización relé SHUNT del 52/RTA	Demanda
1REPRSHTBE	Fallo a la energización relé SHUNT del 52/RTB	Demanda
1REPRSTAAD	Fallo a la energización del relé STB/52RTA	Demanda
1REPRSTBBD	Fallo a la energización del relé STB/52RTB	Demanda
1REPRUVBAD	Fallo a la desenergización del relé UV del 52/BYA	Demanda
1REPRUVBBD	Fallo a la desenergización del relé UV del 52/BYB	Demanda
1REPRUVTAD	Fallo a la desenergización del relé UV del 52/RTA	Demanda
1REPRUVTBD	Fallo a la desenergización del relé UV del 52/RTB	Demanda
1SMCA5A05S	Fallo transferencia interruptor manual SM/5A05	Espera
1SMCA5B06S	Fallo del interruptor manual SM/5 B06	Espera
1SMCA6A04S	Fallo del interruptor manual SM/6 A04	Espera
1SMCA6B05S	Fallo del interruptor manual SM/6 B05	Espera

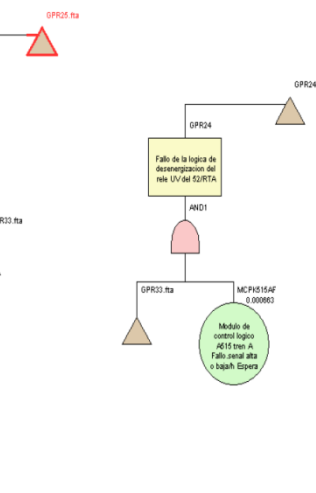
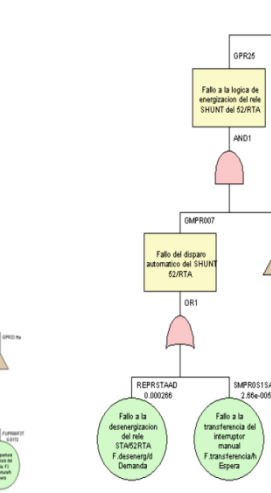
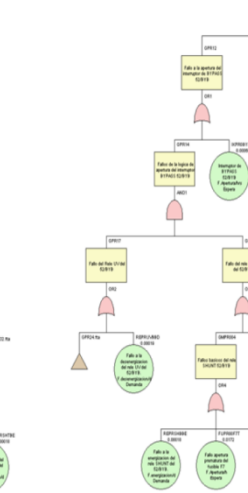
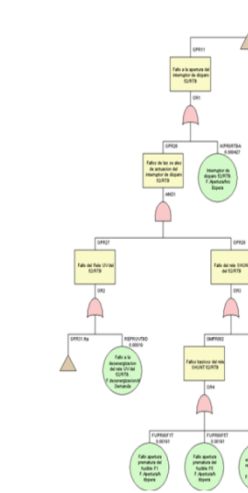
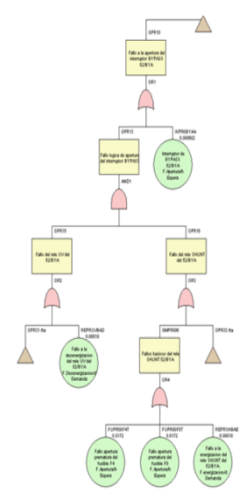
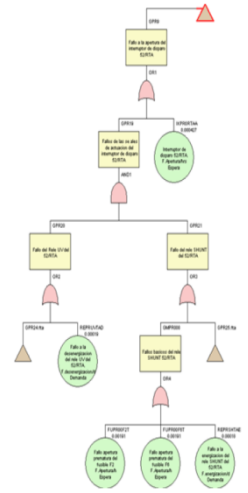
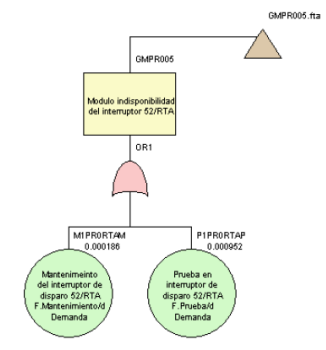
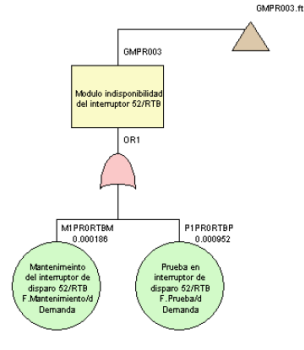
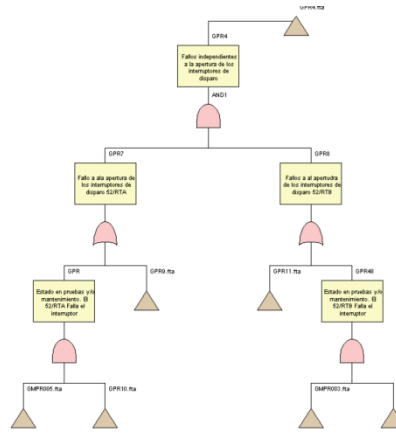
Árbol de fallos del sistema el cual modela la no fiabilidad de la función de disparo del reactor siendo este el suceso TOP del árbol



Tree: GPR4.fta

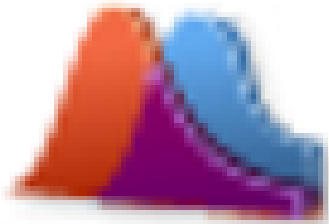


Tree: GPR4.fta  
Database: GPR\_V1.rdb



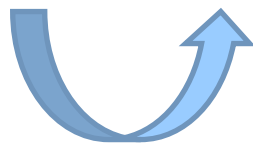


1. Selección de parámetros a estudiar y asignación de las distribuciones.



$\rho$

$\lambda$



Sucesos básicos y modo de fallo	Parámetro	Genérica	Previa	Datos	Posteriori	Indisponibilidad media a posteriori: 2 y 3 meses
ILCA5TB3A: Fallo a la apertura: Interruptor de potencia 52/5ATB3	$\rho$	LN(1.60E-5;10)	Be(1.60E-5; 0.49;30625)	Bi(nºf=0; nºd=116)	Be(1.59E-5; 0,49;30741)	1.59E-5
ILCA6TB2A: Fallo a la apertura: Interruptor de potencia 52/6ATB2						
REPRSTAE: Fallo a la energización relé SHUNT del 52/RTA	$\rho$	LN(2.66E-4;10)	Be(2.66E-4; 0.49;1842.105)	Bi(nºf=0; nºd=882)	Be(1.80E-4; 0.49;2724.11)	1.80E-4
REPRSTBE: Fallo a la						

Sucesos básicos y modo de fallo	Parámetro	Genérica	Previa	Datos	Posteriori	Indisponibilidad media a posteriori: 2 y 3 meses
REPRSTAAD: Fallo a la desenergización del relé STB/52RTA.	$\rho$	LN(2.66E-4;10)	-	-	-	2.66E-4
REPRSTBBD: Fallo a la desenergiza						

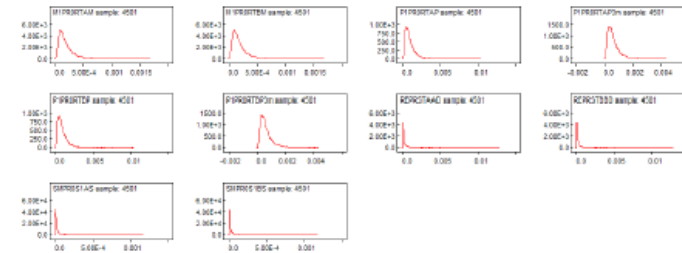
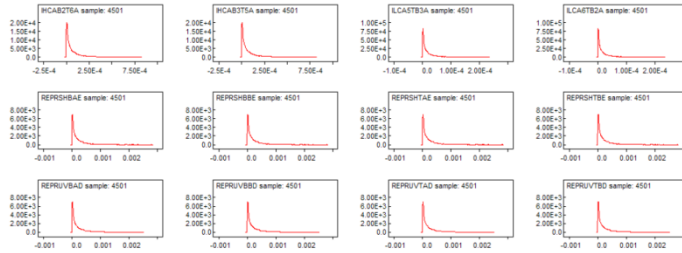
Sucesos básicos y modo de fallo	Parámetro	Genérica	Previa	Datos	Posteriori	Tiempo entre pruebas	$u_d$ : 2 y 3 meses
MI tor mie MI tor mie PI de c PI tor SM ren SM ren							
IKPROBYAA: Interruptor de by-pass 52/BYA falla a la apertura.	$\lambda_e$	LN(8.41E-7; 10)	Ga(8.41E-7; 0.49;5.83E+5)	Pois(nºf=1; nºh=991440)	Ga(9.47E-7; 1.49;1.57E+6)	2m:1440 3m:2160	6.81E-4 1.02E-3

Sucesos básicos y modo de fallo	Parámetro	Genérica	Previa	Datos	Posteriori	Tiempo entre pruebas	$u_d$ : 2 y 3 meses
IK by-ape SM ren SM ren							
FUPR00F1T: Fallo a la Apertura prematura del fusible F1	$\lambda_e$	LN (2.66E-6; 10); Mediana:9.9854E-7.				2m:1440 3m:2160	1.91E-4 2.87E-3

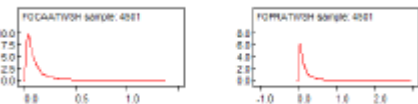
Sucesos básicos y modo de fallo	Parámetro	Genérica	Previa	Datos	Posteriori	Tiempo misión	Indisponibilidad media a posteriori: 2 y 3 meses
MOC neta p con Señ							
FUPR00F3T: Fallo a la apertura prematura del							
BLBC0G1CF: Fallo a mantener su función de barras de corriente continua de no seguridad local de la barra G1C de 125 V CC.	$\lambda_m$	LN(1.0E-7;5)	Ga(1.0E-7; 0.91;9.1E+6)	Pois(nºf=0; nºh=631536)	Ga(9.35E-8; 0.910;9.73E+6)	24 hs	2.24E-6

Sucesos básicos y modo de fallo	Parámetro	Genérica	Previa	Datos	Posteriori	Indisponibilidad media a posteriori: 2 y 3 meses
FUPR00F3T: Fallo a la apertura prematura del						
FOCAATWSH: Fallo operador en la desconexión de la alimentación de los moto-generadores.	$\rho$		LN(1.05E-1;5)			1.05E-1
FOPRATWSH:Fallo Operador en actuación Disparo del Reactor.	$\rho$		LN(1.66E-1;5)			1.66E-1

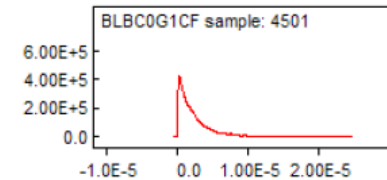
## Sucesos básicos de indisponibilidad por demandas.



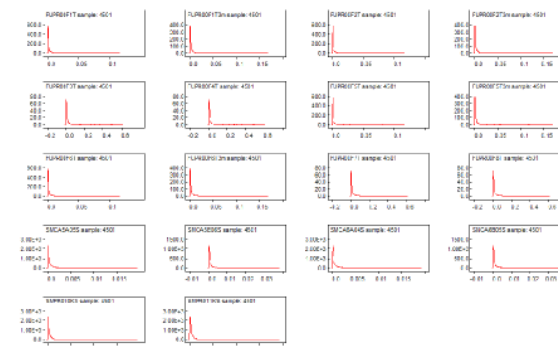
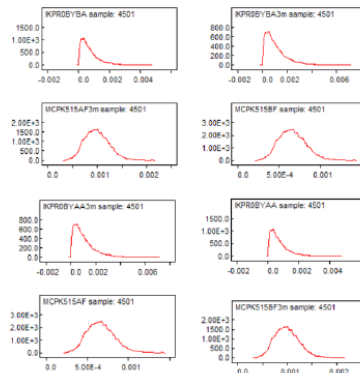
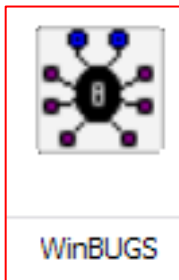
## Sucesos básicos de indisponibilidad por fallos humanos.



## Sucesos básicos de fallo en misión.



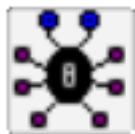
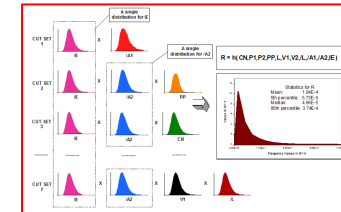
## Sucesos básicos asociados a fallos en espera.



Primero se establece el modelo:

Se ha desarrollado el árbol de fallos del sistema y se han obtenido los conjuntos mínimos de corte (MCS), es decir combinaciones de ocurrencia de sucesos básicos que llevan a la ocurrencia del suceso TOP.

Cuantificación a Nivel de Sistema: Sistema de Disparo del Reactor (2 meses)										
Conjunto Mínimo de Fallos	P(CMF)		Indisponibilidad del los sucesos básico							
			SUCESOS	SUCESOS	SUCESOS	SUCESOS	SUCESOS	SUCESOS	SUCESOS	
CMF 1	4.67E-6	=	MBPRCRDMF	-	-	-	-	-	-	
CMF 2	1.33E-10	=	BLBC0G1CF	X	IKPR0BRKL	-	-	-	-	
CMF 3	6.23E-06	=	FOCAATWSH	X	IKPR0BRKL	-	-	-	-	
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	
CMF 105	4.34E-18	=	BLBC0G1CF	X	FUPR00F7T	X	IKPR0RTAA	X	P1PR0RTBP	X
CMF 106	8.848E-19	=	BLBC0G1CF	X	FUPR00F8T	X	IKPR0RTBA	X	M1PR0RTAM	X
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	
CMF 278	1.00E-17	=	IKPR0RTBA	X	REPRSHTAE	X	REPRVTAD	X	SMCA6A06S	X
CMF 279	1.00E-17	=	IKPR0RTBA	X	REPRSHTAE	X	REPRVTAD	X	SMCA6A04S	X
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	
PF <sub>D,avg,2meses</sub>	1.09E-05		Probabilidad de fallo del sistema de disparo del reactor							

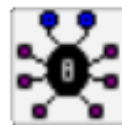
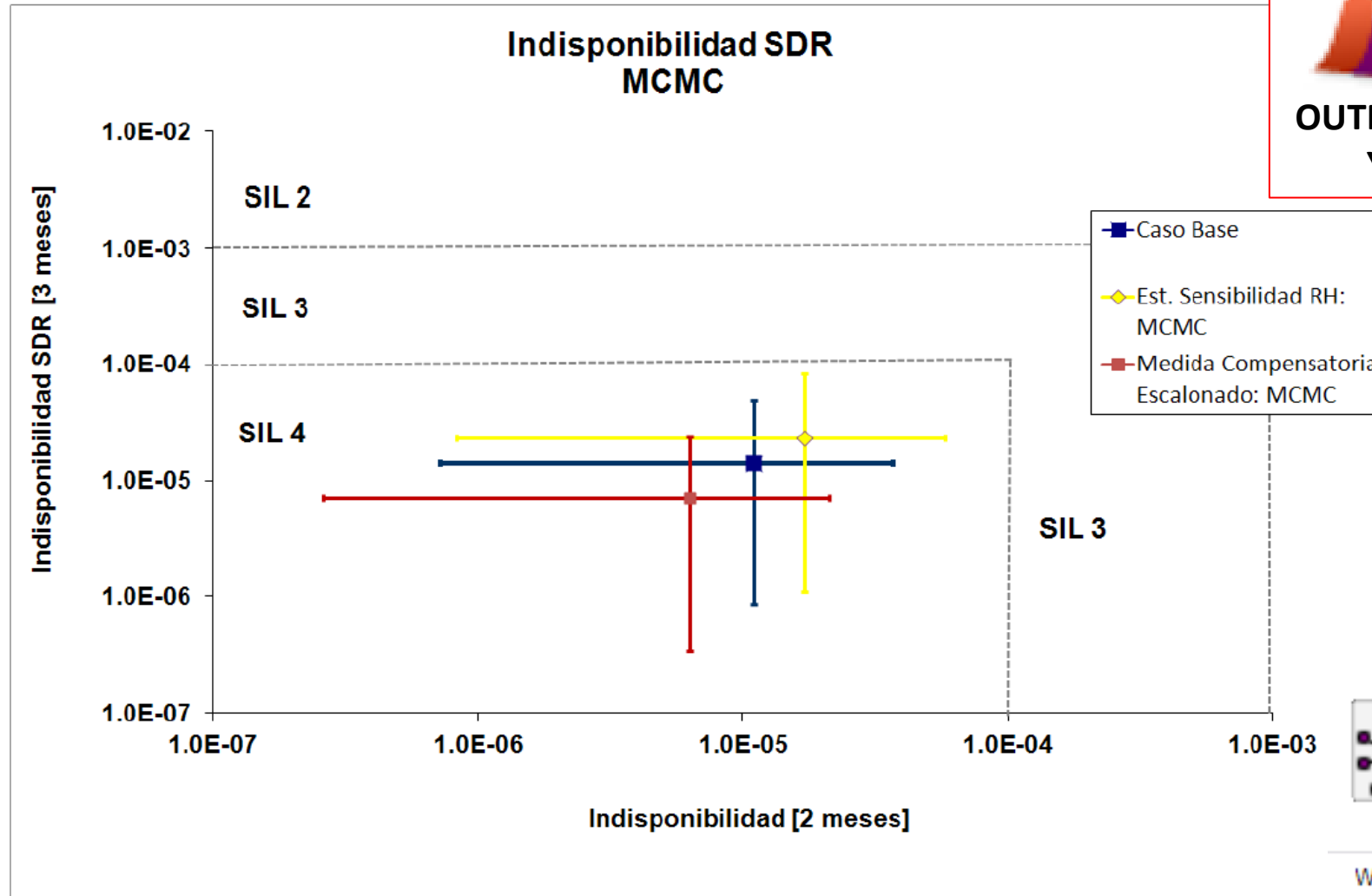


WinBUGS

Cuantificación a Nivel de Sistema: Sistema de Disparo del Reactor (3 meses)										
Conjunto Mínimo de Fallos	P(CMF)		Indisponibilidad del los sucesos básico							
			SUCESOS	SUCESOS	SUCESOS	SUCESOS	SUCESOS	SUCESOS	SUCESOS	
CMF 1	4.67E-6	=	MBPRCRDMF	-	-	-	-	-	-	
CMF 2	1.99E-10	=	BLBC0G1CF	X	IKPR0BRKL3m	-	-	-	-	
CMF 3	9.33E-6	=	FOCAATWSH	X	IKPR0BRKL3m	-	-	-	-	
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	
CMF 105	4.34E-18	=	BLBC0G1CF	X	FUPR00F7T	X	IKPR0RTAA3m	X	P1PR0RTBP3m	X
CMF 106	1.27E-18	=	BLBC0G1CF	X	FUPR00F8T	X	IKPR0RTBA3m	X	M1PR0RTAM	X
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	
CMF 278	1.00E-17	=	IKPR0RTBA3m	X	REPRSHTAE	X	REPRVTAD	X	SMCA5A05S	X
CMF 279	1.00E-17	=	IKPR0RTBA3m	X	REPRSHTAE	X	REPRVTAD	X	SMCA6A04S	X
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	
PF <sub>D,avg,3meses</sub>	1.41E-05		Probabilidad de fallo del sistema de disparo del reactor							



**OUTPUTS**  
Y



WinBUGS

## Resultados medidas de importancia

Suceso	media	sd	MC error	2,5 %	5 %	50 %	95 %	97,5 %
FV-BLBC0G1CF	2.23E-02	4.34E-02	2.86E-03	1.09E-7	1.68E-04	6.37E-03	1.18E-01	1.92E-01
FV-FOCAATWSH	0.4881	0.3536	0.02139	0.007823	0.01766	0.4585	0.9929	0.9984
FV-IKPR0BRKL	0.481	0.3511	0.02127	0.007848	0.01766	0.4493	0.9851	0.993
FV-IKPR0RTAA	0.007192	0.01534	8.50E-01	1.35E-02	5.13E-02	0.002497	0.02706	0.04368
FV-IKPR0RTBA	0.007192	0.01534	8.50E-01	1.35E-02	5.13E-02	0.002497	0.02706	0.04368
RAW-BLBC0G1CF	10.85	15.24	1.009	1.205	1.361	5.838	35.25	50.53
RAW-FOCAATWSH	10.37	15.1	0.9965	1.123	1.262	5.468	34.77	49.57
RAW-IKPR0BRKL	28850.0	90190.0	6395.0	953.7	1452.0	10940.0	108300.0	148200.0
RAW-IKPR0RTAA	10.71	15.52	0.891	1.213	1.395	6.153	36.09	40.72
RAW-IKPR0RTBA	10.71	15.52	0.891	1.213	1.395	6.153	36.09	40.72

Tabla 3.20: Descripción de las muestras obtenidas por MCMC de la distribución *a posteriori* de las medidas de importancia RAW y FV, para un tiempo entre pruebas de dos meses.

## Resultados índice de sensibilidad.

Meta-Models

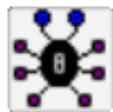
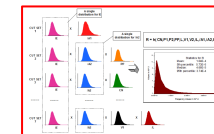
Parámetro	$S_i$	$S_{Ti}$	$S_{Ti} - S_i$
PostMBPR0F	0.401	0.380	-0.021
Falfa1	0.325	0.313	-0.012
PdF0CAATWSH	0.145	0.145	0.000
PostIKPR0A	0.110	0.138	0.028
TOTAL	0.981	0.976	-

Tabla 3.22: Resultados de los índices de Sobol utilizando como meta-modelo un modelo de regresión no paramétrica GAM, ( $PFD_{avg2m}$ ).



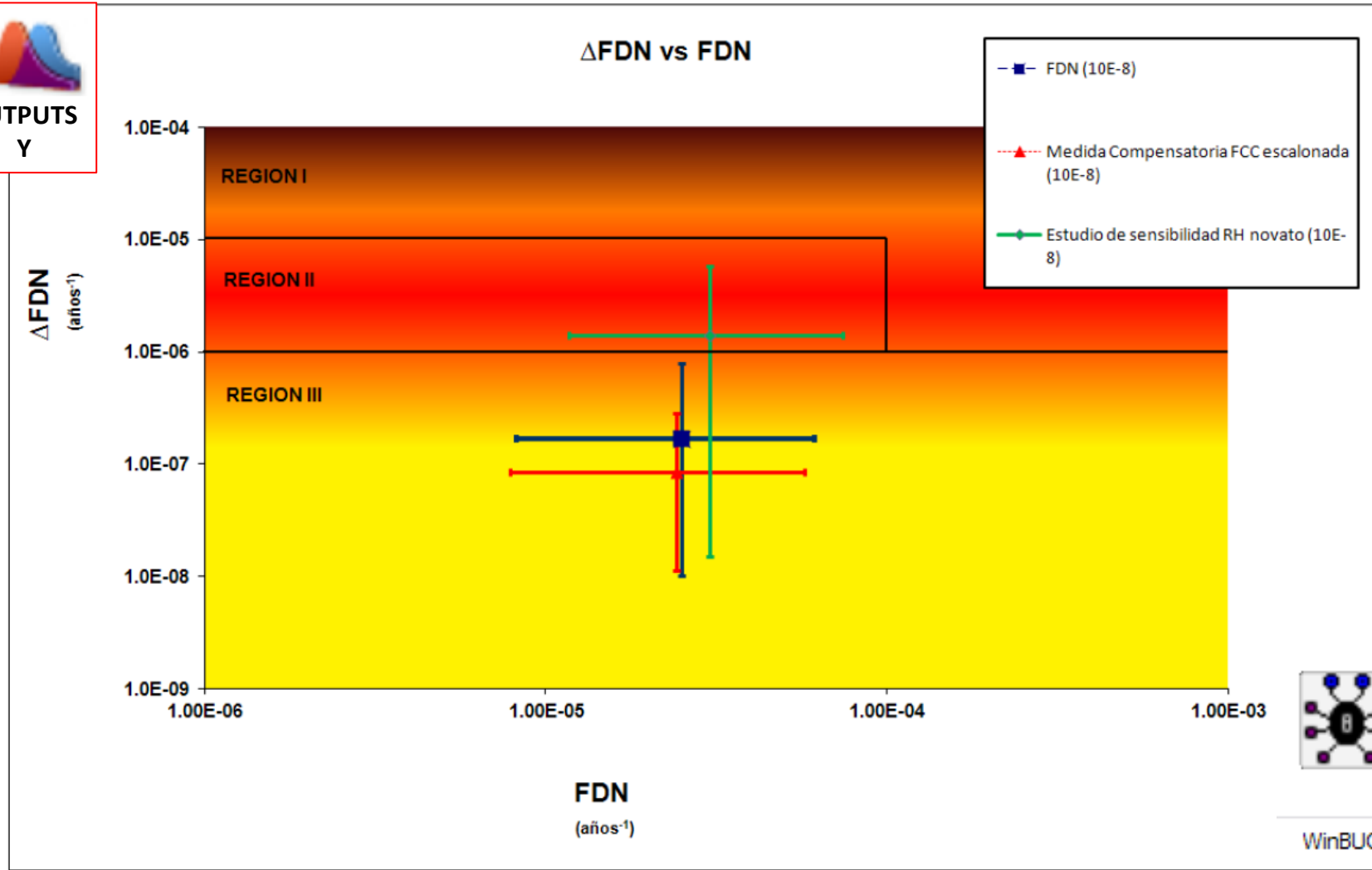
Se han obtenido los conjuntos mínimos de corte (MCS), para la Frecuencia de daño al núcleo FDN.

Cuantificación a Nivel de PLANTA: Modificación al tiempo entre pruebas del Sistema de Disparo del Reactor (2 meses)										
Conjunto Mínimo de Fallos	P(CMF)		Indisponibilidad del los sucesos básico							
			SUCESOS	SUCESOS	SUCESOS	SUCESOS	SUCESOS	SUCESOS	SUCESOS	
CMF 1	7.85E-06	=	11E000S2F		1FOIHRECAH	-	-	-	-	-
CMF 2	3.19E-06	=	11E000T2F	X	1FDOEDYBLH	-	1FOAACONTH	-	-	-
CMF 3	9.23E-07	=	11E000T2F	X	1FOAACONTH	-	1FOIHRECAH	-	-	-
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
CMF 105	1.99E-08	=	11E000T8F	X	1M4CA009AM	X	1VA100037C	-	-	-
CMF 106	1.98E-08	=	11E000S2F	X	11H14P01BC	X	1VM150002A	-	-	-
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
CMF 233	1.03E-08	=	11E000T1F	X	1GDGD000BR	X	1M1AA00B1M	X	1VM300078A	-
CMF 234	1.01E-08	=	11E000T1F	X	1CABCAF16F	X	1GDGD000AR	-	-	-
<b>FDN_2meses</b>	<b>2.49E-05</b>		Frecuencia de Daño al Núcleo, FDN/año. Tiempo entre pruebas de 2 meses, y la estrategia para FCC es secuencial							



WinBUGS

Cuantificación a Nivel de PLANTA: Modificación al tiempo entre pruebas del Sistema de Disparo del Reactor (3 meses)										
Conjunto Mínimo de Fallos	P(CMF)		Indisponibilidad del los sucesos básico							
			SUCESOS	SUCESOS	SUCESOS	SUCESOS	SUCESOS	SUCESOS	SUCESOS	
CMF 1	7.85E-06	=	11E000S2F		1FOIHRECAH	-	-	-	-	-
CMF 2	3.19E-06	=	11E000T2F	X	1FDOEDYBLH	-	1FOAACONTH	-	-	-
CMF 3	9.23E-07	=	11E000T2F	X	1FOAACONTH	-	1FOIHRECAH	-	-	-
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
CMF 105	2.62E-08	=	11E000T4F	X	1ONBVEGCAF	X	1ONBVEGDF	-	-	-
CMF 106	2.60E-08	=	11E000T2F	X	1CBBVAL1FF	X	1MBPRCRDMF	-	-	-
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
CMF 233	1.02E-08	=	11E000T4F	X	1CBBVAL1FF	X	1FOCAATWSH	X	11KPROBRKL	-
CMF 234	1.01E-08	=	11E000T1F	X	1CABCAF16F	X	1GDGD000AR	-	-	-
<b>FDN_3meses</b>	<b>2.57E-05</b>		Frecuencia de Daño al Núcleo, FDN/año. Tiempo entre pruebas de 3 meses, y la estrategia para FCC es secuencial							



WinBUGS





### 5. Conclusiones, Trabajo Futuro y Agradecimientos



De acuerdo a los resultados obtenidos en los análisis se obtienen las siguientes conclusiones respecto a los criterios de aceptación establecidos en las RG 1.174:2011 y IEC 61508:1-7:2011:

1. Se presentó una metodología compuesta de seis etapas, que permitió, analizar el impacto de una modificación de las ETF a nivel de sistema y a nivel de planta, a través del APS, que incluye el efecto de todas las incertidumbres del problema.
2. La Estadística Bayesiana permitió actualizar las distribuciones previas de las probabilidades y tasas de fallos, involucradas en los diferentes sucesos básicos, incorporando a los datos genéricos la información propia de la central nuclear.
3. Se evidenció que el impacto, en la extensión de los tiempos entre pruebas para los interruptores de disparo del reactor de dos a tres meses, respecto a la fiabilidad del sistema medida a través de la probabilidad media de disfunción peligrosa bajo demanda de la función de seguridad,  $PFD_{avg}$ , esta dentro del rango de cumplimiento de los criterios de aceptación según IEC 61508:1-7:2011.

4. Se evidenció que el impacte, en la extensió de los tiempos entre pruebas para los interruptores de disparo del reactor de dos a tres meses, respecto al incremento del riesgo asociado a la frecuencia de daño al núcleo (FDN), esta dentro del rango de cumplimiento de los criterios de aceptación según RG 1.174:2011.
5. Se complementó el análisis con un estudio de sensibilidad referente a la fiabilidad humana en el que se constato el impacto en la medida de riesgo de este tipo de situaciones accidentales.
6. Se evaluó una medida compensatoria a través de la estrategia escalonada para los fallos de FCC. El considerar una estrategia de pruebas escalonada en lugar de una estrategia secuencial para el FCC, es mas favorable puesto que produce un menor impacto en la fiabilidad del sistema y en la medida de riesgo a nivel de planta.

7. Tanto a nivel de sistema como a nivel de planta, la propagación de la incertidumbre utilizando MCMC, ha permitido cuantificar la banda de incertidumbre para las dos medidas de riesgo tanto la PFDavg y FDN, y poder ser comparada con los criterios de aceptación pertinentes.

8. El análisis de sensibilidad se realizó utilizando la regresión no paramétrica GAM como **meta-modelo**, según la metodología propuesta en SANDIA (Storlie et al., 2009; Tian, 2013), , permitiendo idéntica la incertidumbre asociada a la probabilidad de fallo humano, la incertidumbre de la tasa de fallo asociada a los interruptores de disparo y la incertidumbre asociada al fallo de inserción de mecanismos de barra de control, como las de mayor impacto en la varianza de PFDavg.

En consecuencia, se puede afirmar que la propuesta de extensión del intervalo entre pruebas consecutivas de vigilancia programada para los interruptores de disparo del reactor a 3 meses, desde el punto de vista del impacto del cambio, en la fiabilidad del sistema y en el riesgo de la planta, es viable y justificable ante el organismo regulador (CSN).

En cuanto a las líneas de trabajo futuro que se pueden acometer como continuación del trabajo realizado en esta tesis se pueden citar las siguientes:

Completar la puesta a punto de la metodología propuesta para el análisis de cambios de ETF mediante la aplicación del APS con tratamiento de las incertidumbres epistémicas, integrando las incertidumbres de parámetro y modelo, consideradas en detalle en esta tesis, además de las de completitud.

Desarrollo y puesta a punto, mediante casos de aplicación, de procedimientos para llevar a cabo la optimización de pruebas y mantenimiento a nivel de planta, integrando las incertidumbres de parámetro y modelo, sujeta a restricciones de requisitos operacionales impuestos por las ETF, STI y AOT, y restricciones de cumplimiento de metas de seguridad en el contexto de aplicación de la RG 1.177.

- ❖ El trabajo presentado forma parte del Proyecto de Investigación ENE2010-17449 dentro del Programa de Energía del Programa Nacional de I+D+i del Ministerio de Ciencia e Innovación.
- ❖ Los resultados forman parte de una tesina de máster que lleva por título “Inferencia Bayesiana en el Análisis Probabilístico de Seguridad en Centrales Nucleares”, en el Máster de Bioestadística de la Universidad de Valencia, desarrollada por **Maryory Patricia Villamizar Leon** y dirigida por el **Dr. Sebastián Martorell** y la **Dra. Carmen Armero**; presentada en la Universidad de Valencia en el 30 de septiembre del 2013.