



XXV CONGRESO INTERNACIONAL DE  
MANTENIMIENTO Y GESTIÓN DE ACTIVOS  
26 AL 28 DE ABRIL DE 2023. Bogotá - Colombia



Asociación  
Colombiana  
de Ingenieros

# La confiabilidad como soporte para gestionar mantenimiento

*Jorge Marcos Acevedo - Dr. Ing. Industrial  
Dpto. De Tecnología Electrónica  
Universidad de Vigo*

**Comité de Fiabilidad de la AEM (Asociación  
Española de Mantenimiento)**





# ÍNDICE

- Introducción
- Fiabilidad
- Mantenibilidad
- Mantenimiento
- Disponibilidad
- Seguridad



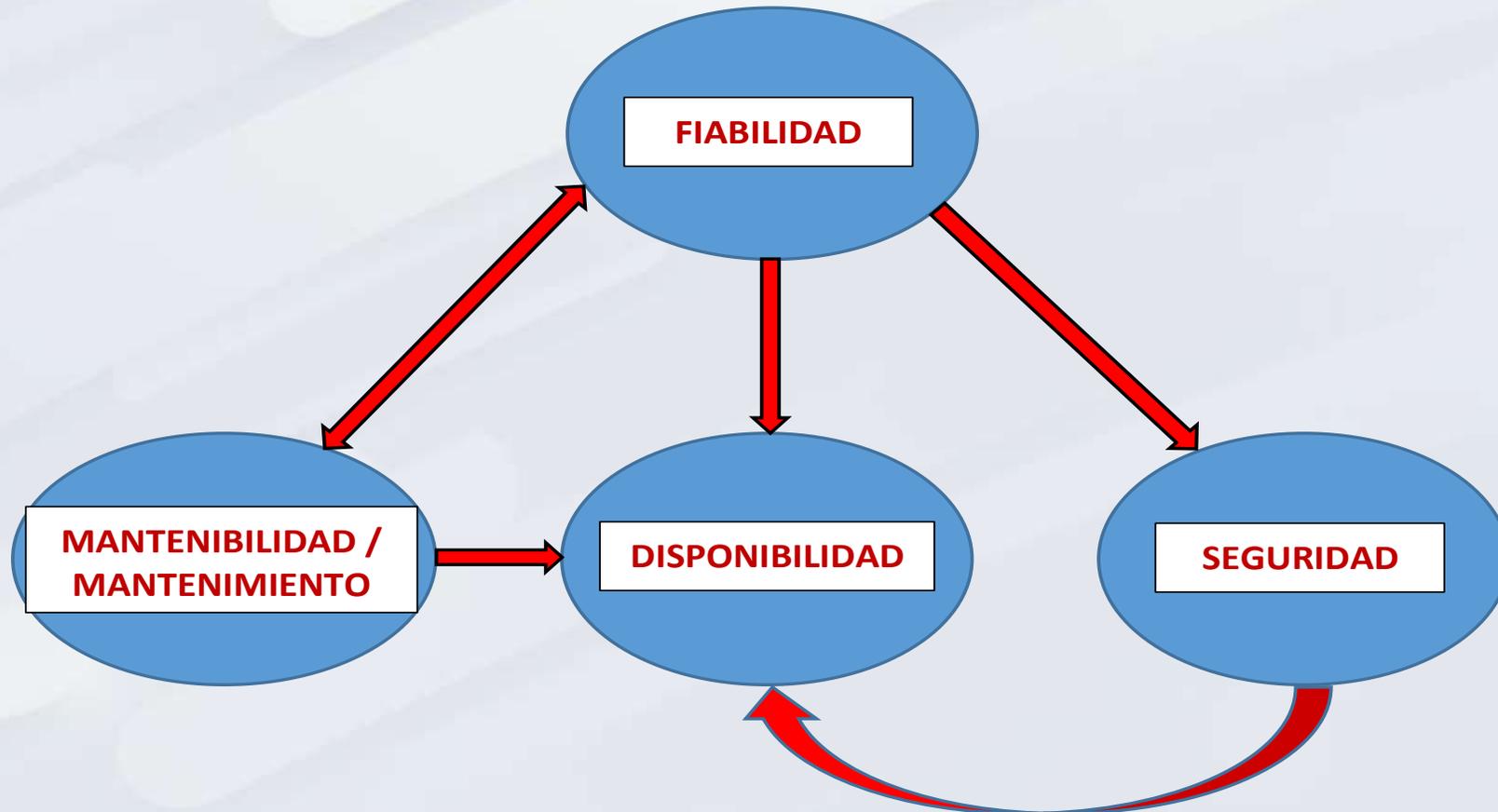
# INTRODUCCIÓN

## Tecnologías RAMS

- Confiabilidad - Fiabilidad (**R**eliability)
- Disponibilidad (**A**vailability)
- Mantenibilidad (**M**aintainability)
- Seguridad (**S**afety)

**Concepto probabilístico => Previsión de futuro**

# TECNOLOGÍAS RAMS



# CICLO DE VIDA DEL PRODUCTO

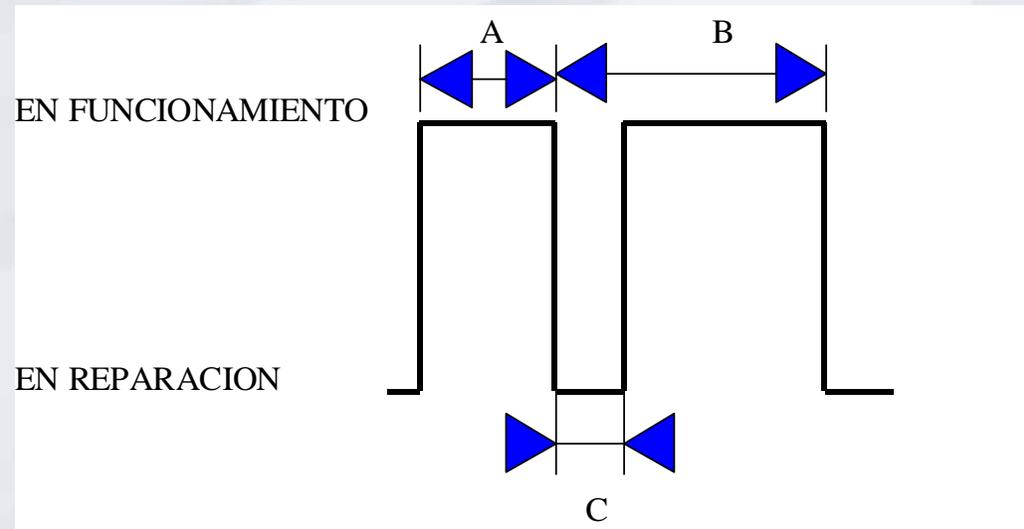




# PARÁMETROS BÁSICOS DE RAMS

- Tasa de fallos “ $\lambda(t)$ ”
- Vida media “ $\theta$ ”
- Tiempo medio entre fallos (Mean Time Between Failures) “**MTBF**”
- Tiempo medio hasta el fallo (Mean Time To Failure) “**MTTF**”
- Tiempo medio de reparación (Mean Time To Repair) “**MTTR**”

# MTTF, MTBF y MTTR



- MTTF: Media de los tiempos “A” (Para componentes/sistemas no reparables)
- MTBF: Media de los tiempos “B”
- MTTR: Media de los tiempos “C”

$$MTBF = MTTF + MTTR$$

$$MTTF \gg MTTR \Rightarrow MTBF \cong MTTF$$



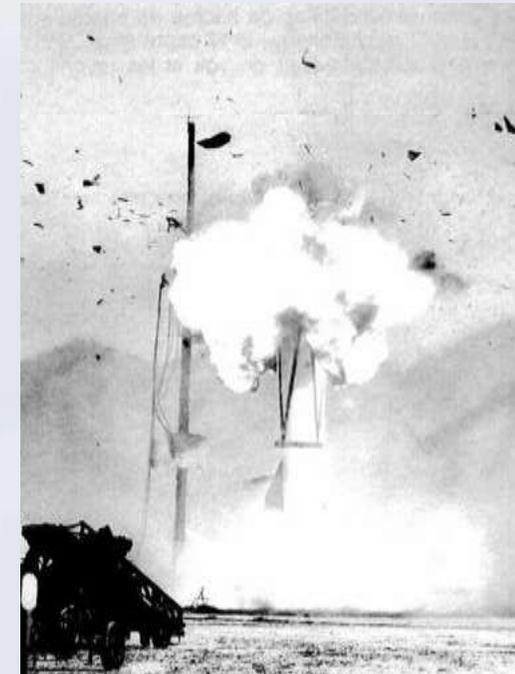
# FIABILIDAD

- Según IEC es la probabilidad de que un componente o sistema realice su función, en condiciones especificadas y durante un tiempo determinado (Tiempo de misión).
- Representa la calidad en el tiempo.

## Origen de la Fiabilidad

- Sistemas cada vez más complejos
- Primeros estudios en aviónica

# EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LA FIABILIDAD



Wernher von Braun, Robert Lusser y Eric Pieruschka  
lograron una fiabilidad de 0,75 con las V2

## TASA DE FALLOS $\lambda(t)$

$$\lambda(t)dt = -\frac{dR(t)}{R(t)} \Rightarrow R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t)dt}$$

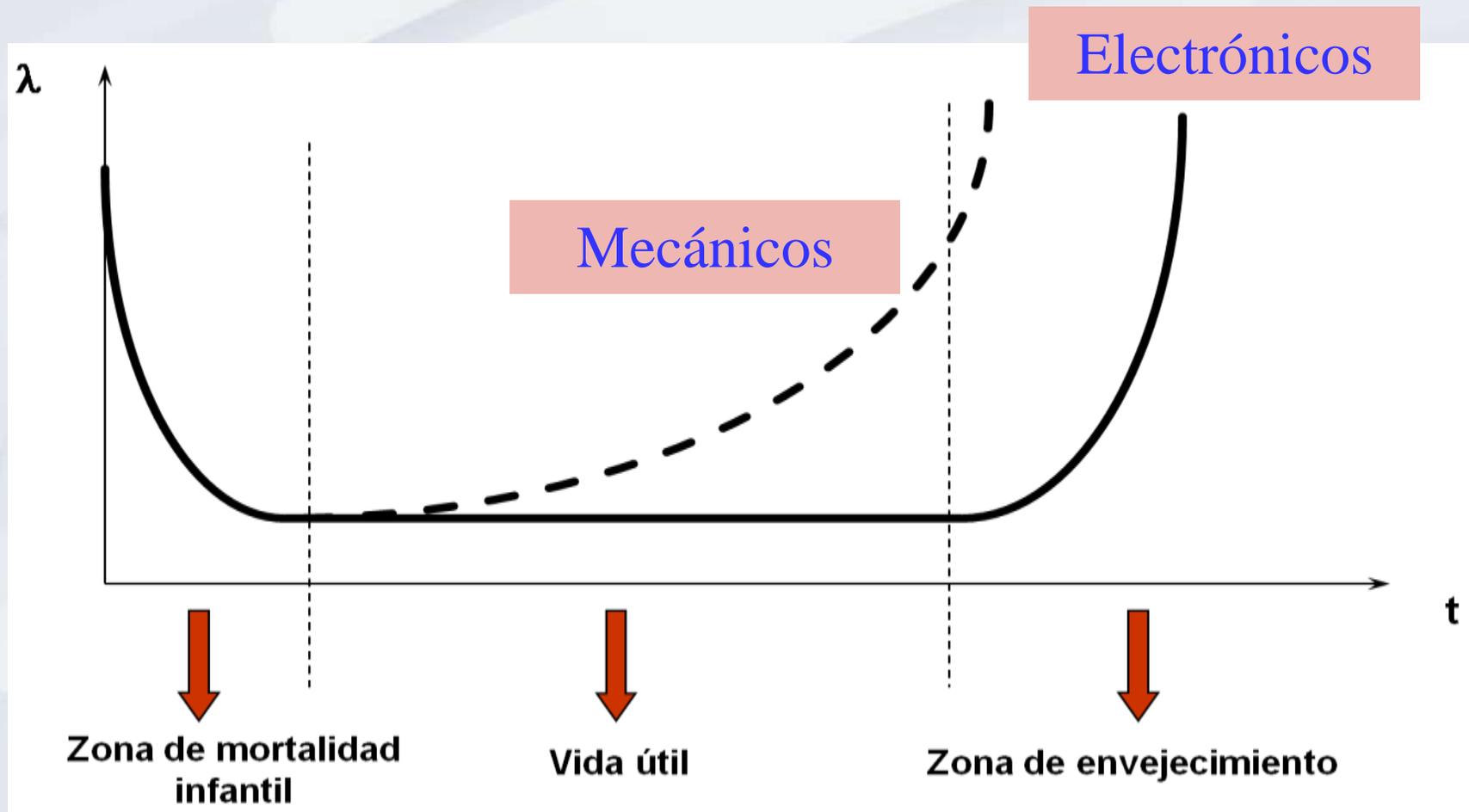
$$\frac{\text{Fallos}}{\text{Componente} \cdot \text{Hora}} = \frac{F}{C \cdot h} = h^{-1}$$

$$\frac{\text{Fallos}}{\text{Componente} \cdot 10^6 \text{ Horas}}$$

**FIT (Failure In Time)** [Fallos por mil millones de horas]

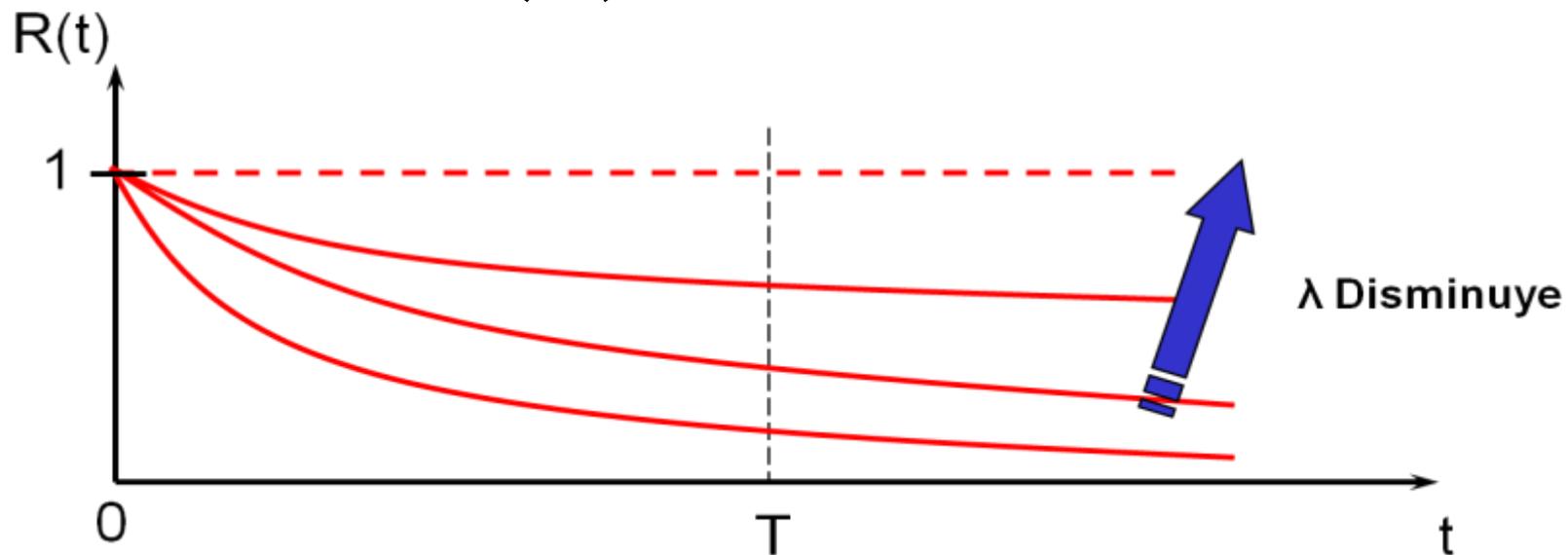
$$\lambda = a \cdot 10^{-9} \frac{F}{C \cdot h} = a \frac{F}{C \cdot 10^9 h} = a \text{ [FITs]}$$

# CURVA DE LA BAÑERA



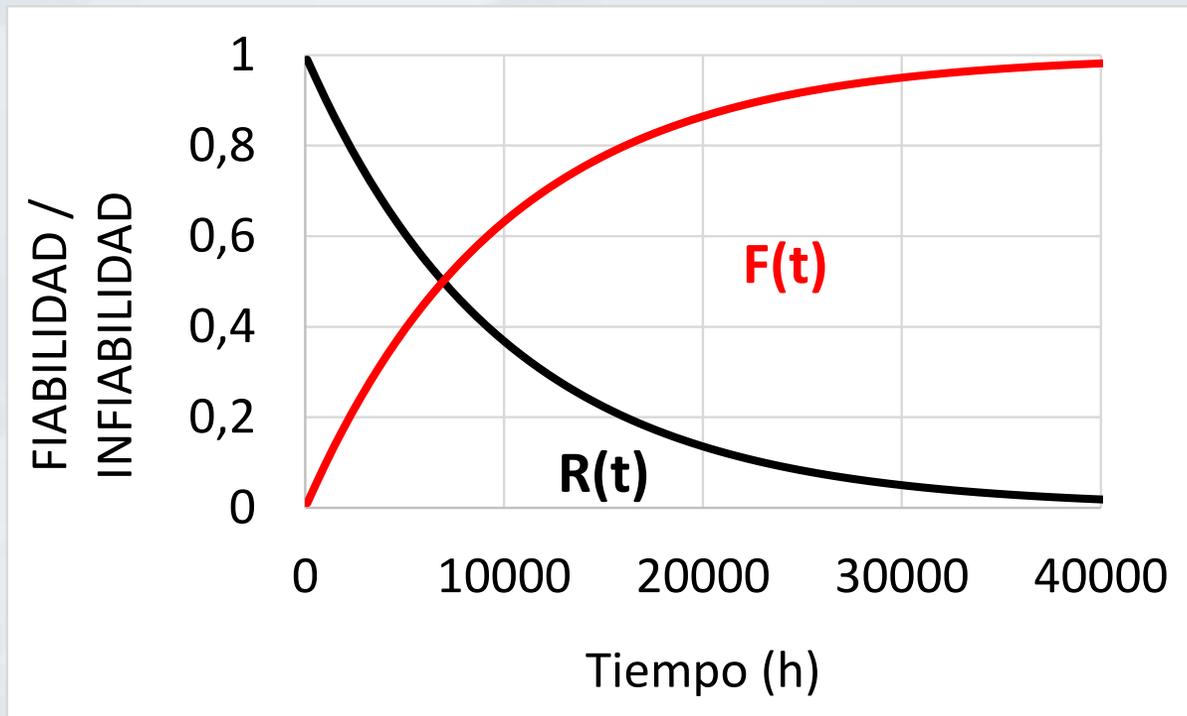
## FIABILIDAD CON $\lambda$ CONSTANTE

$$R(t) = e^{-\lambda t}$$



# INFIABILIDAD

$$F(t) = Q(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-\lambda t}$$

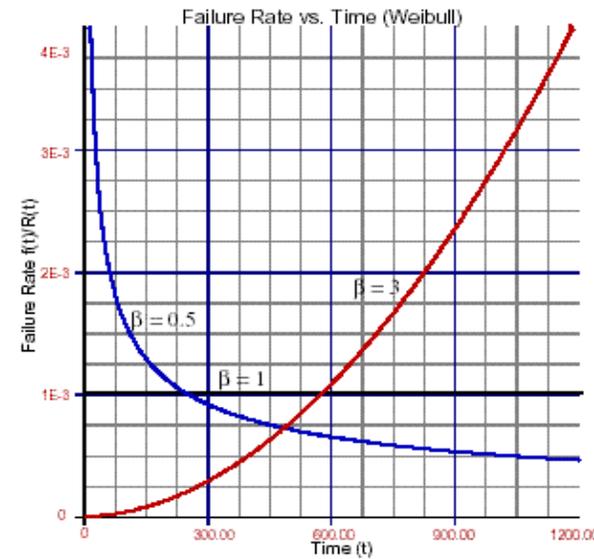
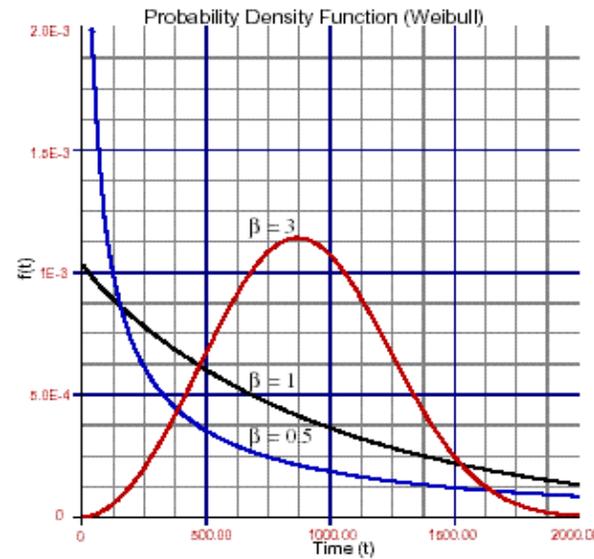
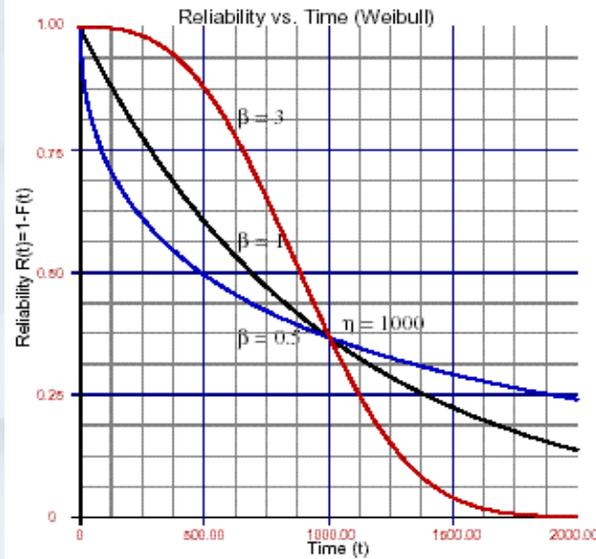


# DISTRIBUCIÓN DE WEIBULL

## Weibull Distribution

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left( \frac{t-\gamma}{\eta} \right)^\beta}$$

$\beta$  = shape parameter  
 $\eta$  = characteristic life (scale parameter)  
 $\gamma$  = minimum life (location parameter)  
 $f(t) \geq 0, t \geq 0$  or  $\gamma, \beta > 0, \eta > 0, -\infty < \gamma <$



$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \left( 1 - e^{-\left( \frac{t-\gamma}{\eta} \right)^\beta} \right) = e^{-\left( \frac{t-\gamma}{\eta} \right)^\beta} \quad \lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left( \frac{t-\gamma}{\eta} \right)^\beta} \quad \lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$$

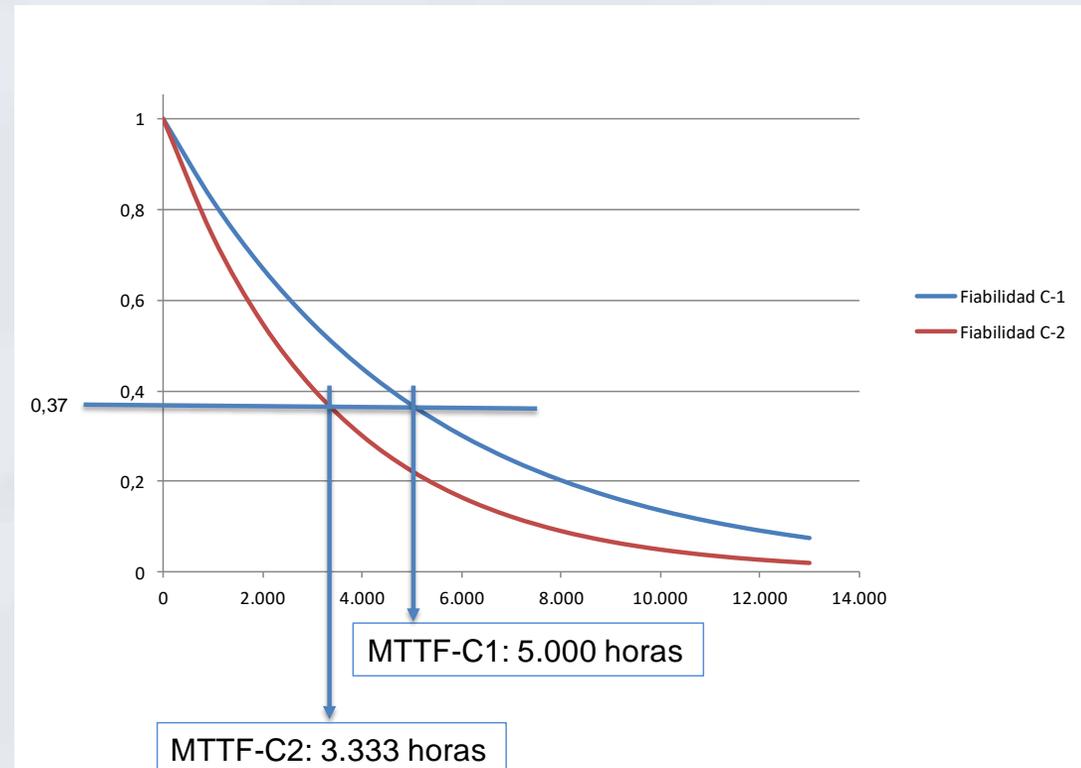
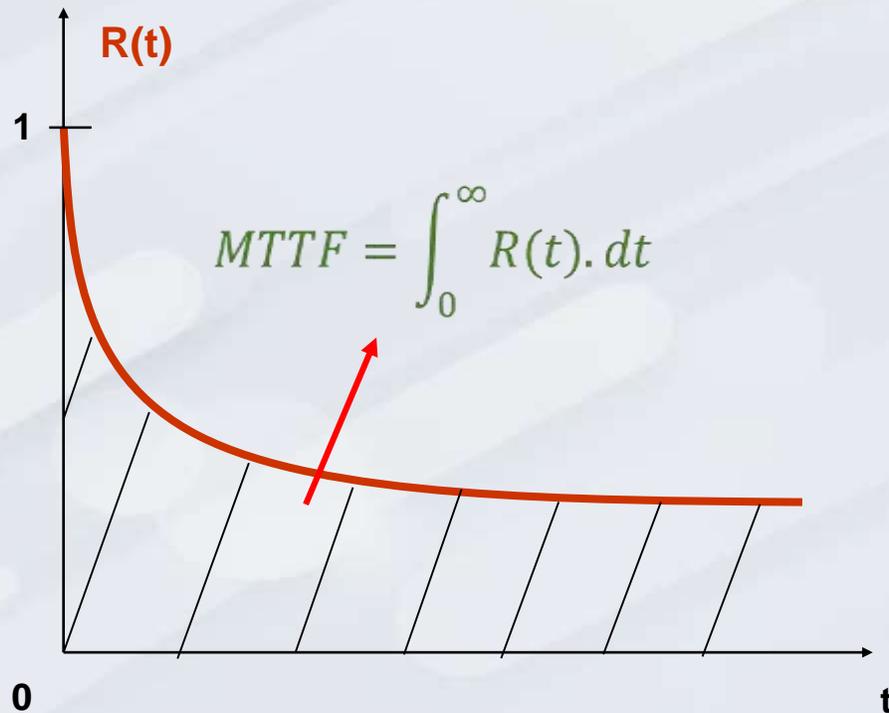
## RELACIÓN: $R(t)$ , $F(t)$ , $\lambda(t)$ , $f(t)$

	$R(t)$	$F(t)$	$\lambda(t)$	$f(t)$
$R(t)$	$R(t)$	$1 - F(t)$	$e^{-\int_0^T \lambda(t) dt}$	$1 - \int_0^T f(t) dt$
$F(t)$	$1 - R(t)$	$F(t)$	$1 - e^{-\int_0^T \lambda(t) dt}$	$\int_0^T f(t) dt$
$\lambda(t)$	$\frac{d}{dt} [LnR(t)]$	$\frac{1}{1 - F(t)} \frac{dF(t)}{dt}$	$\lambda(t)$	$\frac{f(t)}{1 - \int_0^T f(t) dt}$
$f(t)$	$-\frac{dR(t)}{dt}$	$\frac{dF(t)}{dt}$	$\lambda(t) e^{-\int_0^T \lambda(t) dt}$	$f(t)$

## VIDA MEDIA “ $\theta$ ”

$$\theta = \int_0^{\infty} R(t)dt = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} = MTTF$$

Para  $t = MTTF \Rightarrow R(MTTF) = e^{-1} = 0,37 \Rightarrow 37\% \Rightarrow F(MTTF) = 63\%$



# PREDICCIÓN DE FIABILIDAD DE COMPONENTES

## Electrónicos

- MIL HDBK-217F
- RIAC HDBK – 217Plus
- IEC 62380
- IEC 61709
- FIDES

## Mecánicos

- NPRD/EPRD
- KNSWC-98

## Bases de datos

- Offshore and Onshore Reliability Data (OREDA)

# $\lambda$ DE RESISTENCIAS SEGÚN MIL HDBK-217F

## Resistencia fija de película metálica

$$\lambda_P = \lambda_b * \pi_R * \pi_Q * \pi_E \left[ \frac{Fallos}{10^6 \text{ Horas}} \right]$$

$$\lambda_b = 3,25 * 10^{-4} * e^{\left[ \frac{T+273}{343} \right]^3} * e^{\left[ \frac{S(T+273)}{273} \right]}$$

$\pi_R$  (Factor de resistencia): Varía entre 1 y 5 según el tipo de resistencia

$\pi_Q$  (Factor de calidad): Varía entre 0,003 y 15 según la calidad del componente

$\pi_E$  (Factor ambiental): Varía entre 1 y 490 según el ambiente de trabajo del componente (Terrestre, naval, aeroespacial, etc.)

## $\lambda$ DE RESISTENCIAS SEGÚN IEC 62380

$$\lambda = 0,1 \cdot \left( \left[ \frac{\sum_{i=1}^y (\pi_t)_i \cdot \tau_i}{\tau_{on} + \tau_{off}} \right] + 1,4 \cdot 10^{-3} \cdot \left[ \sum_{i=1}^j (\pi_n)_i \cdot (\Delta T_i)^{0,68} \right] \right) \cdot 10^{-9} \text{ [/h}^{-1}\text{]}$$

Modos de fallo de una resistencia (IEC 62380)	%
Cortocircuito	40
Circuito abierto	60

# SOFTWARE ESPECÍFICO (COMP. ELECTRÓNICOS)

Reliability Workbench - [Project : C:\Program Files (x86)\RAMS\WrkBench\7.0\Examples\mildemo.wkb - Library : Not Specified]

File Add Edit View Tools Results Window Help

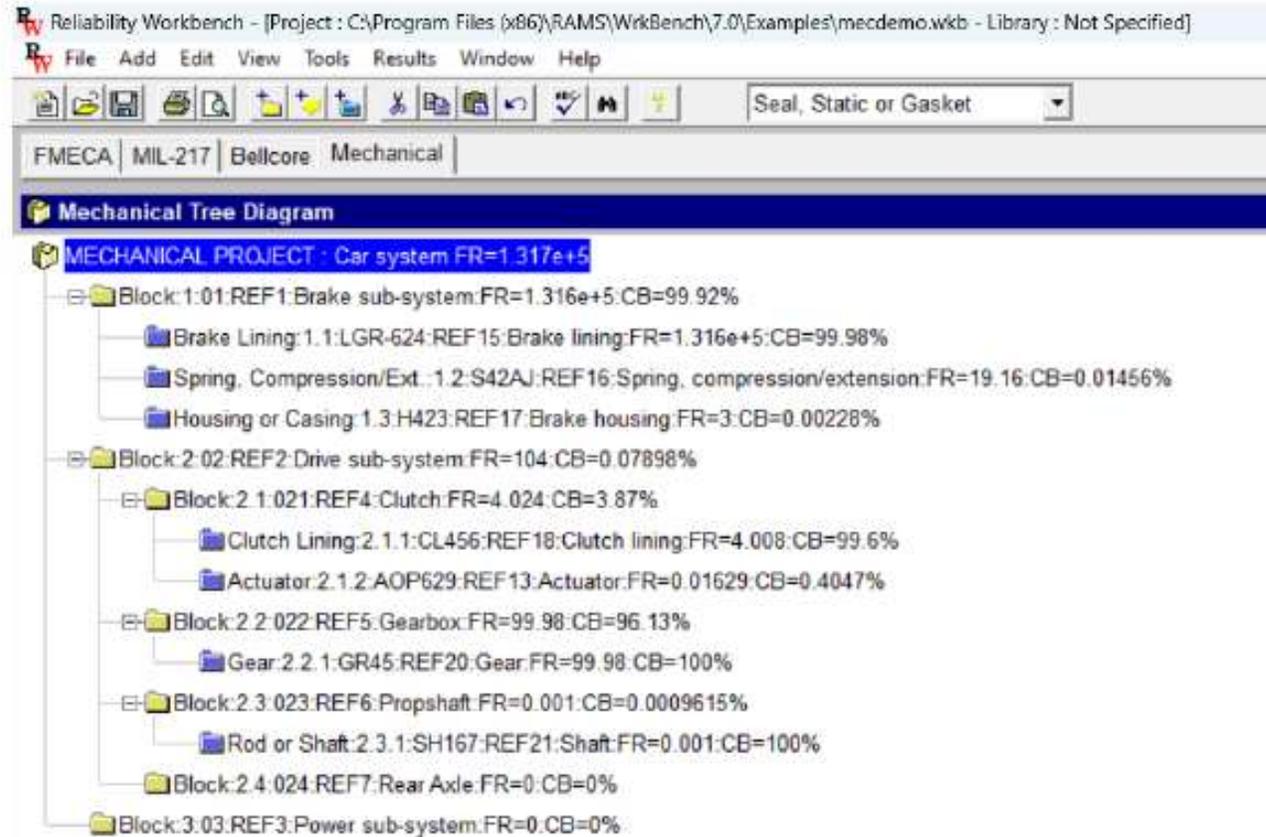
FMECA MIL-217 Bellcore Mechanical

MIL-217 Tree Diagram

MIL-217 PROJECT : ABC Computer System Model ABC/XT - 8086-based Microcomputer. FR=10

- Block: 10: Power Supply 110/240 V AC Supply, 5V/12V DC Output. FR=0.7903(CR=0.004416). CB=7.9%
  - Capacitor: C1: CAPACITOR, FIXED, CK, 33PF. FR=0.007599. CB=0.967%
  - Capacitor: C6-10: CAPACITOR, FIXED, POLYESTER, 10nF. FR=0.04056. CB=5.161%
  - Capacitor: C3-C5: CAPACITOR, FIXED, CERAMIC CHIP, 220 pF. FR=0.01821. CB=2.317%
  - Transformer: T1: TRANSFORMER. FR=0.01048. CB=1.334%
  - Capacitor: C2: CAPACITOR, FIXED, AL. ELECT., 4700 uF. FR=0.02934. CB=3.733%
  - Capacitor: C13-16: CAPACITOR, FIXED, SOLID TANT., 4.7 uF. FR=0.5265. CB=67%
  - Diode, Low Frequency: D1-D4: DIODE, GLASS PACKAGE. FR=0.03487. CB=4.437%
  - Resistor: R1: RESISTOR, FIXED, FILM, 620 OHM. FR=0.007326. CB=0.9322%
  - Resistor: R2-R7: RESISTOR, FIXED, MET. OXIDE, 1K2. FR=0.04515. CB=5.746%
  - Capacitor: C13: CAPACITOR, FIXED, AL. ELECT., 4700 uF. FR=0.02522. CB=3.209%
  - Capacitor: C8-12: CAPACITOR, FIXED, POLYESTER, 10nF. FR=0.04056. CB=5.161%
- Block: 11: CPU Board 8086 Processor + on-board logic. FR=2.206(CR=0.01325). CB=22.06%
- Block: 12: Display; Memory Unit Display processor + RAM/ROM Board. FR=7.006(CR=1). CB=70.04%
  - Block: 121: Memory Board 256K RAM + 16K ROM. FR=5.155(CR=0.06162). CB=73.56%
  - Block: 122: Display Processor Mk2 Monochrome Display board. FR=1.851(CR=0.04223). CB=26.42%

# SOFTWARE ESPECÍFICO (COMP. MECÁNICOS)



Reliability Workbench - [Project : C:\Program Files (x86)\RAMS\Wrbench\7.0\Examples\mecdemo.wkb - Library : Not Specified]

File Add Edit View Tools Results Window Help

Seal, Static or Gasket

FMECA | MIL-217 | Bellcore | Mechanical

### Mechanical Tree Diagram

MECHANICAL PROJECT : Car system FR=1.317e+5

- Block: 1:01:REF1:Brake sub-system:FR=1.316e+5:CB=99.92%
  - Brake Lining:1.1:LGR-624:REF15:Brake lining:FR=1.316e+5:CB=99.98%
  - Spring, Compression/Ext.:1.2:S42AJ:REF16:Spring, compression/extension:FR=19.16:CB=0.01456%
  - Housing or Casing:1.3:H423:REF17:Brake housing:FR=3:CB=0.00228%
- Block: 2:02:REF2:Drive sub-system:FR=104:CB=0.07898%
  - Block: 2:1:021:REF4:Clutch:FR=4.024:CB=3.87%
    - Clutch Lining:2.1.1:CL456:REF18:Clutch lining:FR=4.008:CB=99.6%
    - Actuator:2.1.2:AOP629:REF13:Actuator:FR=0.01629:CB=0.4047%
  - Block: 2:2:022:REF5:Gearbox:FR=99.98:CB=96.13%
    - Gear:2.2.1:GR45:REF20:Gear:FR=99.98:CB=100%
  - Block: 2:3:023:REF6:Propshaft:FR=0.001:CB=0.0009615%
    - Rod or Shaft:2.3.1:SH167:REF21:Shaft:FR=0.001:CB=100%
  - Block: 2:4:024:REF7:Rear Axle:FR=0:CB=0%
- Block: 3:03:REF3:Power sub-system:FR=0:CB=0%

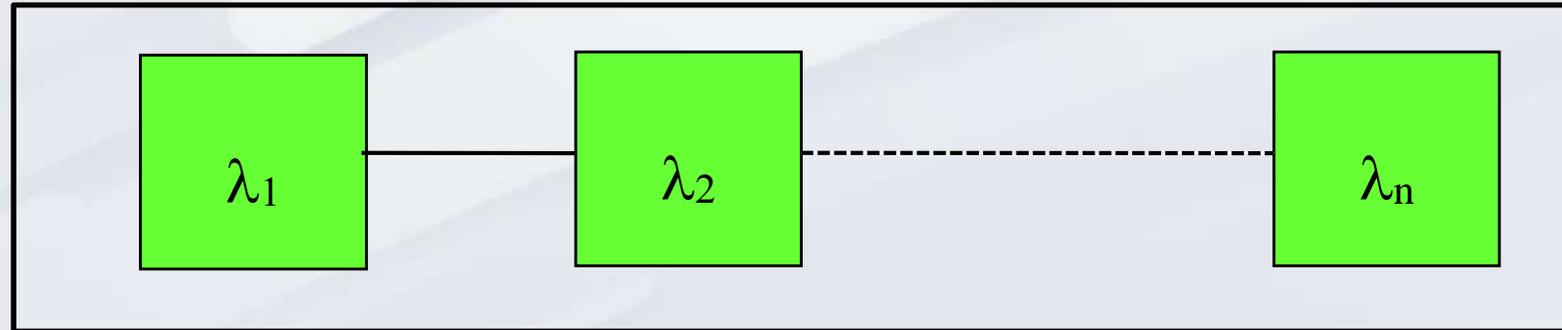
# SOFTWARE ESPECÍFICO (ALD)

The screenshot shows the MTBF Calculator software interface. At the top, it says "Perform reliability prediction and MTBF/FR calculation for electronic and mechanical components in 5 simple steps:". The interface is divided into five main sections:

- 1. Select Component Family and Type:** Includes a "Family" dropdown menu with "ELECTRONIC" and "MECHANICAL" options, and an "Item Code" list with categories like IC-Memory, IC-Analog, IC-Digital, Bubble Memory, Resistor, Potentiometer, Capacitor, Switch, Relay, Connector, LF Diode, LF Transistor, HF Diode, HF Transistor, Optoelectronic, Laser-Gas, and Laser-Solid.
- 2. Select Reliability Prediction Method:** A list of methods including MIL-217E-1 Part stress, MIL-217F-1 Part count, MIL-217F-1 Part stress, MIL-217F-2 Part count, MIL-217F-2 Part stress, ANSI/VITA 51.1, ANSI/VITA 51.1 - 2018, and ALCATEL.
- 3. Select Environment and Temperature:** Includes an "Environment" dropdown menu with "GB\_Ground\_Benign" selected, and a "Temperature" input field set to "25.0" degrees Centigrade.
- 4. Enter Component Parameters:** A large "Calculate" button.
- 5. Get MTBF and FR:** Displays results for "MTBF: 0.00 hours", "Failure Rate: 0.0000 failures per million hours", and "Failure Rate: 0.0000 FIT".

At the bottom, there is a "Close" button and an "Upgrade" button. A footer section contains the HUB Security logo, a description of the software as a free tool for simple reliability prediction, and contact information: "Copyright HUB Security Ltd. support@hubsecurity.com www.hubsecurity.com".

## SISTEMAS SERIE

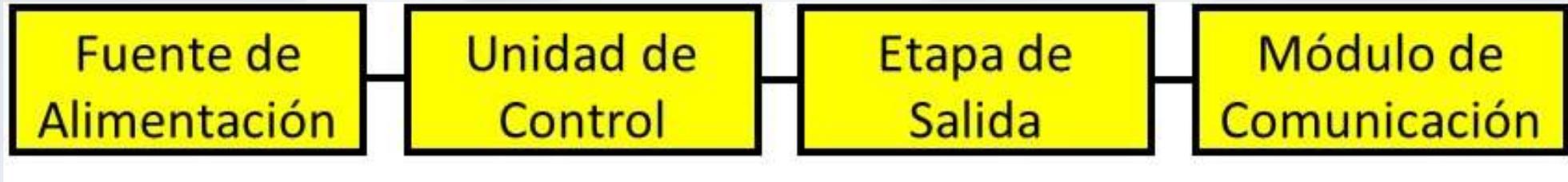


$$R_S(t) = R_1(t) \cdot R_2(t) \cdot \dots \cdot R_n(t) = e^{-\lambda_1 t} \cdot e^{-\lambda_2 t} \cdot \dots \cdot e^{-\lambda_n t} = e^{-\lambda_S t}$$

$$\lambda_S = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n$$

$$\theta_S = \frac{1}{\lambda_S} = \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n} = \frac{1}{\frac{1}{\theta_1} + \frac{1}{\theta_2} + \dots + \frac{1}{\theta_n}}$$

## EJEMPLO



$$R_{FA} = 0,8$$

$$R_{UC} = 0,9$$

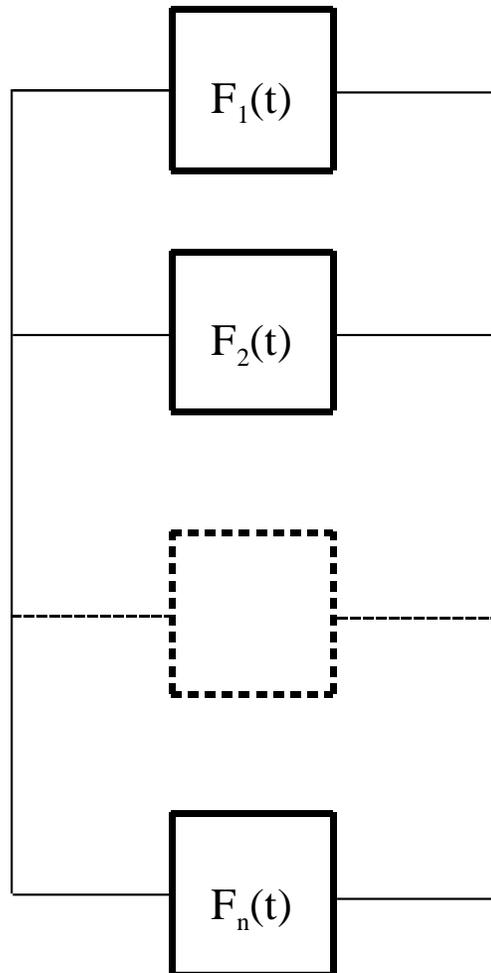
$$R_{ES} = 0,7$$

$$R_{MC} = 0,6$$

$$R_S = R_{FA} \cdot R_{UC} \cdot R_{ES} \cdot R_{MC} = 0,3 \text{ (30\%)}$$

- La fiabilidad del sistema es el producto de las fiabilidades de los componentes “Ley del producto”
- La cadena se rompe por el eslabón más débil

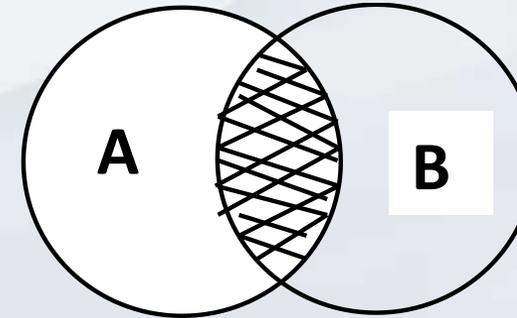
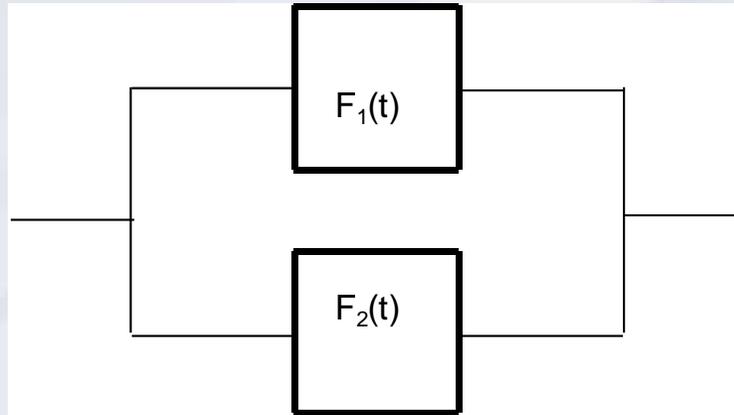
# SISTEMAS PARALELO - REDUNDANCIA ACTIVA



$$\begin{aligned} F_S(t) &= F_1(t) \cdot F_2(t) \cdot \dots \cdot F_n(t) = \\ &= [1 - R_1(t)] \cdot [1 - R_2(t)] \cdot \dots \cdot [1 - R_n(t)] = \\ &= \prod_{i=1}^n [1 - R_i(t)] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_S(t) &= 1 - F_S(t) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - R_i(t)] = \\ &= 1 - \prod_{i=1}^n [1 - e^{-\lambda_i t}] \end{aligned}$$

# DOS BLOQUES EN PARALELO – REDUND. ACTIVA (I)



$$R_S = 1 - F_S = 1 - F_1 F_2 = 1 - (1 - R_1)(1 - R_2)$$

$$R_S = R_1 + R_2 - R_1 R_2$$

Si los dos componentes son iguales:  $R_S = 2R - R^2$

Si  $R=0,9 \Rightarrow R_S = 0,99 \Rightarrow R_S$  aumentó un 10%  
respecto a un único bloque

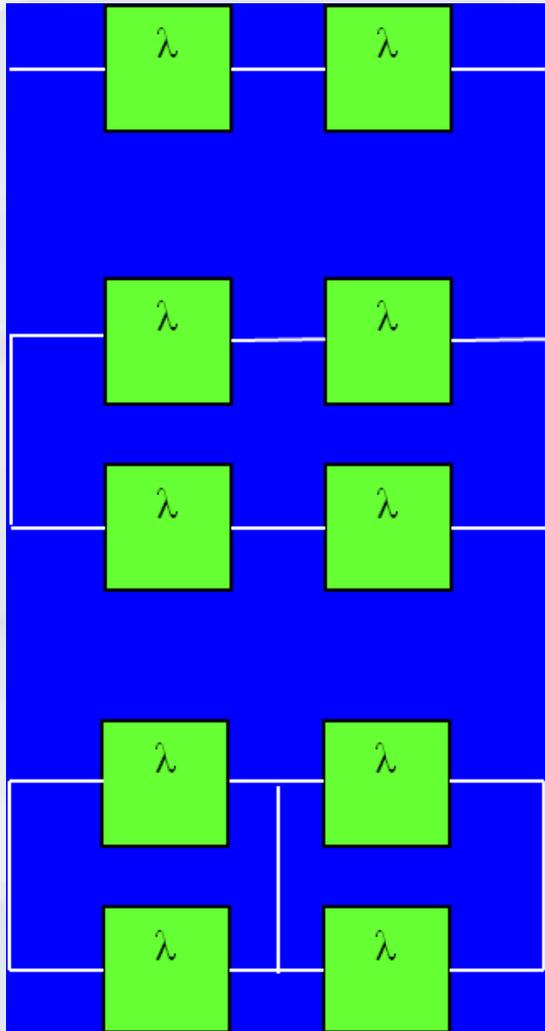
## DOS BLOQUES EN PARALELO – REDUND. ACTIVA (II)

$$\theta_s = \int_0^{\infty} R(t)dt = \int_0^{\infty} (2R - R^2)dt$$

$$\theta_s = \int_0^{\infty} (2e^{-\lambda t} - e^{-2\lambda t})dt = \frac{2}{\lambda} - \frac{1}{2\lambda} = \frac{1,5}{\lambda}$$

Para el caso de dos bloques iguales la vida media del sistema aumenta un 50% respecto a un único bloque.

# COMPARACIÓN DE REDUNDANCIAS (I)

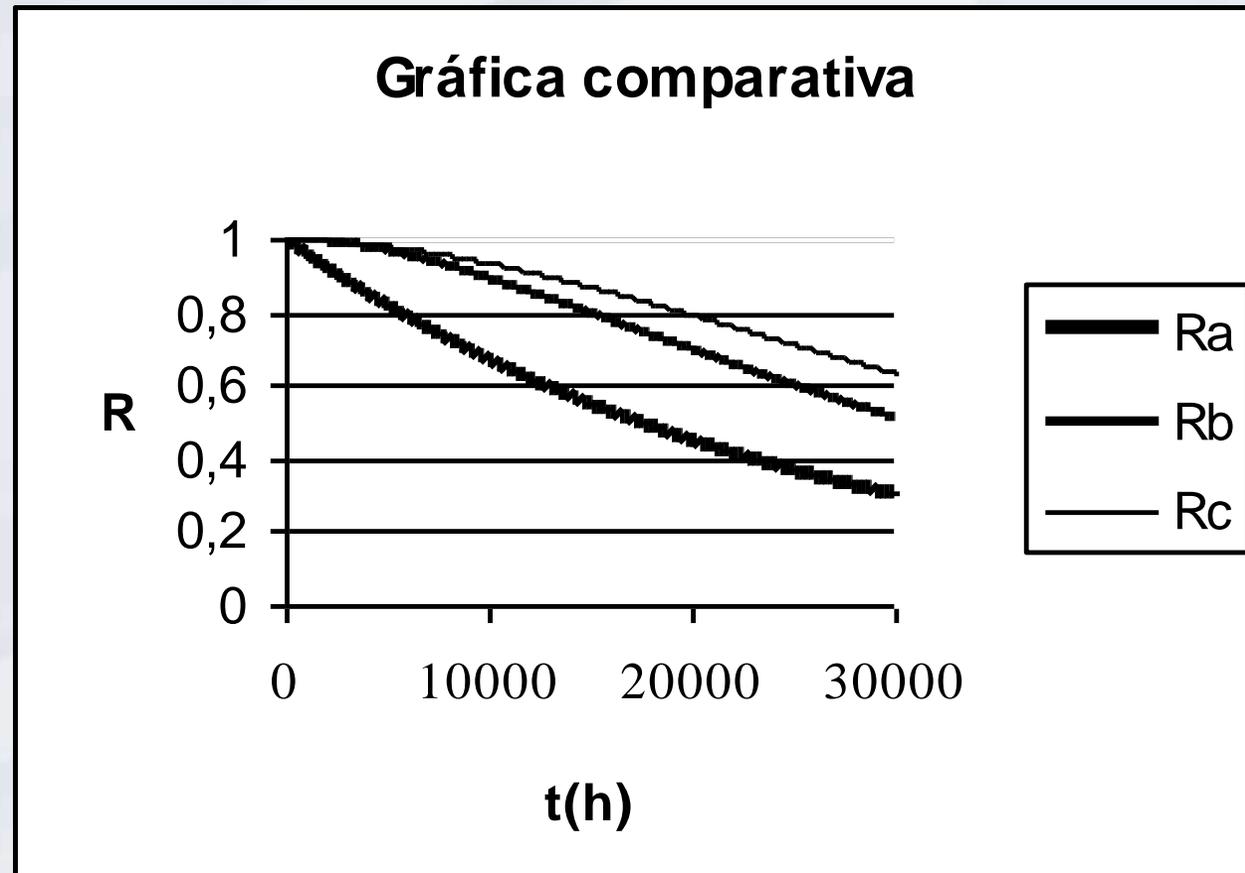


$$R_a(t) = R^2(t) = e^{-2\lambda t}$$

$$R_b(t) = 2R^2(t) - R^4(t) = 2e^{-2\lambda t} - e^{-4\lambda t}$$

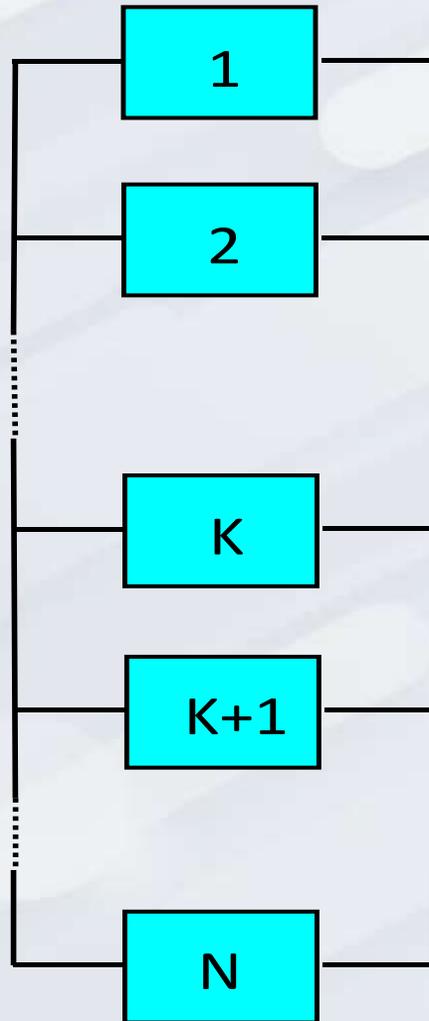
$$R_c(t) = R^4(t) - 4R^3(t) + 4R^2(t) = e^{-4\lambda t} - 4e^{-3\lambda t} + 4e^{-2\lambda t}$$

# COMPARACIÓN DE REDUNDANCIAS (II)



$R_{\text{máx}}$  => Redundancia al menor nivel posible

# REDUNDANCIA ACTIVA – SISTEMAS KooN (K out of N)



N bloques en paralelo de los que deben funcionar por lo menos K, para que se cumpla la misión.

$$R_S(t) = P(X \geq K) = \sum_{X=K}^N \binom{N}{X} R^X (1-R)^{N-X} =$$

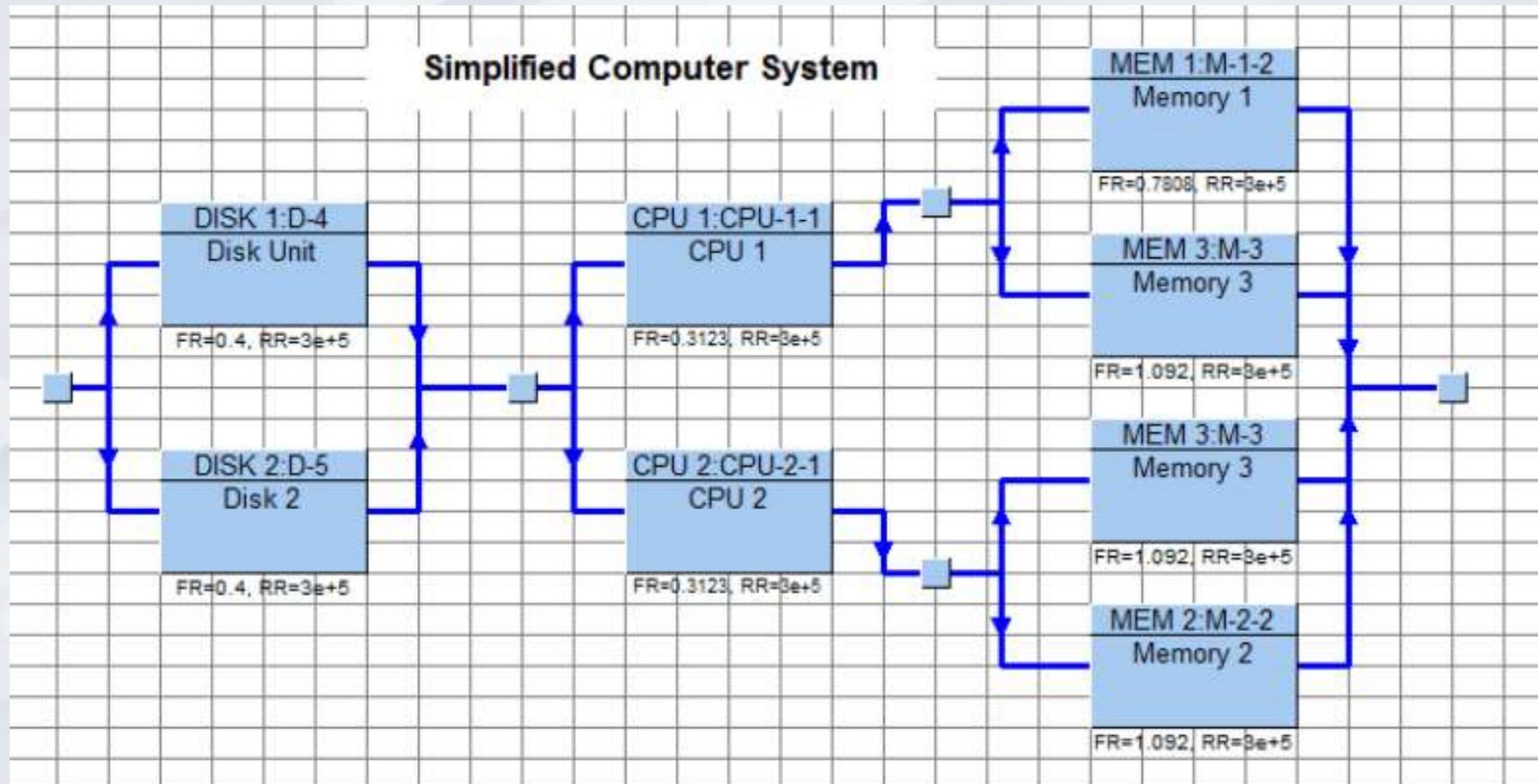
$$= \sum_{X=K}^N \binom{N}{X} (1-F)^X F^{N-X} = 1 - \sum_{X=0}^{K-1} \binom{N}{X} R^X (1-R)^{N-X}$$

$$K > N/2$$

$$\binom{N}{X} = \frac{N!}{X! (N-X)!}$$

$$K \leq N/2$$

# DIAGRAMA DE BLOQUES DE FIABILIDAD (RBD)



# REDUNDANCIA vs CALIDAD DE COMPONENTES (I)

Dos bloques iguales en redundancia activa con tasa de fallos ( $\lambda$ ):

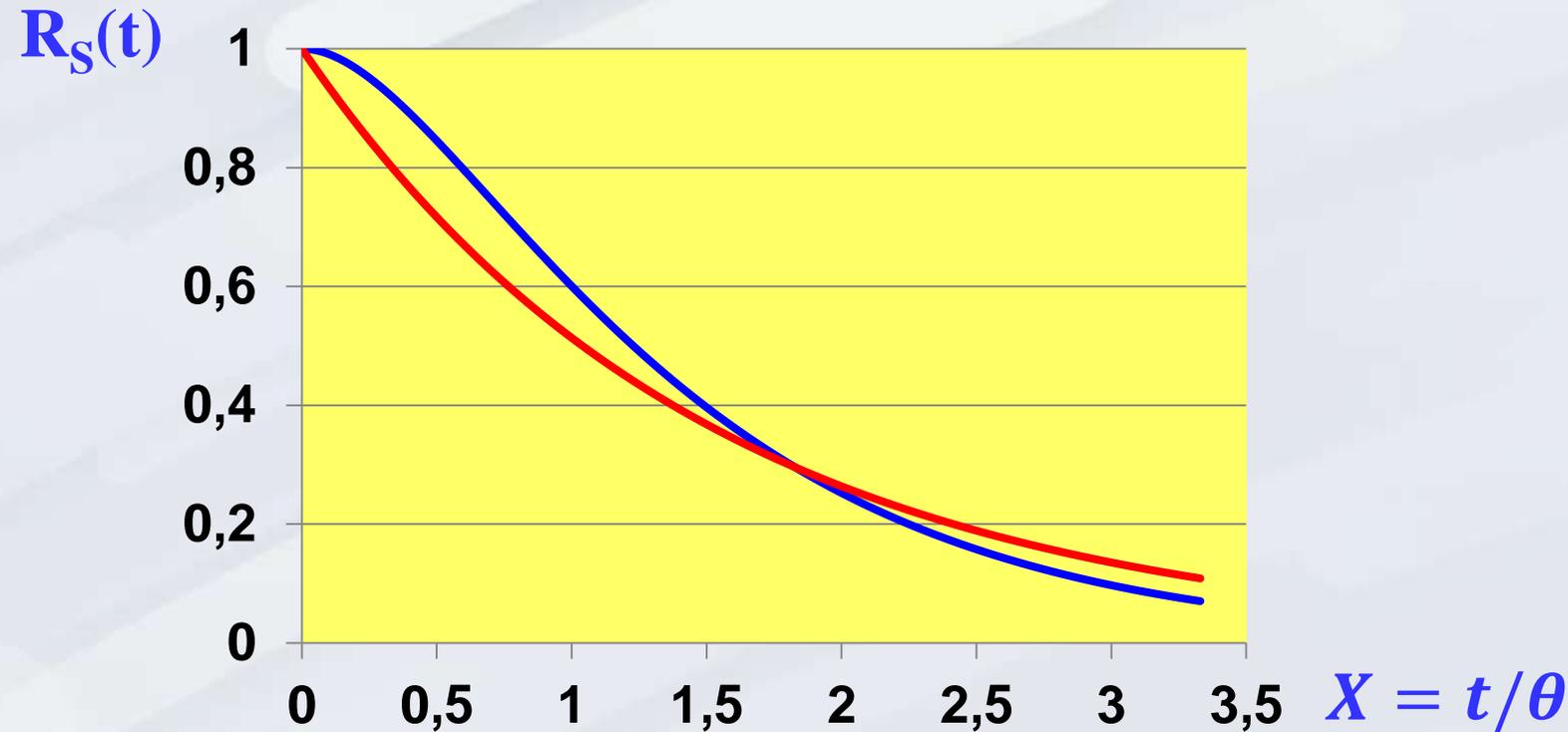
$$R_S(t) = 2e^{-\lambda t} - e^{-2\lambda t} = 2e^{-\frac{t}{\theta}} - e^{-2\frac{t}{\theta}} = 2e^{-X} - e^{-2X}$$

$$\theta_S = \frac{1}{\lambda_S} = 1,5 \cdot \theta = \frac{3}{2} \frac{1}{\lambda}$$

Para conseguir la misma vida ( $\Theta_S$ ) con un único bloque  $\Rightarrow$  la tasa fallos ( $\lambda_S$ ) debe ser  $2\lambda/3$ :

$$R_S(t) = e^{-\lambda_S t} = e^{-\frac{2}{3}\lambda t} = e^{-\frac{2t}{3\theta}} = e^{-\frac{2}{3}X}$$

## REDUNDANCIA / CALIDAD DE COMPONENTES (II)



- Dos sistemas iguales con tasa de fallos ( $\lambda$ )
- Un único sistema con tasa de fallos ( $\lambda_S$ )

# **SOFTWARE PARA RAMS**

Fabricantes de software

- <http://www.itemsoft.com/>
- <http://www.reliasoft.es/>
- <http://www.relex.se/>
- <https://relyence.com/products/reliability-prediction/>
- <https://aldservice.com/Reliability-Software/free-mtbf-calculator.html>
- <https://www.isograph.com/software/reliability-workbench/>

# ORGANIZACIONES RELACIONADAS CON RAMS

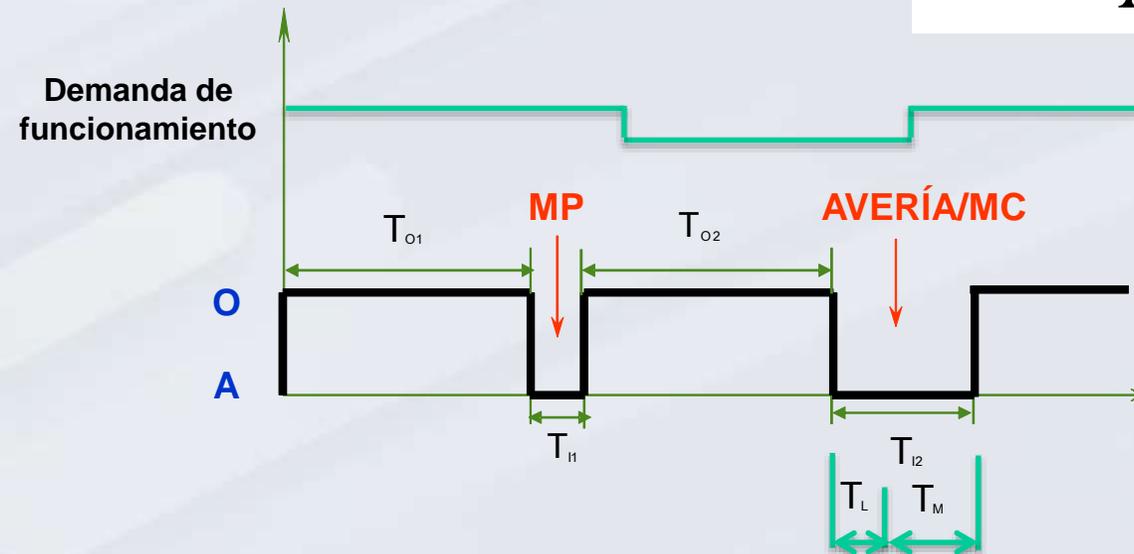
- **IntegraPDM:** <https://www.integrpdm.com/es/formacion-en-mantenimiento-predictivo/>
- **AEM (Asociación Española de Mantenimiento):** <https://aem.es/>
- **INGEMAN (Ingeniería de Mantenimiento):** <https://ingeman.es/>
- **IEEE Reliability Society:** <https://rs.ieee.org/>
- **ESRA (European Safety and Reliability Association):**  
<https://esrahomepage.eu/>
- **SMRP (Society for Maintenance & Reliability Professionals):**  
<https://smrp.org/>
- **SRE (Society of Reliability Engineers):** <https://sre-az.org/about.htm>
- **RIAC (Reliability Information Analysis Center):**  
<https://www.quanterion.com/projects/reliability-information-analysis-center-riac/>

# MANTENIBILIDAD

Probabilidad de que el componente/sistema sea reparado en un tiempo “t”

$$M(t) = 1 - e^{-\mu t}$$

$$\mu = \frac{1}{MTTR}$$



# TIEMPOS RELACIONADOS CON EL MANTENIMIENTO

- Tiempo medio de reparación (Mean Time To Repair) [MTTR]
- Tiempo medio de mantenimiento (Maintenance Down Time) [MDT]
- Tiempo de retardo (Delay Time) [DT]
- Tasa de reparación [ $\mu$ ]

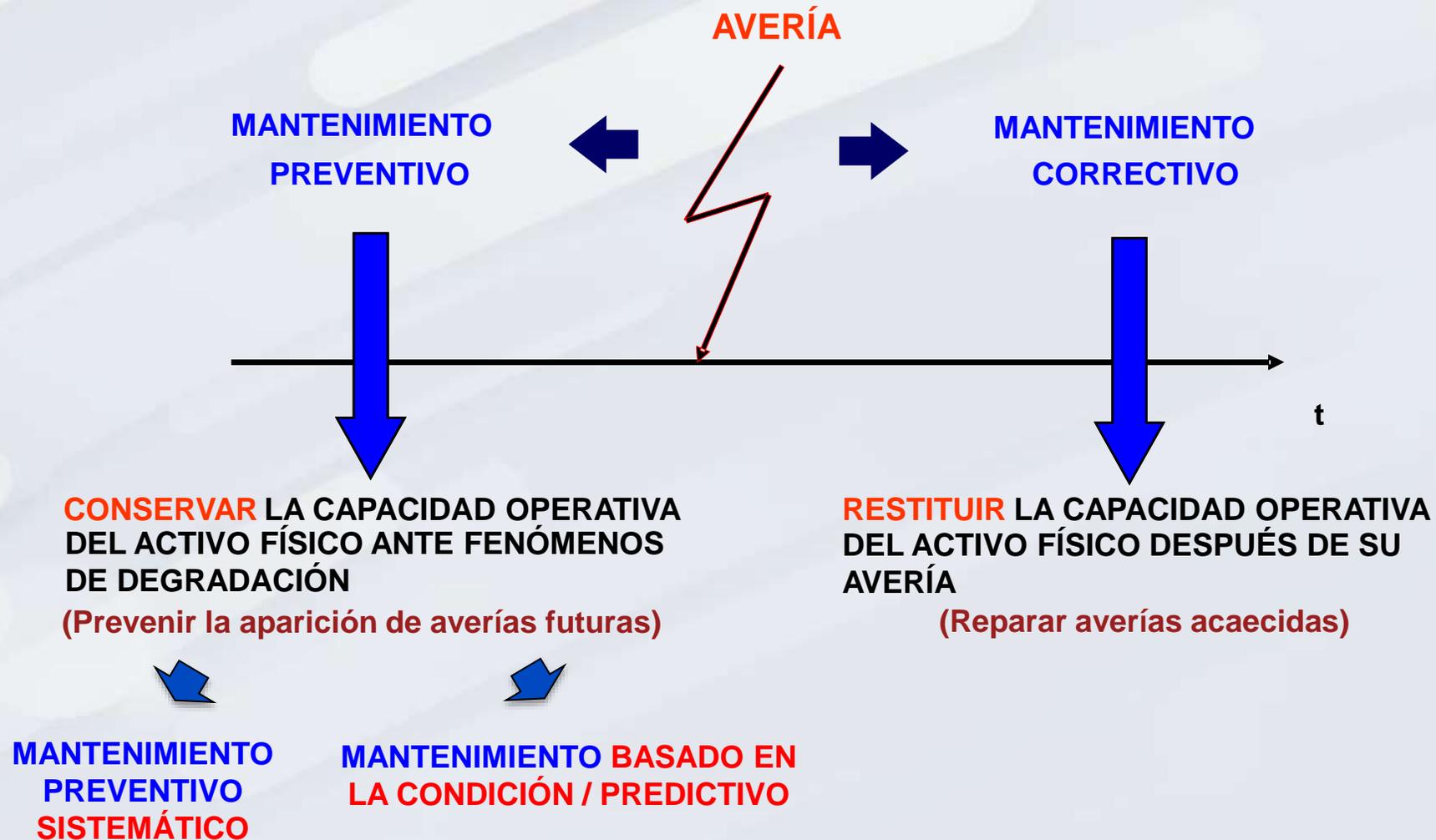
$$MDT = MTTR + DT$$

# MANTENIMIENTO (I)

**Actividades que se llevan a cabo para mantener la capacidad operativa del activo físico**

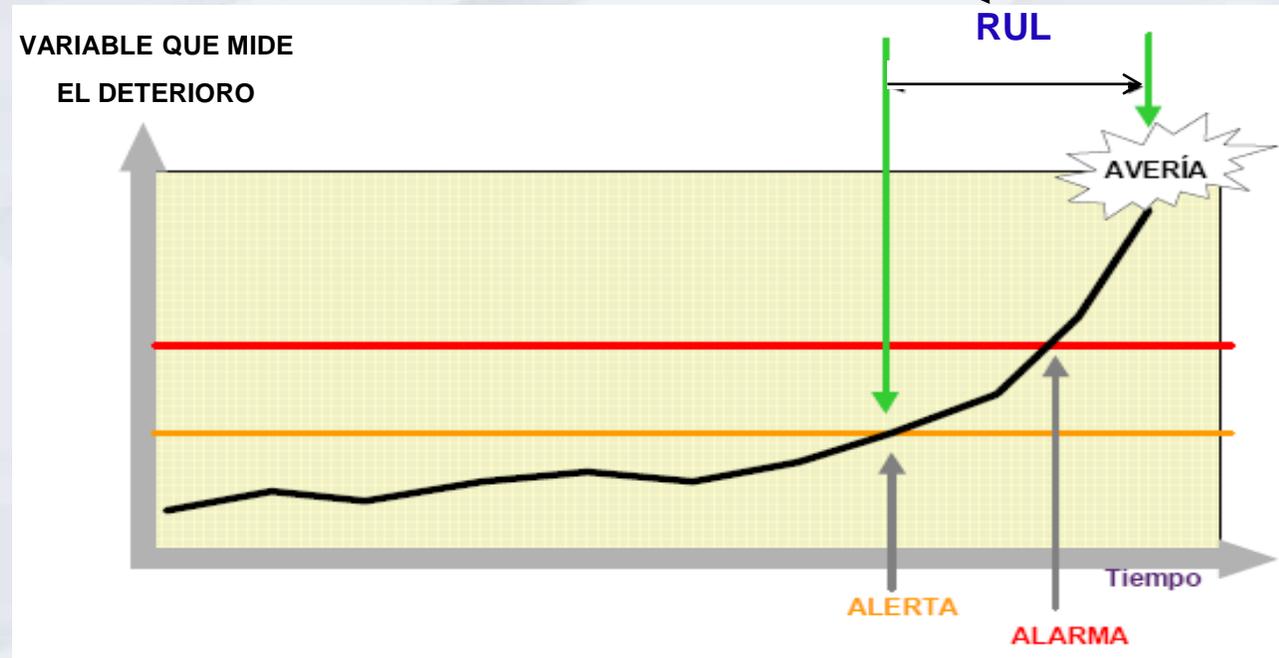
- Mantenimiento correctivo
- Mantenimiento preventivo
  - Mantenimiento preventivo sistemático
  - Mantenimiento preventivo basado en la condición (Diagnosis)
- Mantenimiento predictivo (Prognosis)
- Mantenimiento prescriptivo

# MANTENIMIENTO (II)



# MANTENIMIENTO BASADO EN LA CONDICIÓN (I)

Vida útil remanente (No está determinada)



Mediante “Diagnosis” se pueden detectar los niveles de alerta y alarma que se hayan establecido

RUL (Remanining Useful Life): Tiempo de vida restante hasta que el sistema falle y deje de realizar su función

# MANTENIMIENTO BASADO EN LA CONDICIÓN (II)

## MANTENIMIENTO PREDICTIVO

ULTRASONIDO



VIBRACIONES



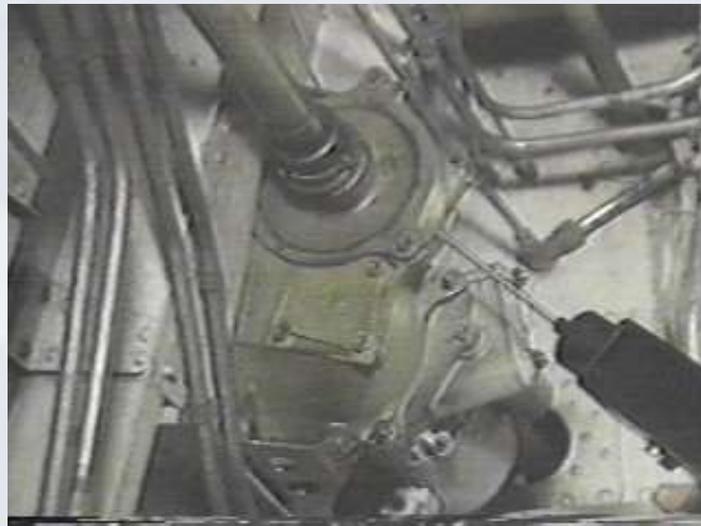
TERMOGRAFÍA



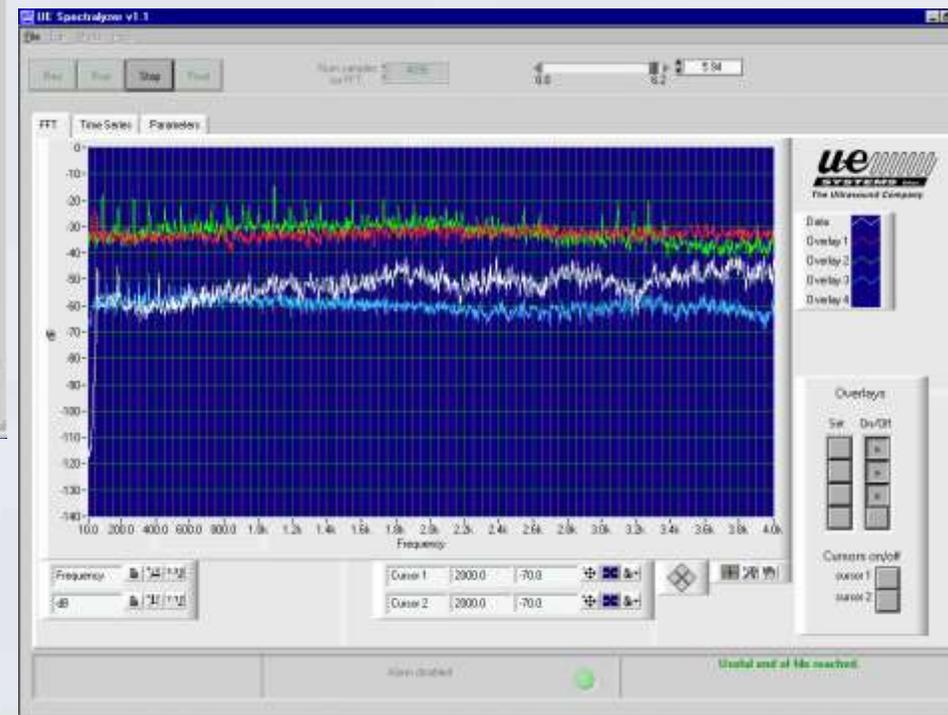
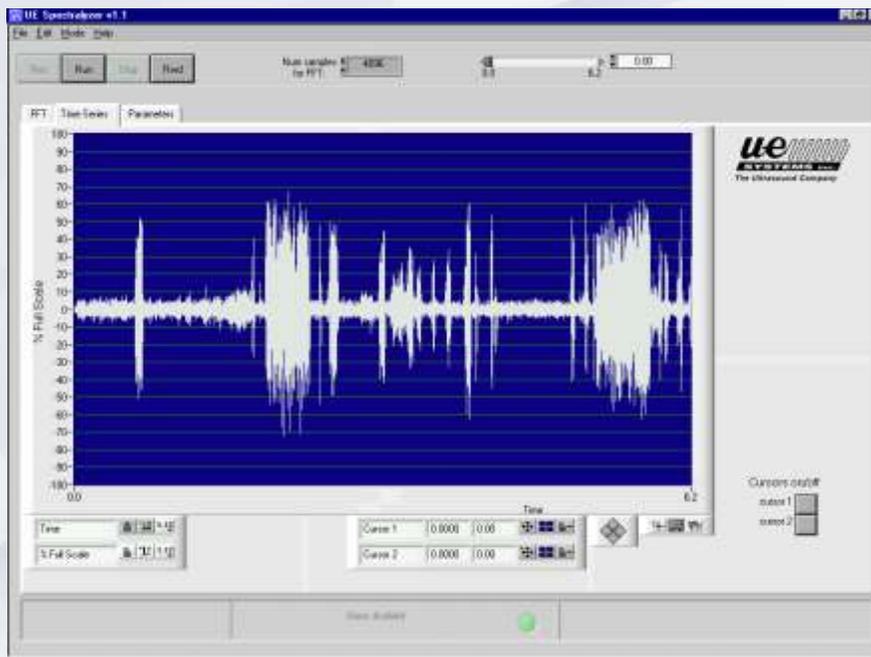
ANÁLISIS DE  
ACEITES



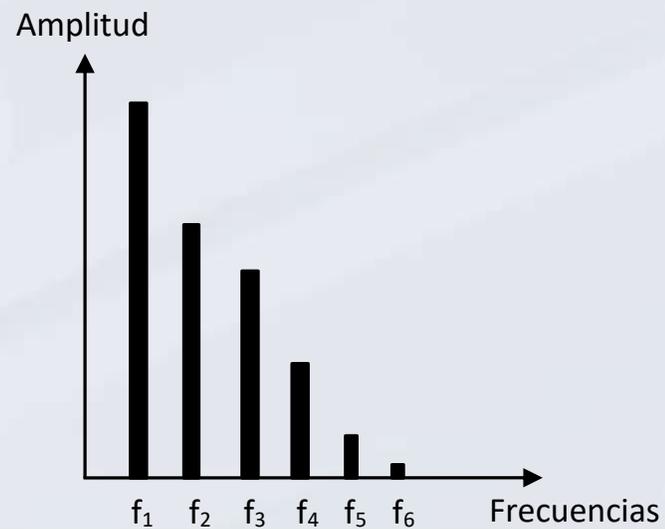
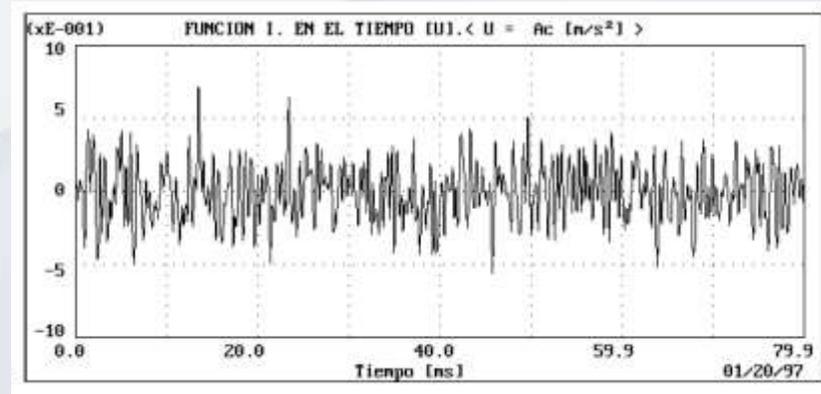
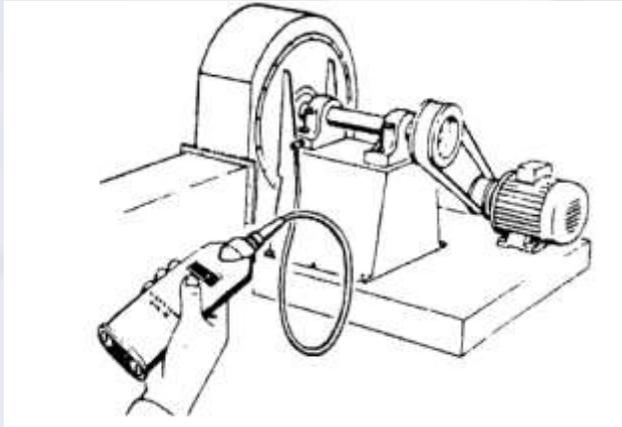
# ULTRASONIDOS (I)



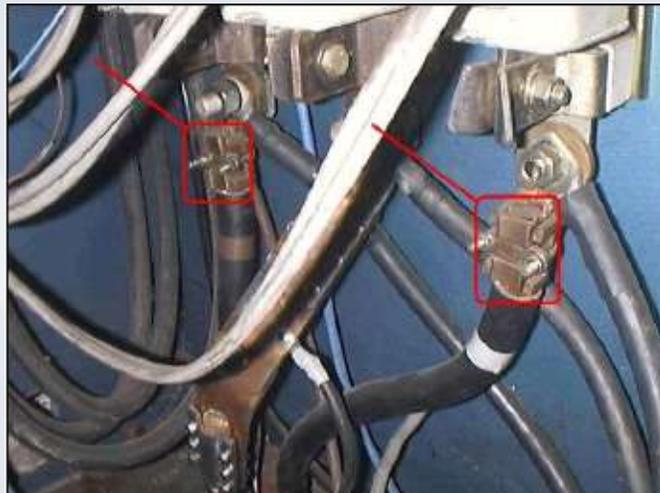
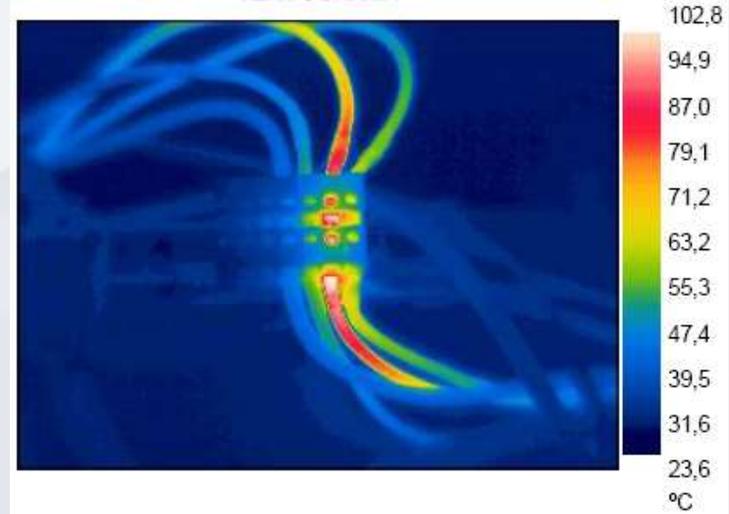
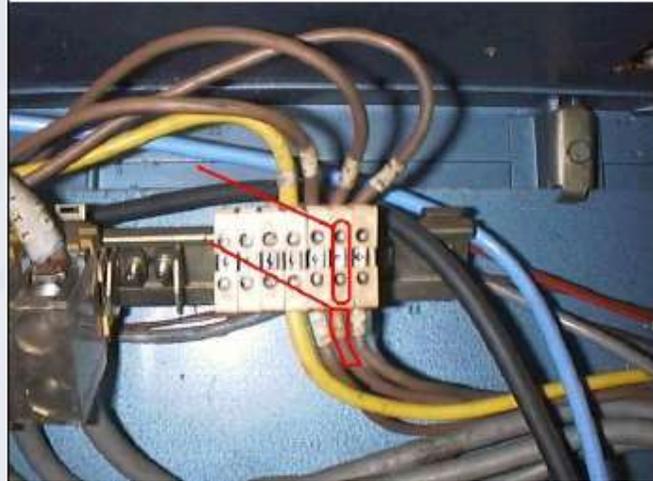
## ULTRASONIDOS (II)



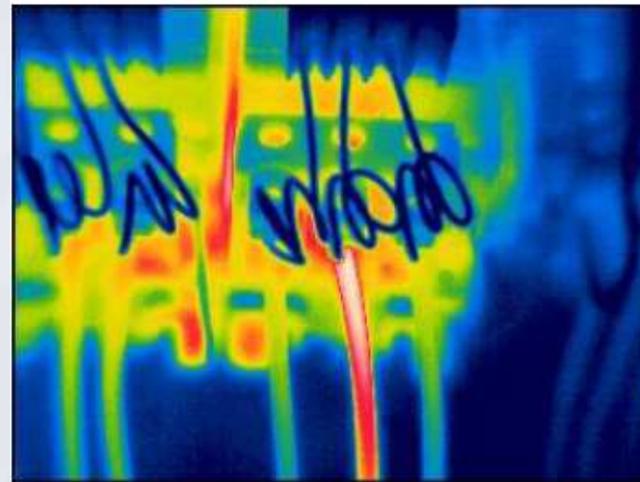
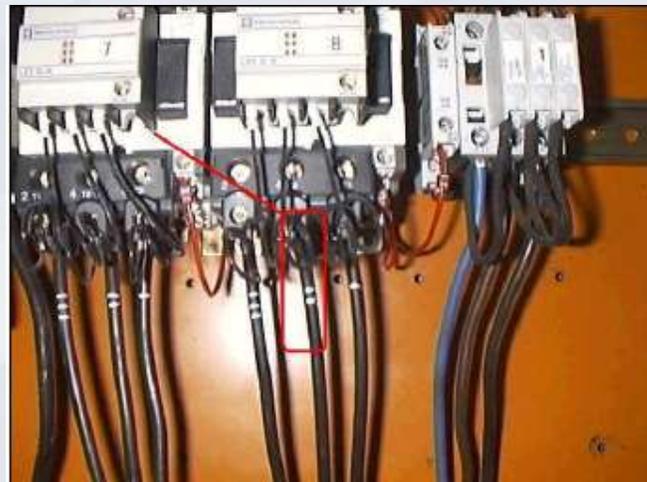
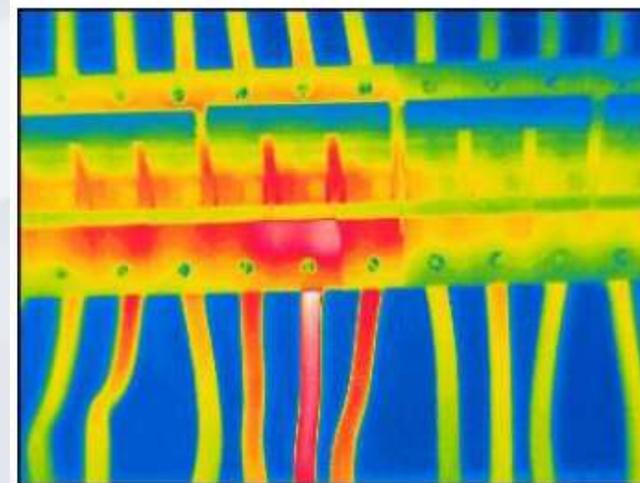
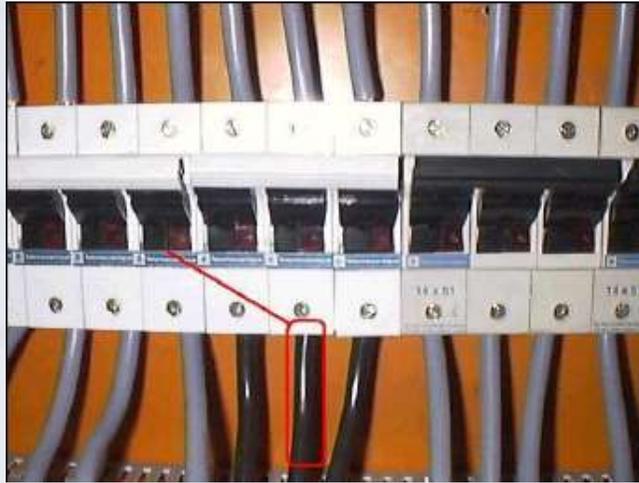
# VIBRACIONES



# TERMOGRAFÍA (I)



# TERMOGRAFÍA (II)



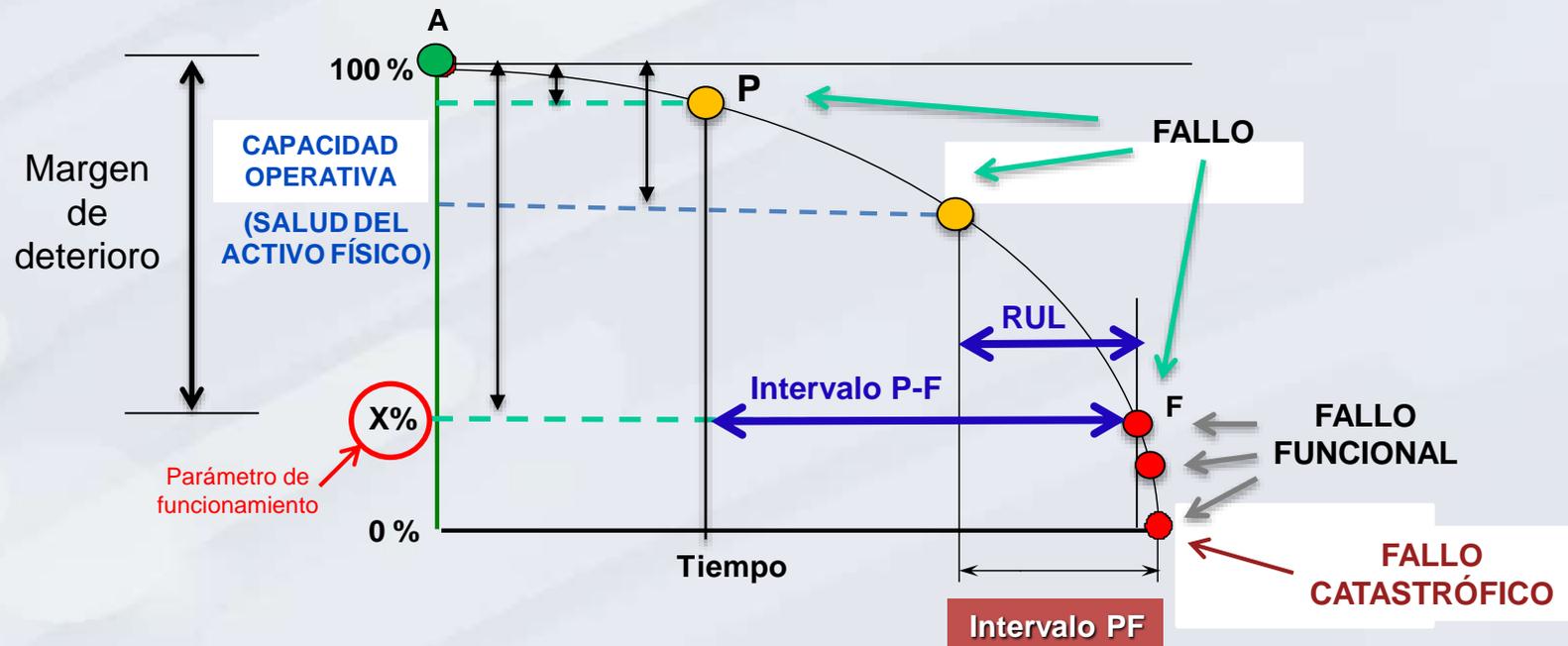
# ANÁLISIS DE ACEITES



Contaminación, viscosidad, existencia de partículas en el aceite por desgaste mecánico, corrosión, etc.

# MANTENIMIENTO PREDICTIVO (PROGNOSIS)

## CURVA P-F (P: Potential Failure - F: Functional Failure)

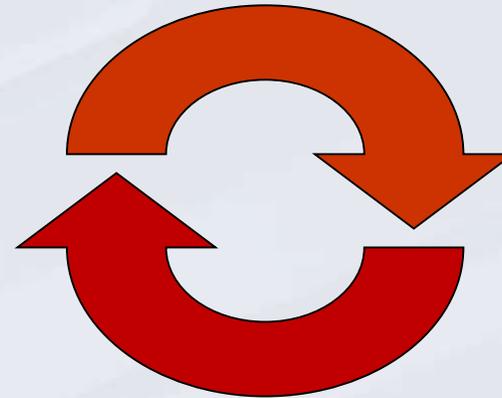


# GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO

## CIRCULO DE DEMING

PLANIFICAR

MEJORAR

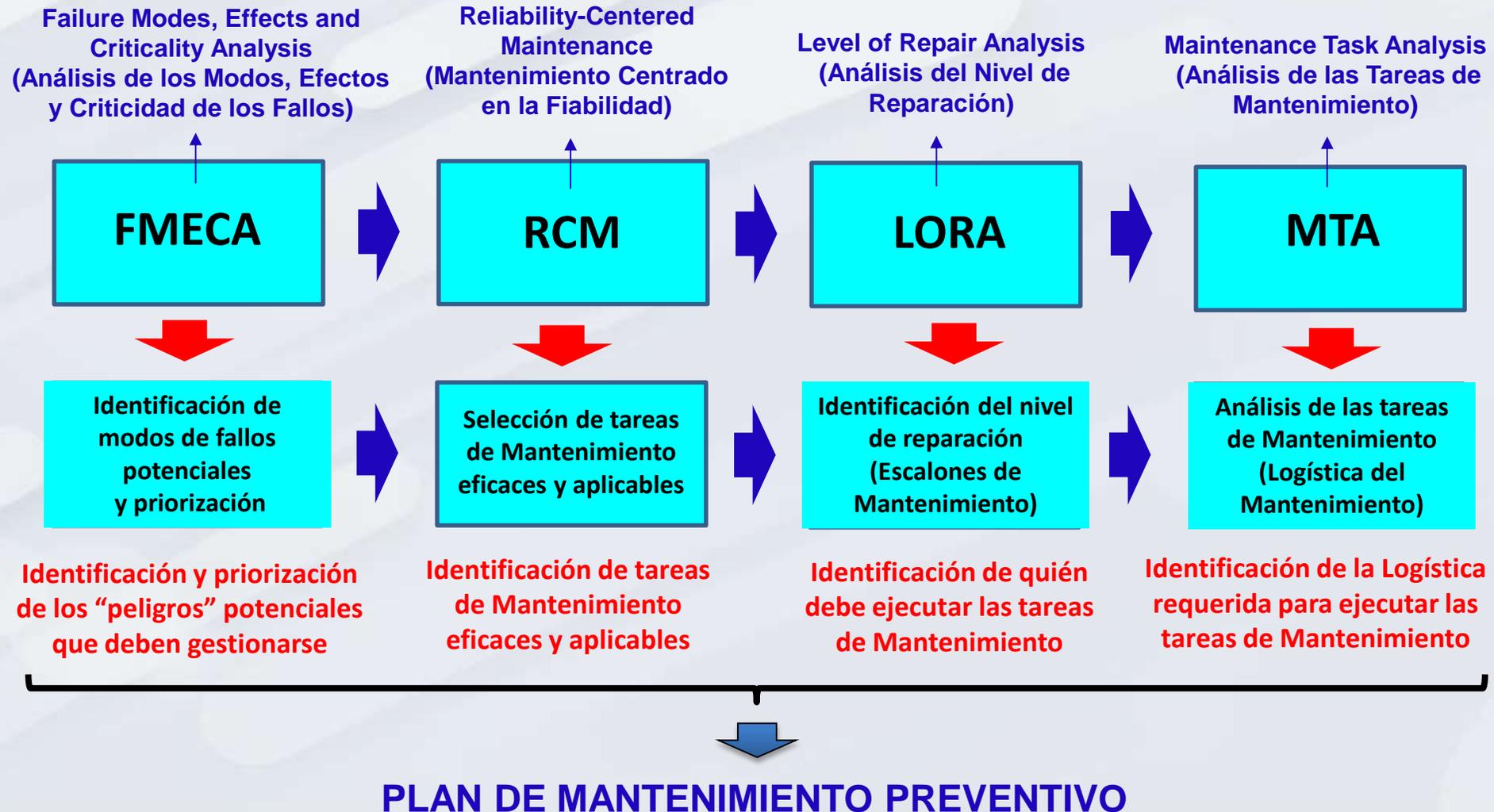


HACER

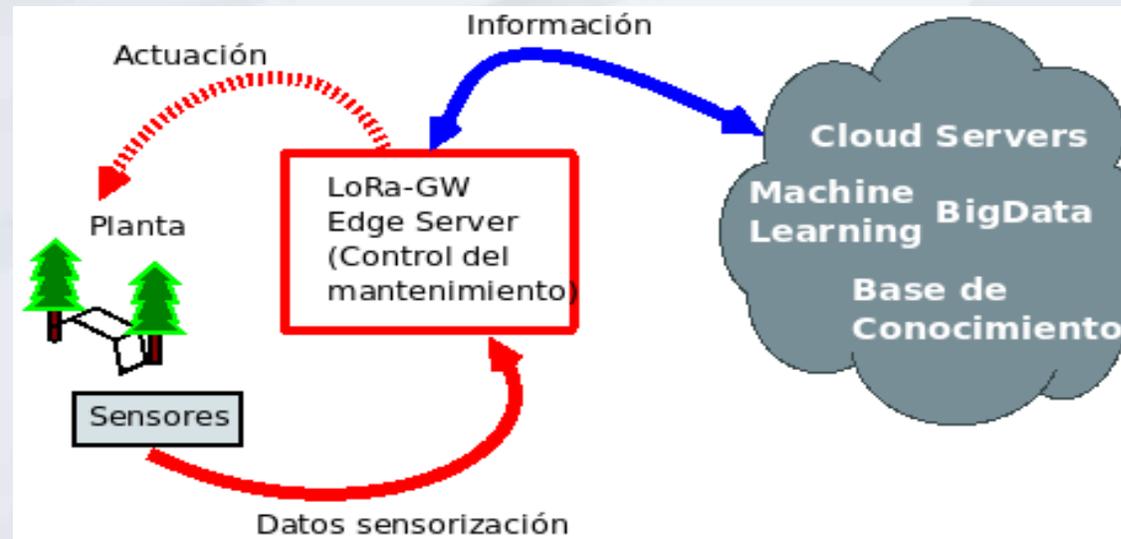
MEDIR

# EJEMPLO

## Elaboración de un Plan de Mantenimiento Preventivo en la Armada Española



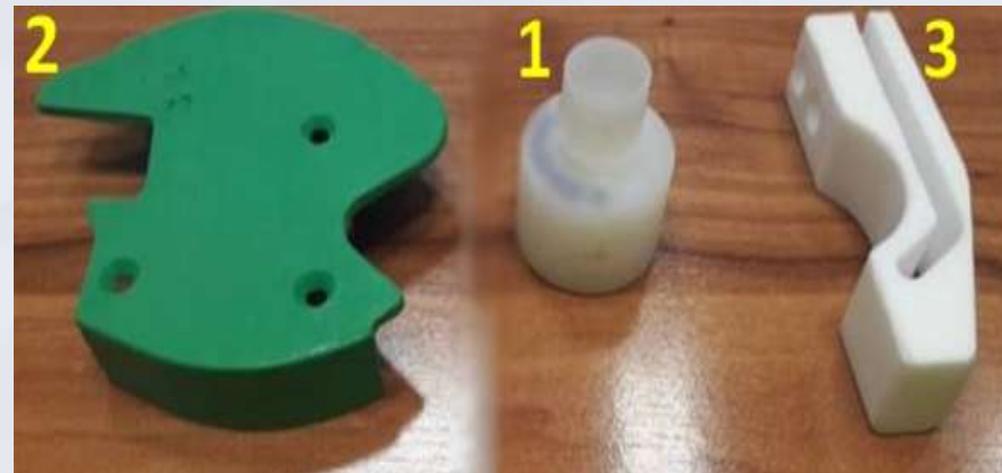
# MANTENIMIENTO 4.0



- Sistema a mantener.
- Tipo de mantenimiento (correctivo, preventivo, predictivo).
- Adquisición de datos: Sensores, sistemas de alimentación, adquisición, transmisión, monitorización y procesado de datos.
- Toma de decisiones de actuación basados en resultados de los procesos de análisis (BigData, Inteligencia Artificial, etc).

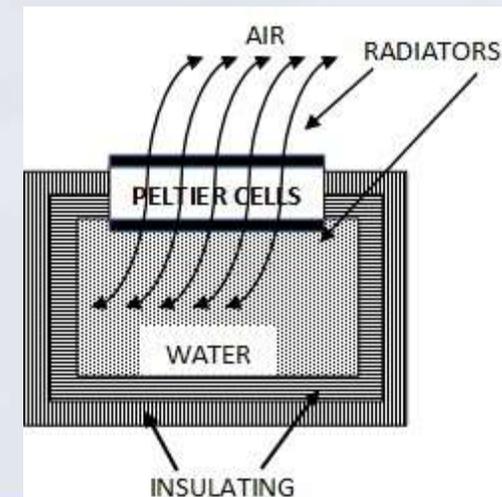
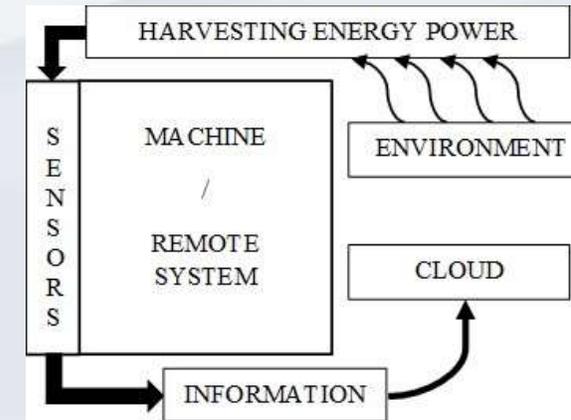
# TENDENCIAS FUTURAS EN EL MANTENIMIENTO (I)

## IMPRESIÓN 3D



# TENDENCIAS FUTURAS EN EL MANTENIMIENTO (II)

## PIEZAS INTELIGENTES – HARVESTING ENERGY



# DISPONIBILIDAD

Probabilidad de que un componente, circuito o sistema funcione correctamente en un instante determinado y en condiciones de trabajo especificadas

$$A = \frac{\textit{TiempoOperativo}}{\textit{TiempoOperativo} + \textit{TiempoNoOperativo}}$$

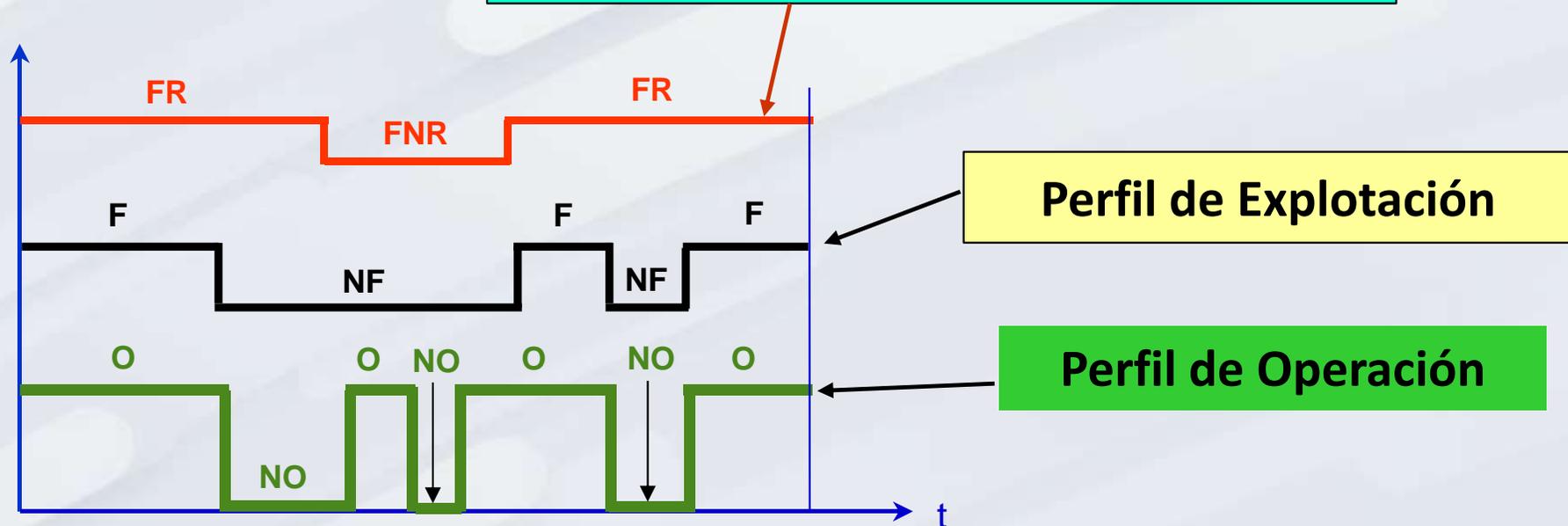
Disponibilidad Intrínseca:

$$A_i = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} = \frac{\mu}{\lambda + \mu}$$

Realmente => MTTR deberá ser sustituido por **MTTR+DT = MDT**

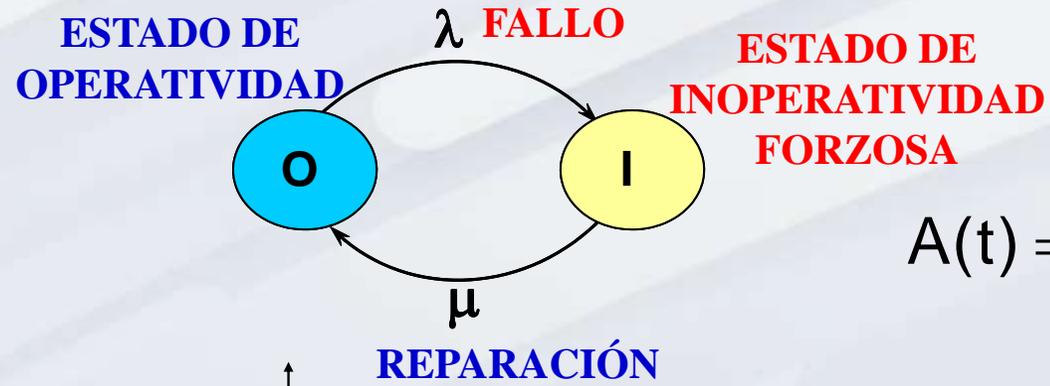
# DISPONIBILIDAD OPERATIVA

## Perfil de Demanda de Funcionamiento

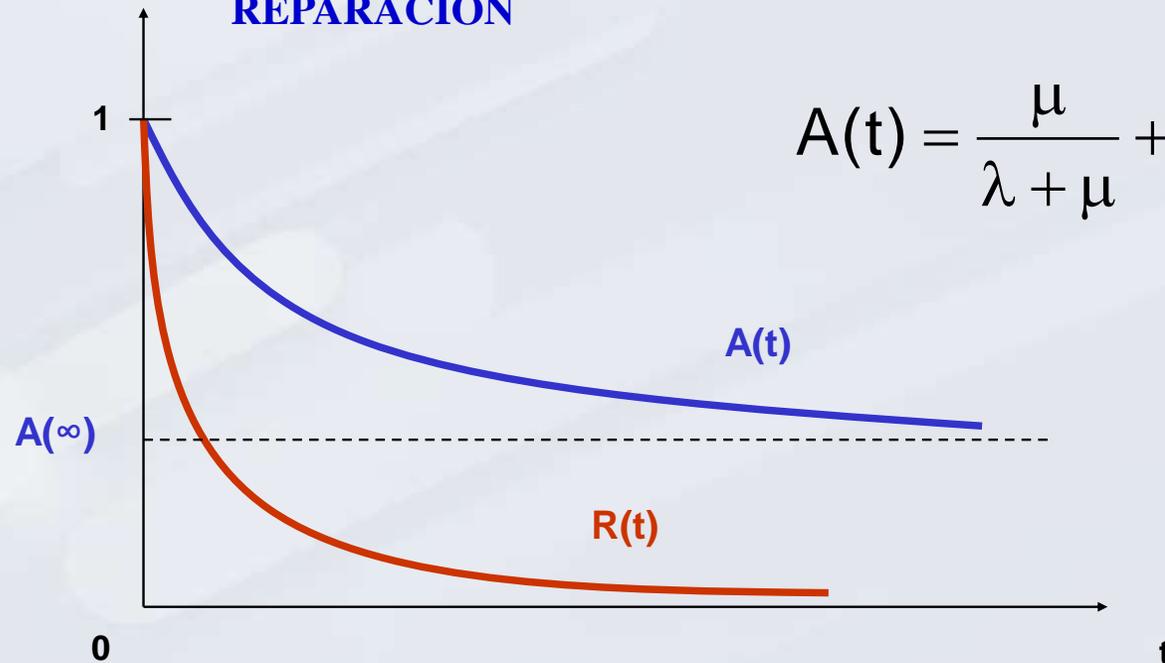


**FR: Período de Funcionamiento Requerido. FNR: Período de Funcionamiento No Requerido. F: Período de Funcionamiento. NF: Período de No Funcionamiento. O: Período en Condiciones Operativas Adecuadas. NO: Período en Condiciones Operativas No Adecuadas.**

# DISPONIBILIDAD DE UN DISPOSITIVO



$$A(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \cdot e^{-(\lambda + \mu) \cdot t}$$



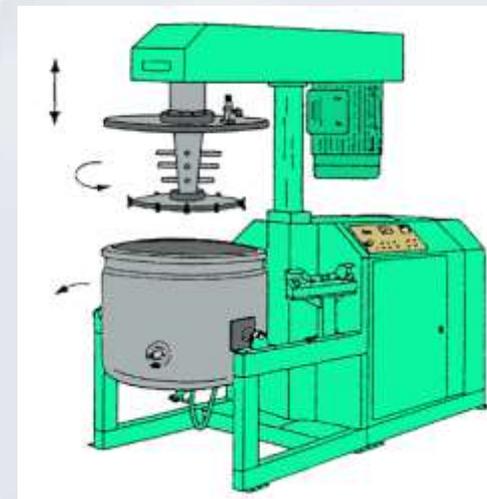
$$A(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \cdot \frac{R(t)}{e^{\mu \cdot t}}$$



# SEGURIDAD

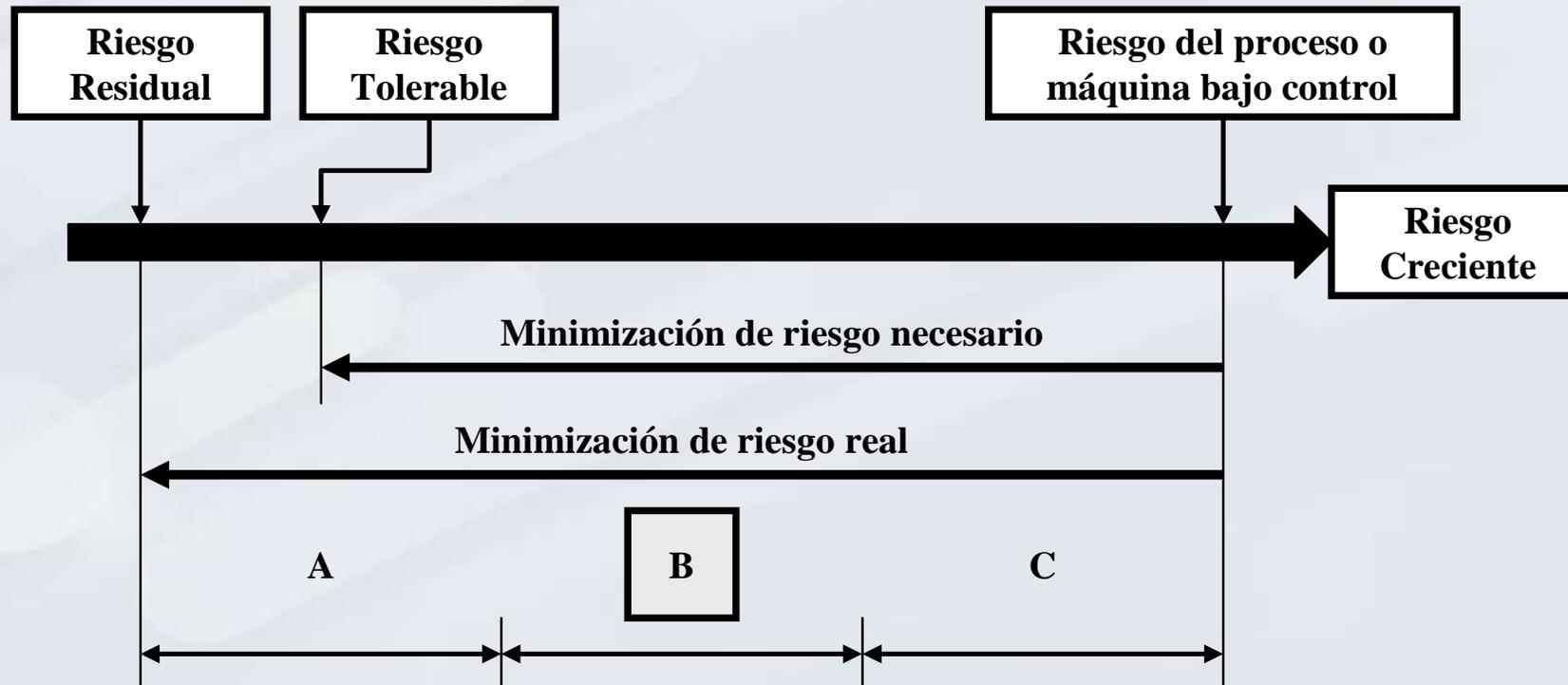
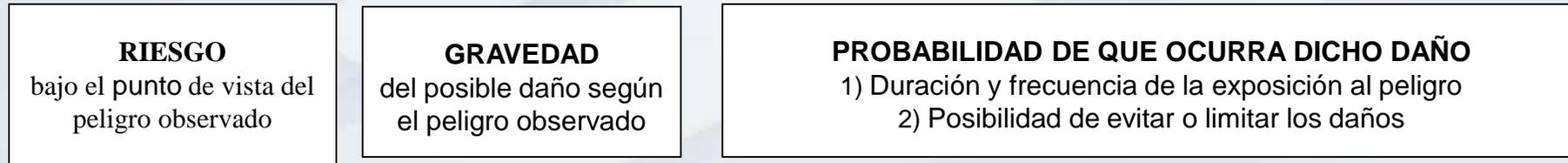
- **Seguridad (Safety):** Capacidad de un sistema para que, ante la presencia de un fallo en la instalación que controla o en el propio sistema de control, se alcance el estado seguro, que garantice la seguridad de las instalaciones, las personas y el medio ambiente.
- **Seguridad (Security):** La Seguridad (Security) se refiere a la protección de un dispositivo, equipo, sistema o instalación frente a “ataques/sucesos/hechos provocados” (sabotajes).

# APLICACIONES

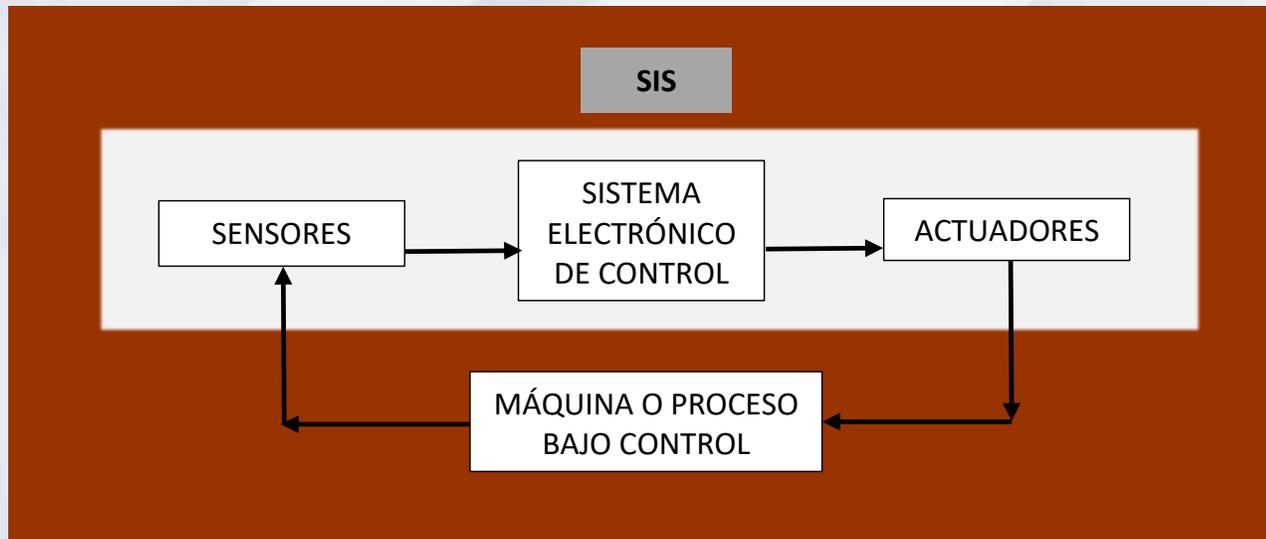


# ANÁLISIS DE RIESGOS

$$R = G \cdot P$$



# SISTEMA SEGURO ANTE AVERÍAS (SSA)



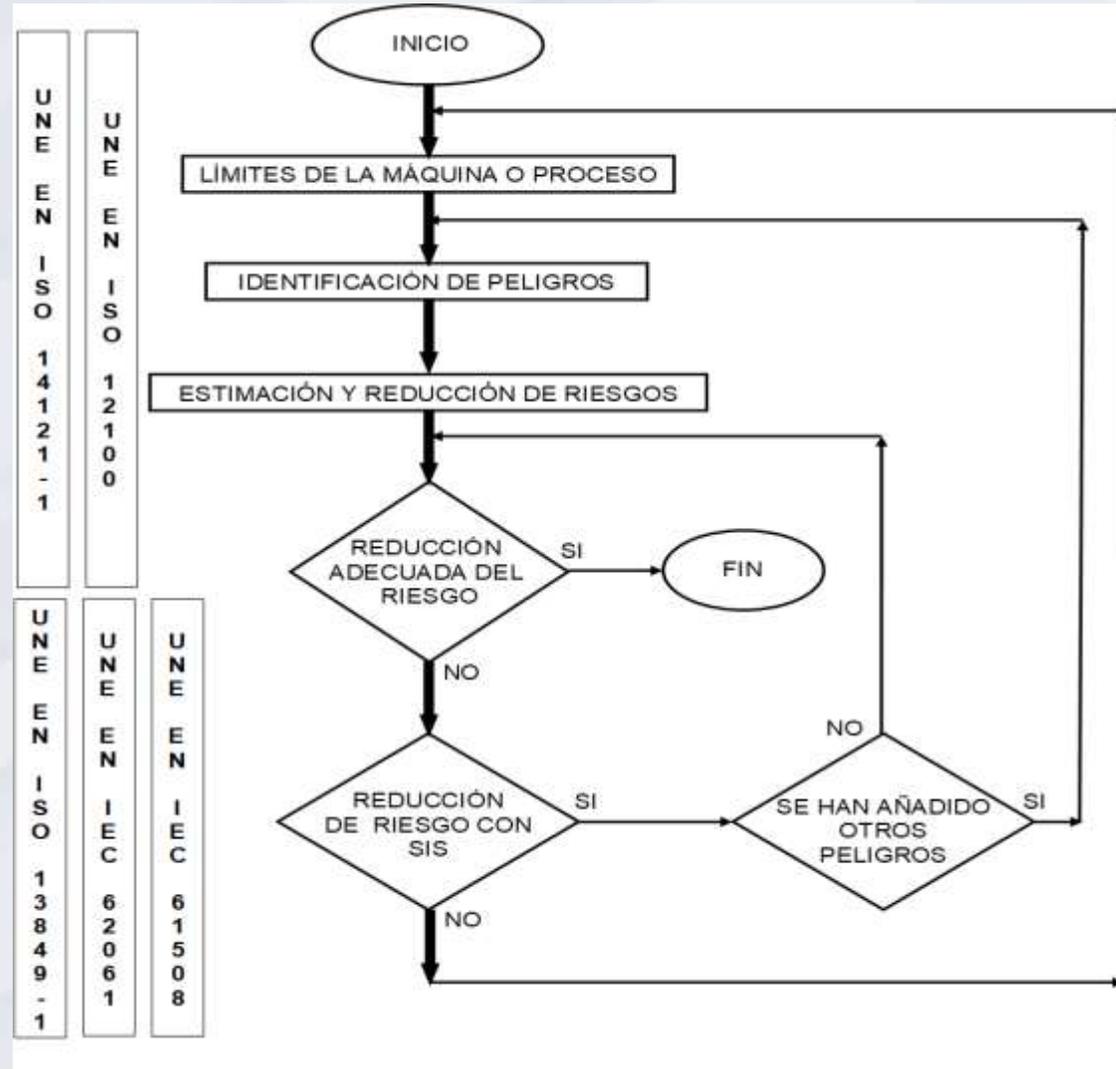
- **SIS** (Safety Instrumented System): Sistema Instrumentado de Seguridad
- **Fail-Safe System**: Sistema seguro ante averías
- **Sistema E/E/PE**: Sistema Eléctrico-Electrónico-Eléctrico programable, relacionado con la seguridad



# NORMATIVAS

- **Maquinaria**
  - ISO 13849-1
  - IEC 62061
- **Procesos**
  - ISA S84.01
  - IEC 61508
  - IEC 61511
- **Ferrovionario**
  - EN 50126/50128/50129
- **Automoción**
  - ISO 26262

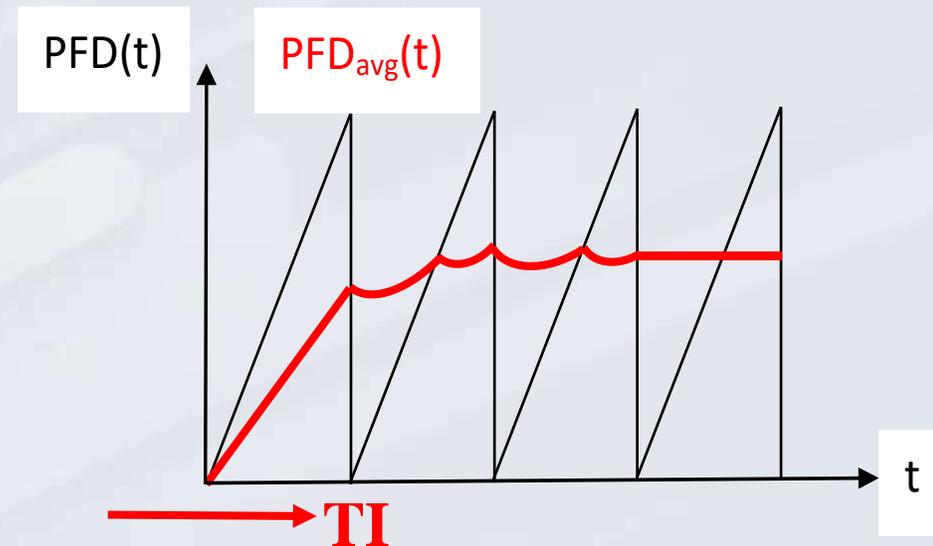
# DISEÑO DE UN SIS



# PROBAB. MEDIA DE FALLO EN DEMANDA ( $PFD_{avg}$ )

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad F(t) = PF(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad \text{Si } PF < 0,1 \Rightarrow PF(t) \approx \lambda t$$

$$PFD_{avg} \cdot T = \int_0^T PF(t) dt = \int_0^T \lambda t dt \quad PFD_{avg} = \frac{\lambda T}{2}$$

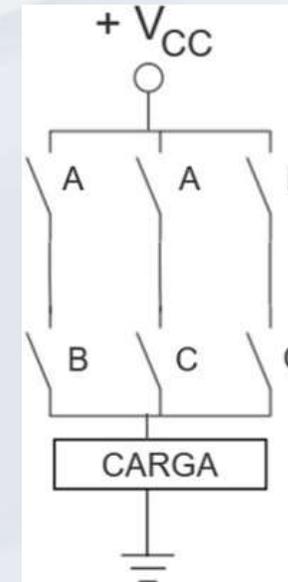
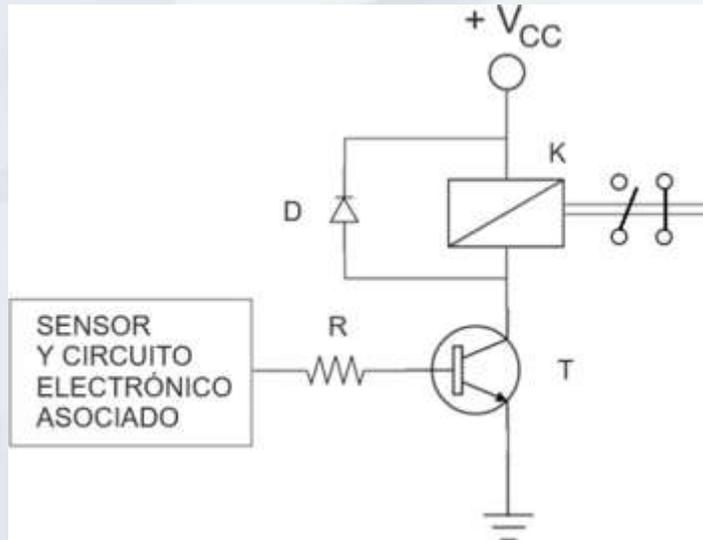


# NORMATIVA DE SEGURIDAD IEC 61508

SIL (Safety Integrity Level) - Nivel de seguridad integral

SIL	PFD <sub>avg</sub> (Baja demanda)	PFD <sub>avg</sub> (Alta demanda)
SIL 4	$\geq 10^{-5}$ to $< 10^{-4}$	$\geq 10^{-9}$ to $< 10^{-8}$
SIL 3	$\geq 10^{-4}$ to $< 10^{-3}$	$\geq 10^{-8}$ to $< 10^{-7}$
SIL 2	$\geq 10^{-3}$ to $< 10^{-2}$	$\geq 10^{-7}$ to $< 10^{-6}$
SIL 1	$\geq 10^{-2}$ to $< 10^{-1}$	$\geq 10^{-6}$ to $< 10^{-5}$

# ANÁLISIS DE LOS MODOS DE FALLO (AMFE)



Modos de fallo de un transistor (IEC TR 62380)	%
Cortocircuito	85
Circuito abierto	15

$$\lambda_{T_{CC}} = \lambda_T \cdot 0,85 = \lambda_D$$

$$\lambda_{T_{CA}} = \lambda_T \cdot 0,15 = \lambda_S$$

# TIPOS DE TASAS DE FALLOS

$\lambda$ : Tasa de fallos del componente

$\lambda_S$ : Tasa de fallos segura (Safety)

$\lambda_D$ : Tasa de fallos peligrosa (Dangerous)

$\lambda_{SD}$ : Tasa de fallos segura y detectable

$\lambda_{SU}$ : Tasa de fallos segura y no detectable

$\lambda_{DD}$ : Tasa de fallos peligrosa y detectable

$\lambda_{DU}$ : Tasa de fallos peligrosa y no detectable

$$\lambda = \lambda_S + \lambda_D = (\lambda_{SD} + \lambda_{SU}) + (\lambda_{DD} + \lambda_{DU})$$

$$DC = \frac{\lambda_{DD}}{\lambda_{DD} + \lambda_{DU}}$$

## EJEMPLO

The FMEDA with analysis of the safety critical and dangerous faults provides under the assumption of an annual functional test cycle following parameters:

SIL (Safety integrity level)	:	2	
HFT (Hardware fault-tolerance)	:	0 <sup>1)</sup> (single use)	
		<u>FMR23x</u>	<u>FMR24x</u>
SFF (Safe failure fraction)	:	>74%	> 75%
PFDavg (fail to danger) <sup>2)</sup>	:	0,42 x 10 <sup>-2</sup>	0,39 x 10 <sup>-2</sup>
MTBFges (mean time between total faults)	:	30,5 Jahre	31,3 Jahre
$\lambda_{du}$ (failure rate dangerous undetected faults)	:	957 FIT	886 FIT
$\lambda_{dd}$ (failure rate dangerous detected faults)	:	973 FIT	957 FIT
$\lambda_{su}$ (failure rate safe undetected faults)	:	1700 FIT	1690 FIT
$\lambda_{sd}$ (failure rate safe detected faults)	:	105 FIT	105 FIT

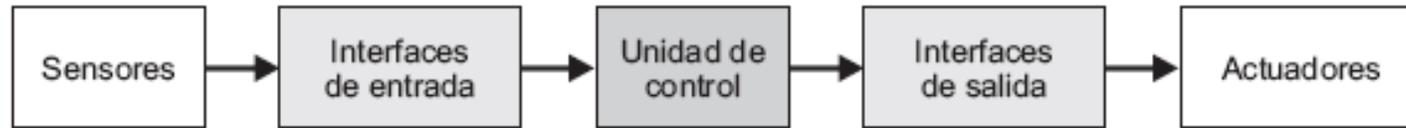
<sup>1)</sup> according to clause 11.4 of IEC 61511-1(FDIS)

<sup>2)</sup> The PFDavg values are also within the range for SIL2 according to ISA S84.01.

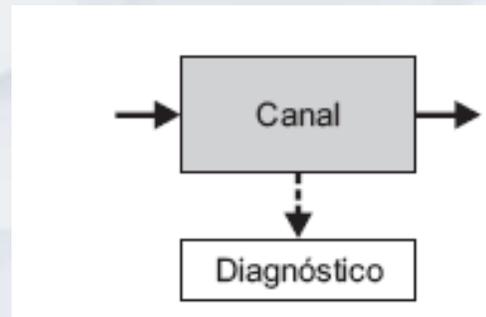
The assessment of the proven-in-use demonstration covers the device and its software including the modification process.



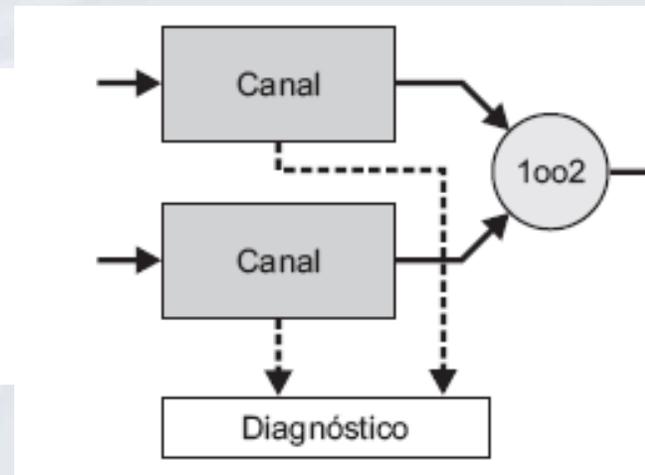
# ESTRUCTURAS (I)



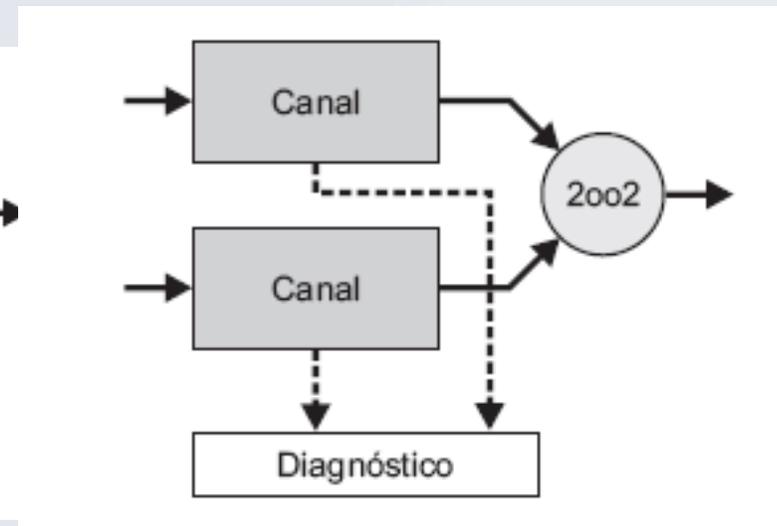
1001



1002

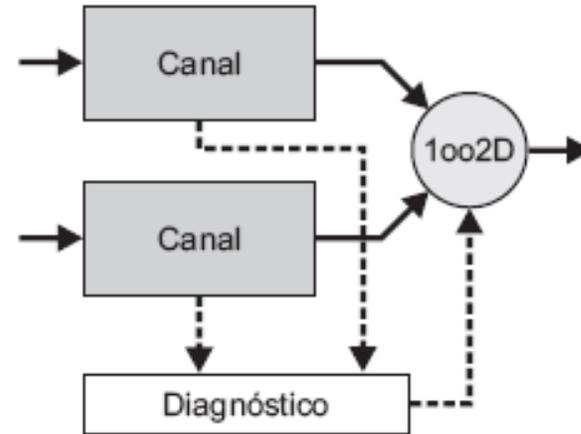


2002

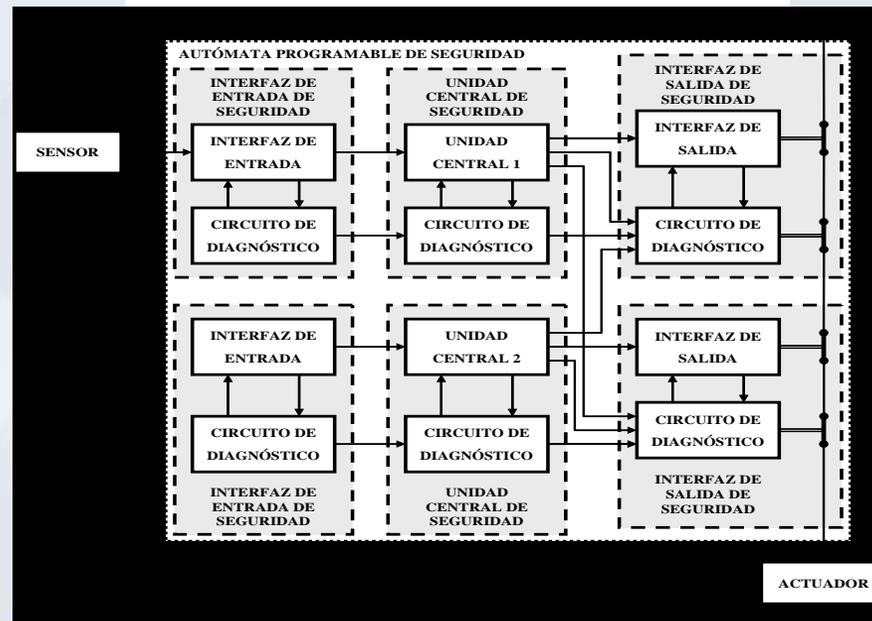
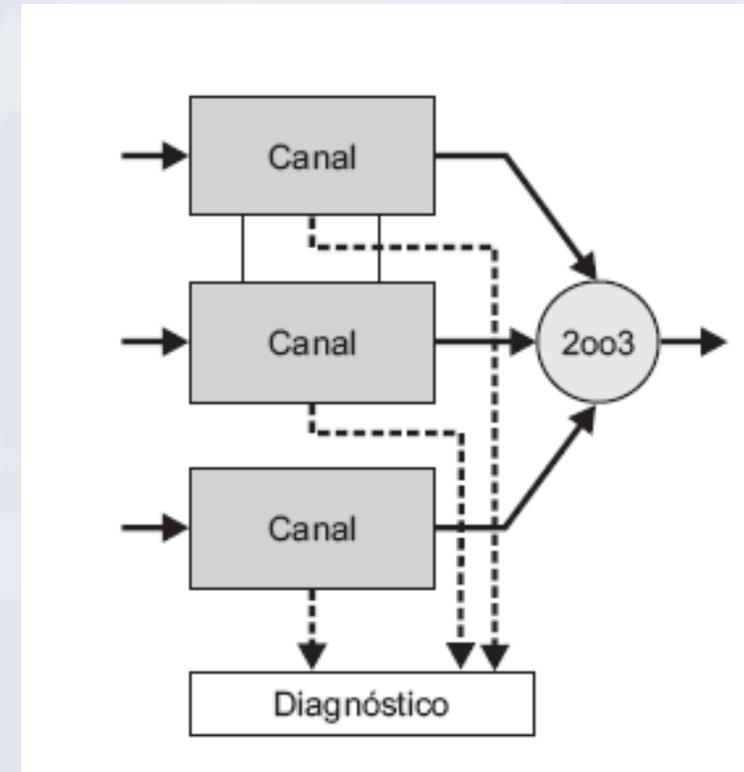


# ESTRUCTURAS (II)

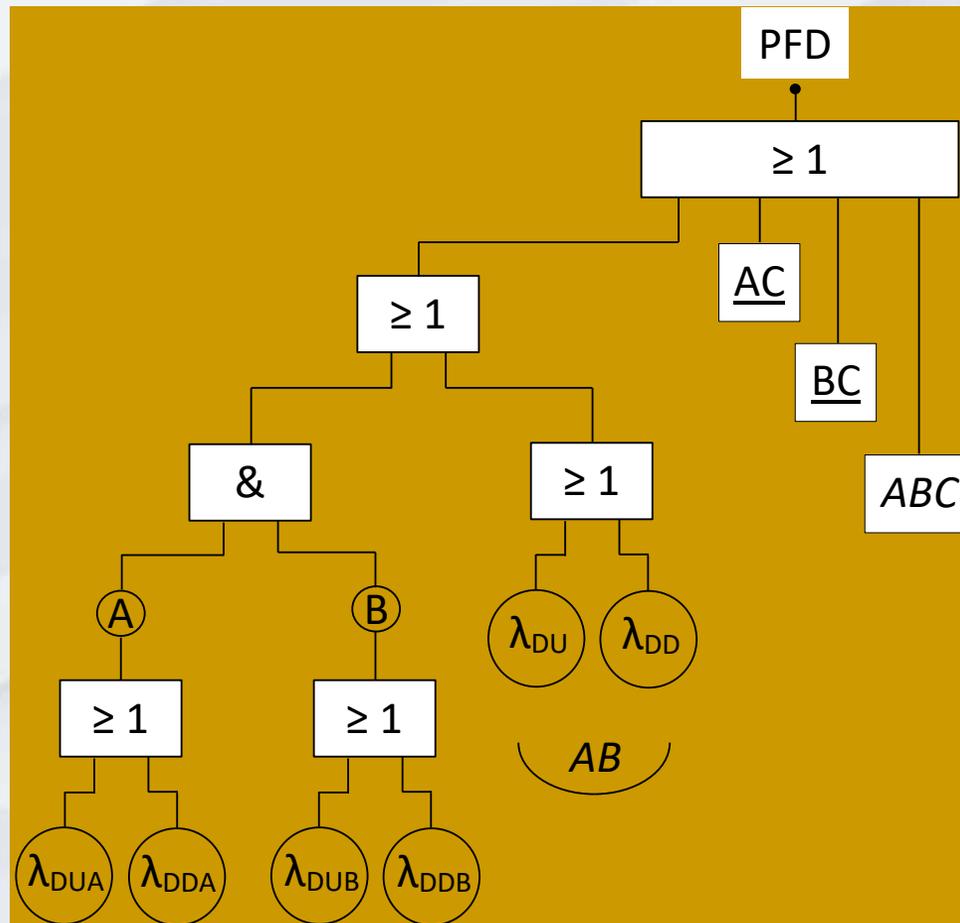
1002D



2003



## SIS 2003



$$PFD = PFD_A \cdot PFD_B + PFD_{AB} + PFD_A \cdot PFD_C + PFD_{AC} + PFD_B \cdot PFD_C + PFD_{BC} + PFD_{ABC}$$

Si  $A \equiv B \equiv C \Rightarrow$

$$PFD_{avg} = (\lambda_{DU} \cdot TI)^2$$

# COMPARATIVA DE ARQUITECTURAS (I)

SIS	$PFD_{avg}$ - Distintos	$PFD_{avg}$
1001	$\frac{\lambda_{DU} \cdot TI}{2}$	$\frac{\lambda_{DU} \cdot TI}{2}$
1002	$\frac{\lambda_{DU_1} \cdot \lambda_{DU_2} \cdot TI^2}{3}$	$\frac{\lambda_{DU}^2 \cdot TI^2}{3}$
1003	$\frac{\lambda_{DU_1} \cdot \lambda_{DU_2} \cdot \lambda_{DU_3} \cdot TI^3}{4}$	$\frac{\lambda_{DU}^3 \cdot TI^3}{4}$
2002	$(\lambda_{DU_1} + \lambda_{DU_2}) \cdot \frac{TI}{2}$	$\lambda_{DU} \cdot TI$
2003	$(\lambda_{DU_1} \cdot \lambda_{DU_2} + \lambda_{DU_1} \cdot \lambda_{DU_3} + \lambda_{DU_2} \cdot \lambda_{DU_3}) \cdot \frac{TI^2}{3}$	$\lambda_{DU}^2 \cdot TI^2$
2004	$(\lambda_{DU_1} \cdot \lambda_{DU_2} \cdot \lambda_{DU_3}) + (\lambda_{DU_1} \cdot \lambda_{DU_2} \cdot \lambda_{DU_4}) + (\lambda_{DU_1} \cdot \lambda_{DU_3} \cdot \lambda_{DU_4})$ $+ (\lambda_{DU_2} \cdot \lambda_{DU_3} \cdot \lambda_{DU_4}) \cdot \frac{TI^3}{4}$	$\lambda_{DU}^3 \cdot TI^3$

## COMPARATIVA DE ARQUITECTURAS (II)

Arquitectura	$PFD_{avg}$ TI = 1 Año	$PFD_{avg}$ TI = 3 Años	$PFD_{avg}$ TI = 5 Años	$PFD_{avg}$ TI = 10 Años
1001	$\frac{\lambda_{DU}}{2}$	$3 \cdot \frac{\lambda_{DU}}{2}$	$5 \cdot \frac{\lambda_{DU}}{2}$	$10 \cdot \frac{\lambda_{DU}}{2}$
1002	$\frac{\lambda_{DU}^2}{3}$	$9 \cdot \frac{\lambda_{DU}^2}{3}$	$25 \cdot \frac{\lambda_{DU}^2}{3}$	$100 \cdot \frac{\lambda_{DU}^2}{3}$
1003	$\frac{\lambda_{DU}^3}{4}$	$27 \cdot \frac{\lambda_{DU}^3}{4}$	$125 \cdot \frac{\lambda_{DU}^3}{4}$	$1000 \cdot \frac{\lambda_{DU}^3}{4}$
2002	$\lambda_{DU}$	$3 \cdot \lambda_{DU}$	$5 \cdot \lambda_{DU}$	$10 \cdot \lambda_{DU}$
2003	$\lambda_{DU}^2$	$9 \cdot \lambda_{DU}^2$	$25 \cdot \lambda_{DU}^2$	$100 \cdot \lambda_{DU}^2$
2004	$\lambda_{DU}^3$	$27 \cdot \lambda_{DU}^3$	$125 \cdot \lambda_{DU}^3$	$1000 \cdot \lambda_{DU}^3$



## ALGUNAS CONCLUSIONES

- Se hace Mantenimiento porque los equipos fallan.
- La característica básica es la Fiabilidad.
- Las consecuencias derivadas de la Fiabilidad y del Mantenimiento son la Disponibilidad y la Seguridad.
- Las instalaciones son cada vez más complejas y se necesitan nuevas técnicas en RAMS.
- La formación en RAMS es fundamental.



**MUCHAS GRACIAS POR SU ATENCIÓN**

*Jorge Marcos Acevedo - [acevedo@uvigo.es](mailto:acevedo@uvigo.es)*