

# Confiabilidad

*Diseño de Equipos Electrónicos*

*ITBA*

# Confiabilidad-Conceptos Básicos

## ■ Confiabilidad:

Es la característica de un *elemento*, expresada por la *probabilidad* de que el elemento realizará su *función requerida* bajo determinadas *condiciones* para un *intervalo de tiempo* dado.

- Elemento: Unidad funcional que puede ser considerada una entidad
- Función requerida: Determina lo que el elemento debe realizar.
- Condiciones: Se deben especificar claramente las condiciones de funcionamiento (temp, humedad, tensión de trabajo, etc)
- Intervalo de tiempo: Generalmente se toma al tiempo como parámetro por lo que se define a  $R(t)$  como la probabilidad de no falla durante el intervalo  $(0,t]$  suponiendo  $R(0)=1$

# Confiabilidad-Conceptos Básicos

- **Confiabilidad:**

Es la característica de un *elemento*, expresada por la *probabilidad* de que el elemento realizará su *función requerida* bajo determinadas *condiciones* para un *intervalo de tiempo* dado.

- **Elemento:** Unidad funcional que puede ser considerada una entidad

- Función requerida: Determina lo que el elemento debe realizar.
- Condiciones: Se deben especificar claramente las condiciones de funcionamiento (temp, humedad, tensión de trabajo, etc)
- Intervalo de tiempo: Generalmente se toma al tiempo como parámetro por lo que se define a  $R(t)$  como la probabilidad de no falla durante el intervalo  $(0,t]$  suponiendo  $R(0)=1$

# Confiabilidad-Conceptos Básicos

- **Confiabilidad:**

Es la característica de un *elemento*, expresada por la *probabilidad* de que el elemento realizará su *función requerida* bajo determinadas *condiciones* para un *intervalo de tiempo* dado.

- Elemento: Unidad funcional que puede ser considerada una entidad

- **Función requerida**: Determina lo que el elemento debe realizar

- Condiciones: Se deben especificar claramente los condiciones de funcionamiento (temp, humedad, tensión de trabajo, etc)
- Intervalo de tiempo: Generalmente se toma al tiempo como parámetro por lo que se define a  $R(t)$  como la probabilidad de no falla durante el intervalo  $(0,t]$  suponiendo  $R(0)=1$

# Confiabilidad-Conceptos Básicos

- **Confiabilidad:**

Es la característica de un *elemento*, expresada por la *probabilidad* de que el elemento realizará su *función requerida* bajo determinadas *condiciones* para un *intervalo de tiempo* dado.

- Elemento: Unidad funcional que puede ser considerada una entidad
- Función requerida: Determina lo que el elemento debe realizar.

- **Condiciones**: Se deben especificar claramente los condiciones de funcionamiento (temp, humedad, tensión de trabajo, etc)

- Intervalo de tiempo: Generalmente se toma al tiempo como parámetro por lo que se define a  $R(t)$  como la probabilidad de no falla durante el intervalo  $(0,t]$  suponiendo  $R(0)=1$

# Confiabilidad-Conceptos Básicos

- **Confiabilidad:**

Es la característica de un *elemento*, expresada por la *probabilidad* de que el elemento realizará su *función requerida* bajo determinadas *condiciones* para un *intervalo de tiempo* dado.

- Elemento: Unidad funcional que puede ser considerada una entidad
- Función requerida: Determina lo que el elemento debe realizar.
- Condiciones: Se deben especificar claramente los condiciones de funcionamiento (temp, humedad, tensión de trabajo, etc)

- Intervalo de tiempo: Generalmente se toma al tiempo como parámetro por lo que se define a  $R(t)$  como la probabilidad de no falla durante el intervalo  $(0,t]$  suponiendo  $R(0)=1$

# Confiabilidad-Conceptos Básicos

## ■ Falla:

Se determina que ocurrió una falla cuando un determinado elemento deja de cumplir su función requerida.

Se clasifican según:

- **Modo:** El modo de falla es el síntoma por el cual la falla es detectada. Ej: cortocircuitos, circuitos abiertos, fatigas, etc.
- **Causa:** La causa de una falla puede ser:
  - Intrínseca: debido a una debilidad del componente
  - Externas: debido a incorrecto uso del componente, error en el diseño, etc
  - Sistemática: cuando se trata de fallas determinísticas
- **Efecto:** La consecuencia de la falla depende generalmente si se considera a nivel componente o a nivel sistema. Los efectos pueden ser:
  - No relevante
  - Parcial
  - Completo
  - Crítica
  - Primaria o Secundaria

# Confiabilidad-Conceptos Básicos

- **Falla:**

Se determina que ocurrió una falla cuando un determinado elemento deja de cumplir su función requerida.

Se clasifican según:

- **Modo:** El modo de falla es el síntoma por el cual la falla es detectada. Ej: cortocircuitos, circuitos abiertos, fatigas, etc.
- **Causa:** La causa de una falla puede ser:
  - Intrínseca: debido a una debilidad del componente
  - Externas: debido incorrecto uso del componente, error en el diseño, etc
- **Efecto:** La consecuencia de la falla depende generalmente si se considera a nivel componente o a nivel sistema. Los efectos pueden ser:
  - No relevante
  - Parcial
  - Completo
  - Crítica
  - Primaria o Secundaria

# Confiabilidad-Conceptos Básicos

- **Falla:**

Se determina que ocurrió una falla cuando un determinado elemento deja de cumplir su función requerida.

Se clasifican según:

- **Modo:** El modo de falla es el síntoma por el cual la falla es detectada. Ej: cortocircuitos, circuitos abiertos, fatigas, etc.

- **Causa:** La causa de una falla puede ser:

 **Intrínseca:** debido a una debilidad del componente

- **Externas:** debido incorrecto uso del componente, error en el diseño, etc
- **Efecto:** La consecuencia de la falla depende generalmente si se considera a nivel componente o a nivel sistema. Los efectos pueden ser:
  - No relevante
  - Parcial
  - Completo
  - Crítica
  - Primaria o Secundaria

# Confiabilidad-Conceptos Básicos

- **Falla:**

Se determina que ocurrió una falla cuando un determinado elemento deja de cumplir su función requerida.

Se clasifican según:

- **Modo:** El modo de falla es el síntoma por el cual la falla es detectada. Ej: cortocircuitos, circuitos abiertos, fatigas, etc.
- **Causa:** La causa de una falla puede ser:
  - Intrínseca: debido a una debilidad del componente
  - Externas: debido incorrecto uso del componente, error en el diseño, etc

- **Efecto:** La consecuencia de la falla depende generalmente si se considera a nivel componente o a nivel sistema. Los efectos pueden ser:

- No relevante
- Parcial
- Completo
- Crítica
- Primaria o Secundaria

# Confiabilidad-Conceptos Básicos

También pueden clasificarse en:

**Fallas por desgaste:** Sobreviene con el uso y es una característica de la población.

Según la velocidad de aparición se habla de fallas repentinas o progresivas.

Según su grado o severidad pueden ser fallas parciales o completas (cuando pierde toda funcionalidad).

Por otro lado si la falla es por un lapso de tiempo y sin mediar acción externa se recobra la plena funcionalidad, entonces se habla de fallas intermitentes.

# Confiabilidad-Conceptos Básicos

También pueden clasificarse en:

**Fallas por desgaste:** Sobreviene con el uso y es una característica de la población.

Según la **velocidad de aparición** se habla de **fallas repentinas o progresivas.**

Según su **grado** pueden ser **fallas parciales o completas** (cuando pierde toda funcionalidad).

Por otro lado si la falla es por un lapso de tiempo y sin mediar acción externa se recobra la plena funcionalidad, entonces se habla de **fallas intermitentes.**

# Confiabilidad-Conceptos Básicos

También pueden clasificarse en:

**Fallas por desgaste:** Sobreviene con el uso y es una característica de la población.

Según la **velocidad de aparición** se habla de **fallas repentinas o progresivas**.

Según su **grado** pueden ser **fallas parciales o completas** (cuando pierde toda funcionalidad).

Por otro lado si la falla es por un lapso de tiempo y sin mediación externa se recobra la plena funcionalidad, entonces se habla de **fallas intermitentes**.

# Confiabilidad-Conceptos Básicos

También pueden clasificarse en:

**Fallas por desgaste:** Sobreviene con el uso y es una característica de la población.

Según la **velocidad de aparición** se habla de **fallas repentinas o progresivas**.

Según su **grado** pueden ser **fallas parciales o completas** (cuando pierde toda funcionalidad).

Por otro lado **si la falla es por un lapso de tiempo y sin mediar acción externa se recobra la plena funcionalidad**, entonces se habla de **fallas intermitentes**.

# Confiabilidad-Conceptos Básicos

Se llega finalmente a una categorización muy relevante de fallas en **dos grandes grupos**:

**Fallas por degradación o paramétricas:**  
progresivas + parciales

**Fallas catastróficas:**  
repentinas + completas + definitivas

*Todo el tratamiento que sigue se refiere a fallas catastróficas.*

# Confiabilidad-Conceptos Básicos

Se llega finalmente a una categorización muy relevante de fallas en dos grandes grupos:

**Fallas por degradación o paramétricas:**  
progresivas + parciales

**Fallas catastróficas:**  
repentinas + completas + definitivas

*Todo el tratamiento que sigue se refiere a fallas catastróficas.*

# Confiabilidad-Conceptos Básicos

Se llega finalmente a una categorización muy relevante de fallas en dos grandes grupos:

**Fallas por degradación o paramétricas:**

progresivas + parciales

**Fallas catastróficas:** 

repentinas + completas + definitivas

*Todo el tratamiento que sigue se refiere a fallas catastróficas.*

# Confiabilidad-Conceptos Básicos

Se llega finalmente a una categorización muy relevante de fallas en dos grandes grupos:

**Fallas por degradación o paramétricas:**  
progresivas + parciales

**Fallas catastróficas:**

repentinas + completas + definitivas

***Todo el tratamiento que sigue se refiere a  
fallas catastróficas.***

# Fiabilidad-Conceptos Básicos

## Tasa de Fallas:

Dados  $N_0$  elementos de un lote.

En un instante  $t > 0$  existirán:

$N_f(t)$  elementos que fallaron hasta  $t$

$N_s(t)$  elementos que funcionan en  $t$

Se denomina función de fallas

$$F(t) = N_f(t)/N_0$$

Nos indica la proporción de elementos que fallaron hasta  $t$ .

Por otro lado

$$R(t) = 1 - F(t)$$

Es la confiabilidad del lote.

# Fiabilidad-Conceptos Básicos

## Tasa de Fallas:

Queremos hallar los elementos que fallarán en un intervalo  $(t, t+\Delta t]$ ,  
Es obvio que en  $\Delta t$  sólo pueden fallar los que estaban funcionando en  $t$   
 $\Rightarrow N_s(t)$

Al coeficiente de proporcionalidad que indica esa proporción de fallas, se lo denomina:

**Tasa de Fallas:  $\lambda(t)$**  (en general es función de  $t$ )

Por lo tanto, tenemos:

$$\Delta N_f(t) = \lambda(t) N_s(t) \Delta t \Rightarrow$$

$$\lambda(t) = \frac{1}{N_s(t)} \cdot \frac{\Delta N_f(t)}{\Delta t} \quad (1)$$

# Fiabilidad-Conceptos Básicos

**Tasa de Fallas:**

$$\lambda(t) = \frac{1}{N_s(t)} \cdot \frac{\Delta N_f(t)}{\Delta t} \quad (1)$$

Si tomamos la definición de confiabilidad:

$$R(t)=1-F(t)=1- N_f(t)/N_0 = (N_0- N_f(t))/ N_0=N_s(t)/ N_0 \Rightarrow R(t) = \frac{N_s(t)}{N_0}$$

Por otro lado:  $\Delta F(t) \cdot N_0 = \Delta N_f(t) \text{ en } \Delta t \Rightarrow$

$$\Delta N_f(t) = \frac{\Delta F(t)}{\Delta t} \cdot N_0 \cdot \Delta t$$

Donde:  $\frac{\Delta F(t)}{\Delta t} = f(t)$  función densidad de fallas

Por lo tanto:  $\Delta N_f(t) = f(t) \cdot N_0 \cdot \Delta t$

# Fiabilidad-Conceptos Básicos

**Tasa de Fallas:**

De (1)

$$\lambda(t) = -\frac{1}{N_s(t)} \cdot \frac{f(t) \cdot N_0 \cdot \Delta t}{\Delta t} = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (2)$$

Ahora bien (admitiendo que podemos adoptar los  $\Delta$  como diferenciales) por otro lado:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \frac{d(1-R(t))}{dt} = \frac{-dR(t)}{dt} \Rightarrow \lambda(t) = -\frac{1}{R(t)} \cdot \frac{dR(t)}{dt}$$

Integramos  $\int \lambda(t) \cdot dt = - \int dR(t) \Rightarrow - \int_0^t \lambda(t) \cdot dt = \ln R(t)$

$$R(t) = e^{- \int_0^t \lambda(t) \cdot dt}$$

# Fiabilidad-Conceptos Básicos

MTTF:

hay que  
demostrarlo !!!!

$$\text{MTTF} = E(\tau) = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt = \int_0^{\infty} R(t) \cdot dt$$

Planteamos  $d(t \cdot R(t)) = R(t) \cdot dt + t \cdot dR(t)$

$$= R(t) \cdot dt - t \cdot \frac{dF(t)}{dt} \cdot dt = R(t) \cdot dt - t \cdot f(t) \cdot dt$$

Calculamos

$$\int_0^{\infty} d(t \cdot R(t)) = \lim_{t \rightarrow \infty} [t \cdot R(t)] - 0 \cdot R(0)$$

Si admitimos que  $R(t) > 0$  para  $t > \infty$  (alguna vez el elemento fallará) =>

$$0 = \int_0^{\infty} R(t) \cdot dt - \int_0^{\infty} t \cdot f(t) \cdot dt$$

# Fiabilidad-Conceptos Básicos

MTTF:

$$\Rightarrow E(\tau) = MTTF = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) \cdot dt = \int_0^{\infty} R(t) \cdot dt$$

Caso particular

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

$$\Rightarrow MTTF = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda}$$

# Fiabilidad-Conceptos Básicos

- La tasa de fallas es en general variable con el tiempo, siendo usual proponer un modelo genérico que es consecuencia de varios mecanismos.
- Uno debido a debilidades que puede tener el elemento por vicios en el proceso de fabricación o debilidad de los materiales y otro debido al desgaste al que está sometido el dispositivo (fallas por degradación)

# Fiabilidad-Conceptos Básicos

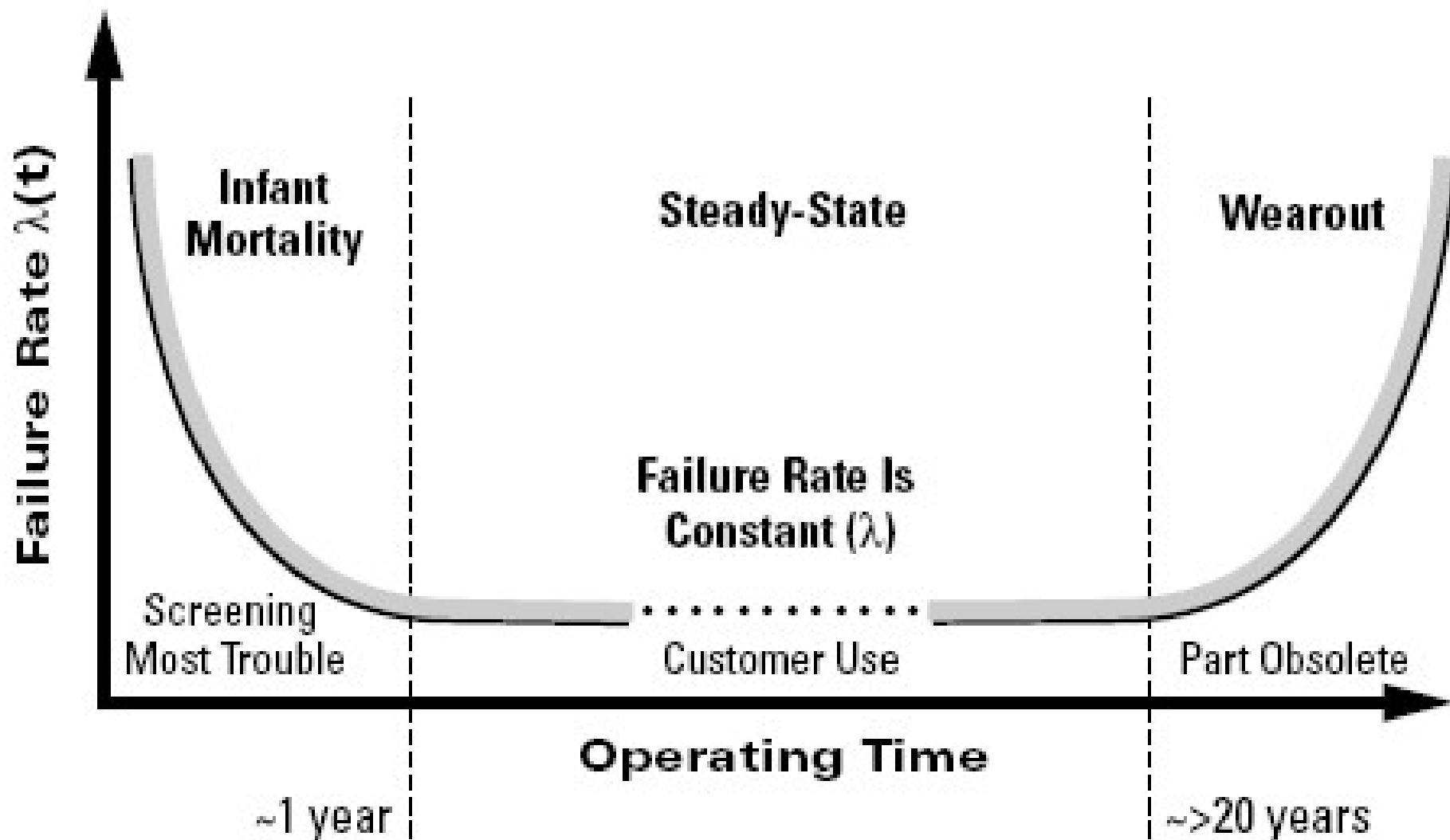
- La tasa de fallas es en general variable con el tiempo, siendo usual proponer un modelo genérico que es consecuencia de varios mecanismos.
- Uno debido a debilidades que puede tener el elemento por vicios en el proceso de fabricación o debilidad de los materiales y otro debido al desgaste al que está sometido el dispositivo (fallas por degradación)

# Fiabilidad-Conceptos Básicos

La combinación de ambos efectos determina un comportamiento conocido como curva de la bañera.

# Fiabilidad-Conceptos Básicos

La combinación de ambos efectos determina un comportamiento conocido como curva de la bañera.



# Fiabilidad-Conceptos Básicos

Fallas tempranas, accidentales y por envejecimiento

- Tempranas:

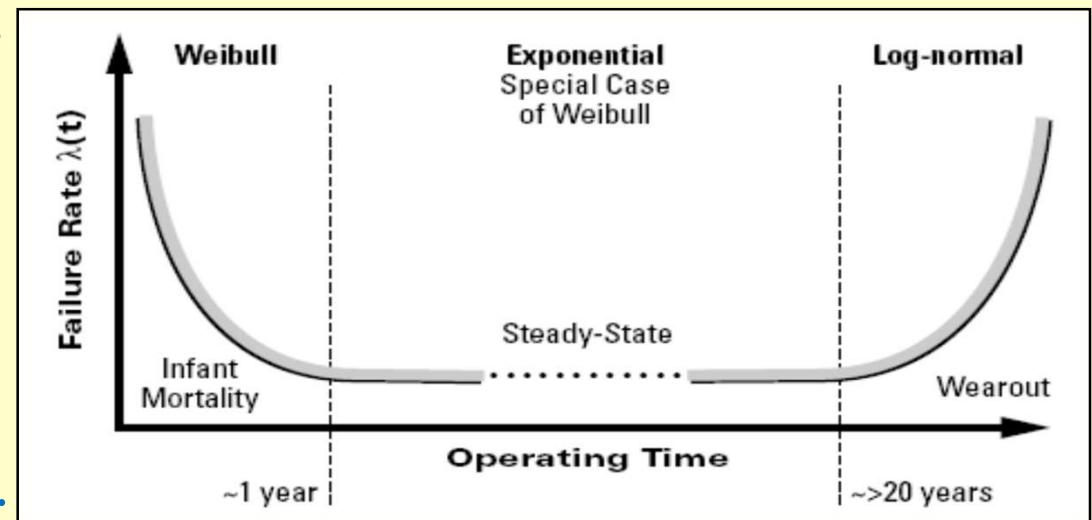
- ✓  $\lambda(t)$  decrece rápidamente
- ✓ Las fallas son atribuibles a debilidades en los materiales componentes, o errores durante la producción.

- Accidentales

- ✓  $\lambda(t)$  es prácticamente cte.
- ✓ Las fallas responden a la distribución de Poisson.

- Envejecimiento:

- ✓  $\lambda(t)$  se incrementa con el tiempo.
- ✓ Las fallas son atribuibles a la fatiga, desgaste, etc.



# Confiabilidad

## Estimación de la Confiabilidad

El procedimiento para el cálculo de la confiabilidad estimada consiste en:

1. Definir la función requerida y sus variables de entorno
2. Confeccionar el diagrama de confiabilidad correspondiente (RBD)
3. Identificar las condiciones de operación de cada bloque del RBD
4. Determinar la tasa de falla para cada elemento del RBD
5. Calcular la confiabilidad para cada elemento del RBD
6. Calcular la confiabilidad del sistema  $Rs(t)$
7. Modificar el diseño y comenzar por el punto 1 nuevamente.

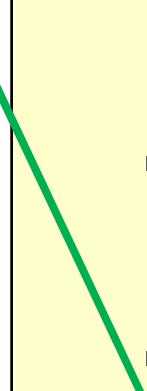
# Confiabilidad

## Estimación de la Confiabilidad

### 1. Función Requerida

1. Definir la función requerida y sus variables de entorno
2. Confeccionar el diagrama de confiabilidad correspondiente (RBD)
3. Identificar las condiciones de operación de cada bloque del RBD
4. Determinar la tasa de falla para cada elemento del RBD
5. Calcular la confiabilidad para cada elemento del RBD
6. Calcular la confiabilidad del sistema  $Rs(t)$
7. Modificar el diseño y comenzar por el punto 1 nuevamente.

- Establece la función del elemento.
- Es el punto de partida para cualquier análisis.
- Debe definirse utilizando las tolerancias aceptables
- Deben establecer las condiciones ambientales
  - Temperatura ambiente y de almacenamiento.  
Ej: -20°C a +60°C
  - Humedad, Presión. Ej: 40% a 60%
  - Vibración, Ruido. Ej: 0.5G de 2 Hz a 60Hz
- Para los casos en los que las condiciones de trabajo cambien en el tiempo debe establecerse claramente los escenarios posibles.
- De las condiciones establecidas en esta parte se extraerán las condiciones de operación de cada bloque.



# Confiabilidad

## Estimación de la Confiabilidad

### 2. Diagrama de Confiabilidad (RBD)

1. Definir la función requerida y sus variables de entorno
2. Confeccionar el diagrama de confiabilidad correspondiente (RBD)
3. Identificar las condiciones de operación de cada bloque del RBD
4. Determinar la tasa de falla para cada elemento del RBD
5. Calcular la confiabilidad para cada elemento del RBD
6. Calcular la confiabilidad del sistema  $Rs(t)$
7. Modificar el diseño y comenzar por el punto 1 nuevamente.

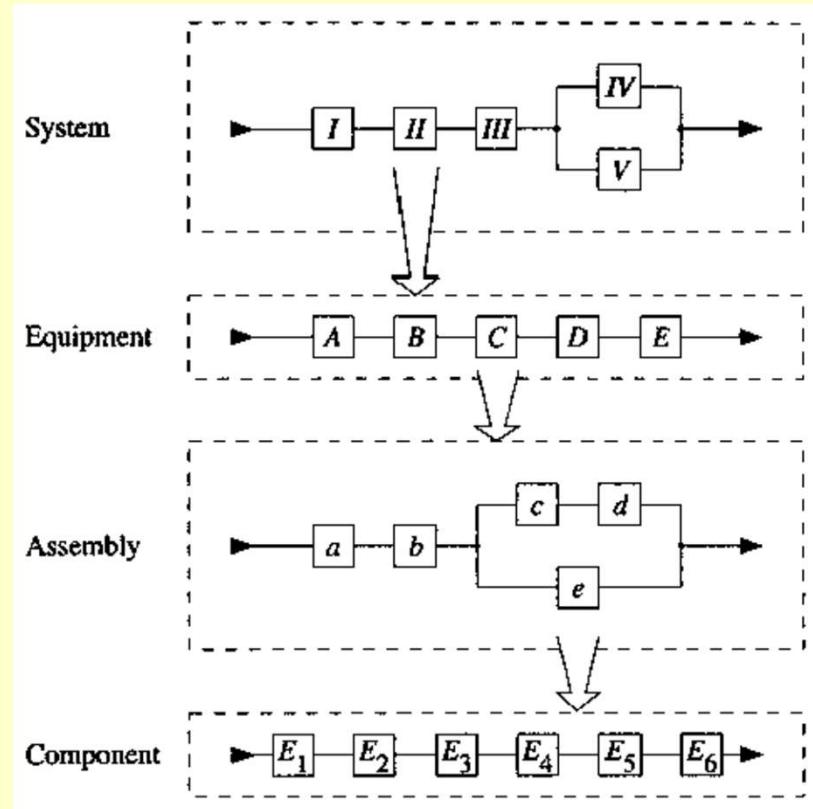
- Es un diagrama de eventos.
- Responde a la pregunta:
  - ¿Qué elementos del sistema son necesarios para realizar la función requerida y cuáles pueden fallar sin afectarla?
- Para su confección se divide al sistema en elementos cuya función pueda ser claramente definida.
- Los elementos que no pueden fallar son conectados en serie.
- Los elementos que pueden fallar son conectados en paralelo.
- Cada elemento puede tener dos estados:
  - Funcionando o dañado
- Cada elemento solo puede tener un modo de falla.
  - Ej: abierto o cortocircuitado

# Confiabilidad

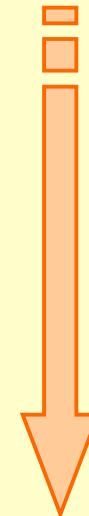
## Estimación de la Confiabilidad

- Diagrama de Confiabilidad (RBD) (cont.)

1. Definir la función requerida y sus variables de entorno
2. Confeccionar el diagrama de confiabilidad correspondiente (RBD)
3. Identificar las condiciones de operación de cada bloque del RBD
4. Determinar la tasa de falla para cada elemento del RBD
5. Calcular la confiabilidad para cada elemento del RBD
6. Calcular la confiabilidad del sistema  $R_s(t)$
7. Modificar el diseño y comenzar por el punto 1 nuevamente.



**Estrategia  
Top - Down**



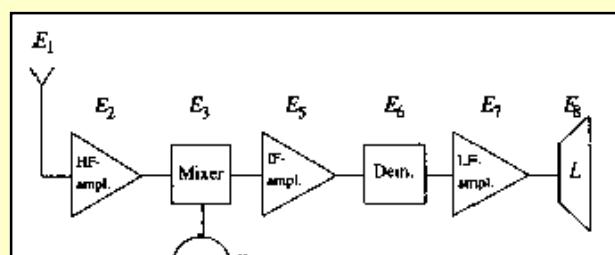
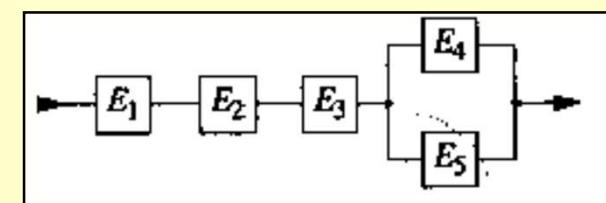
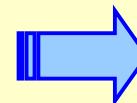
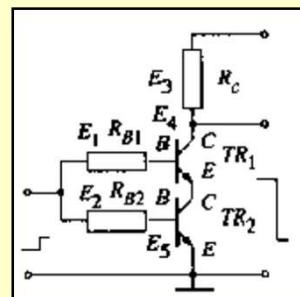
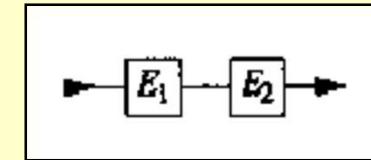
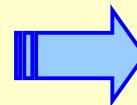
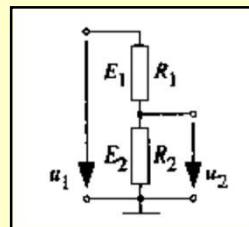
# Confiabilidad

## Estimación de la Confiabilidad

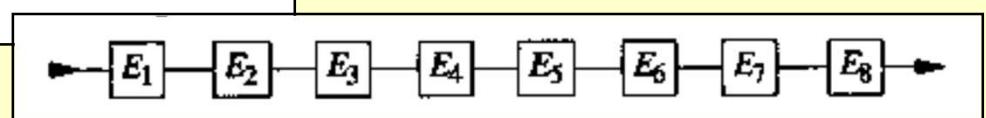
- Diagrama de Confiabilidad (RBD) (cont.)

1. Definir la función requerida y sus variables de entorno
2. Confeccionar el diagrama de confiabilidad correspondiente (RBD)
3. Identificar las condiciones de operación de cada bloque del RBD
4. Determinar la tasa de falla para cada elemento del RBD
5. Calcular la confiabilidad para cada elemento del RBD
6. Calcular la confiabilidad del sistema  $R_s(t)$
7. Modificar el diseño y comenzar por el punto 1 nuevamente.

- Ejemplos:



**Conclusión:**  
El RBD NO es el  
diagrama en bloques  
funcional del sistema.



# Confiabilidad

## Estimación de la Confiabilidad

### 3. Condiciones de operación

1. Definir la función requerida y sus variables de entorno
2. Confeccionar el diagrama de confiabilidad correspondiente (RBD)
3. Identificar las condiciones de operación de cada bloque del RBD
4. Determinar la tasa de falla para cada elemento del RBD
5. Calcular la confiabilidad para cada elemento del RBD
6. Calcular la confiabilidad del sistema  $Rs(t)$
7. Modificar el diseño y comenzar por el punto 1 nuevamente.

- Las condiciones de operación impactan directamente sobre la confiabilidad de los elementos.
- Está conformada por dos grupos:
  - Condiciones ambientales
  - Cargas y estrés propio del sistema.
- La suposición básica es que los componentes no están estresados más allá de sus límites.
- Factor de estrés:

$$S = \frac{P}{P_N}$$

# Confiabilidad

## Estimación de la Confiabilidad

- Condiciones de operación
  - Parámetros que afectan a la confiabilidad de componentes electrónicos.

1. Definir la función requerida y sus variables de entorno
2. Confeccionar el diagrama de confiabilidad correspondiente (RBD)
3. Identificar las condiciones de operación de cada bloque del RBD
4. Determinar la tasa de falla para cada elemento del RBD
5. Calcular la confiabilidad para cada elemento del RBD
6. Calcular la confiabilidad del sistema  $Rs(t)$
7. Modificar el diseño y comenzar por el punto 1 nuevamente.

Component	Ambient temp. ( $\theta_A$ )	Junction temp. ( $\theta_J$ )	Power stress (S)	Voltage stress (S)	Current stress (S)	Breakdown voltage	Technology	Complexity	Package	Application	Contact construction	Range	Production maturity	Environment ( $\pi_E$ )	Quality ( $\pi_Q$ )
Digital and linear ICs	D			x		x	x	x	x				x	x	x
Hybrid circuits	D	D	D	D	D	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Bipolar transistors	D	D				x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
FETs	D	D				x	x	x	x	x	x		x	x	x
Diodes	D					x	x		x	x	x	x	x	x	x
Thyristors	D					x	x		x		x	x	x	x	x
Optoelectronic components	D		x	x		x	x	x				x	x	x	x
Resistors	D		D			x						x	x	x	x
Capacitors	D			D		x						x	x	x	x
Coils, transformers	D		x	x		x						x	x	x	x
Relays, switches	D		x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Connectors	D			x		x		x	x	x	x	x	x	x	x

D denotes dominant, x denotes important

# Confiabilidad

## Estimación de la Confiabilidad

### 4. Cálculo de la tasa de falla de cada elemento

1. Definir la función requerida y sus variables de entorno
2. Confeccionar el diagrama de confiabilidad correspondiente (RBD)
3. Identificar las condiciones de operación de cada bloque del RBD
4. Determinar la tasa de falla para cada elemento del RBD
5. Calcular la confiabilidad para cada elemento del RBD
6. Calcular la confiabilidad del sistema  $R_s(t)$
7. Modificar el diseño y comenzar por el punto 1 nuevamente.

- Se supone que el componente está trabajando dentro de su vida útil ( $\lambda$  cte.)
$$\lambda(t) = \lambda$$
- Normalmente se utilizan modelos referidos a estándares aceptados mundialmente
  - Bellcore TR-332, CNET RDF 93, IEC 61709, MIL-HDBK-217F
  - Establecen la dependencia de la tasa de fallas frente a las distintas cargas a la cual es sometido el componente.

$$\lambda = \lambda_0 \cdot \pi_T \cdot \pi_E \cdot \pi_Q \cdot \pi_A$$

$\lambda_0$  : Tasa de fallas base.

$\pi_T$  : Factor multiplicador por Temperatura.

$\pi_E$  : Factor multiplicador por Ambiente de trabajo.

$\pi_Q$  : Factor multiplicador asociado a la calidad del componente.

$\pi_A$  : Factor mutiplicador dependiente de la aplicación.

# Confiabilidad

## Estimación de la Confiabilidad

- Cálculo de la tasa de falla de cada elemento (cont.)

1. Definir la función requerida y sus variables de entorno
2. Confeccionar el diagrama de confiabilidad correspondiente (RBD)
3. Identificar las condiciones de operación de cada bloque del RBD
4. Determinar la tasa de falla para cada elemento del RBD
5. Calcular la confiabilidad para cada elemento del RBD
6. Calcular la confiabilidad del sistema  $R_s(t)$
7. Modificar el diseño y comenzar por el punto 1 nuevamente.

$$\lambda = \lambda_0 \cdot \pi_T \cdot \pi_E \cdot \pi_Q \cdot \pi_A$$

Temperature Factor -  $\pi_T$

$T_J$ (°C)	$\pi_T$	$T_J$ (°C)	$\pi_T$
25	1.0	105	4.5
30	1.1	110	4.8
35	1.3	115	5.2
40	1.4	120	5.6
45	1.6	125	5.9
50	1.7	130	6.3
55	1.9	135	6.8
60	2.1	140	7.2
65	2.3	145	7.7
70	2.5	150	8.1
75	2.8	155	8.6
80	3.0	160	9.1
85	3.3	165	9.7
90	3.6	170	10
95	3.9	175	11
100	4.2		

$$\pi_T = \exp\left(-2114 \left(\frac{1}{T_J + 273} - \frac{1}{298}\right)\right)$$

$T_J$  = Junction Temperature (°C)

# Confiabilidad

## Estimación de la Confiabilidad

- Cálculo de la tasa de falla de cada elemento (cont.)

1. Definir la función requerida y sus variables de entorno
2. Confeccionar el diagrama de confiabilidad correspondiente (RBD)
3. Identificar las condiciones de operación de cada bloque del RBD
4. Determinar la tasa de falla para cada elemento del RBD
5. Calcular la confiabilidad para cada elemento del RBD
6. Calcular la confiabilidad del sistema  $R_s(t)$
7. Modificar el diseño y comenzar por el punto 1 nuevamente.

$$\lambda = \lambda_0 \cdot \pi_T \cdot \pi_E \cdot \pi_Q \cdot \pi_A$$

**Table 2.3** Indicative figures for environmental conditions and for the corresponding environmental factor ( $\pi_E$ ) according to MIL-HDBK-217 F and CNET RDF 93

Environment	Stress (indicative values)					$\pi_E$ factor			
	Vibrations	Fog	Dust	RH (%)	Mech. shocks	ICs	DS	R	C
$G_B$ (Ground benign)	2 – 200 Hz $\leq 0.1 g_n$	1	1	40 –70	$\leq 5 g_n / 22$ ms	1*	1	1	1
$G_F$ (Ground fixed)	2 – 200 Hz $1 g_n$	m	m	5 –100	$\leq 20 g_n / 6$ ms	2.5	2.5**	2.5 –3	2.5 –3
$G_M$ (Ground mobile)	2 – 500 Hz $3 g_n$	m	m	5 –100	$30 g_n / 11$ ms to $100 g_n / 6$ ms	5	5**	5.5 –9	5.5 –9
$N_S$ (Nav. sheltered)	2 – 200 Hz $2 g_n$	1	1	5 –100	$10 g_n / 11$ ms to $30 g_n / 6$ ms	4	4**	4 –7	4 –7
$N_U$ (Nav. unsheltered)	2 – 200 Hz $5 g_n$	h	m	10 –100	$10 g_n / 11$ ms to $50 g_n / 2.3$ ms	6	6**	7 –12	7 –12

C = capacitors, DS = discrete semiconductors, RH = relative humidity, R = resistors, h = high,  
m = medium, l = low,  $g_n = 10 \text{ m/s}^2$ , \* 0.5 in MIL HDBK-217 F

# Confiabilidad

## Estimación de la Confiabilidad

- Cálculo de la tasa de falla de cada elemento (cont.)

1. Definir la función requerida y sus variables de entorno
2. Confeccionar el diagrama de confiabilidad correspondiente (RBD)
3. Identificar las condiciones de operación de cada bloque del RBD
4. Determinar la tasa de falla para cada elemento del RBD
5. Calcular la confiabilidad para cada elemento del RBD
6. Calcular la confiabilidad del sistema  $R_s(t)$
7. Modificar el diseño y comenzar por el punto 1 nuevamente.

$$\lambda = \lambda_0 \cdot \pi_T \cdot \pi_E \cdot \pi_Q \cdot \pi_A$$

	Qualification ( $\pi_{Q1}$ )			Evaluation ( $\pi_{Q2}$ )	
	Reinforced	CECC*	no special	with	without
Monolithic ICs	0.7	1.0	1.3	1.0	1.3
Hybrid ICs	0.2	1.0	1.5	1.0	1.5
Discrete Semiconductors	0.2	1.0	2.0	1.0	2.0
Resistors	0.1	1.0	2.0	1.0	2.0
Capacitors	0.1	1.0	2.0	1.0	2.0

\* correspond approximately to MIL-HDBK-217 F classes B-1, JANTX, M

# Confiabilidad

## Estimación de la Confiabilidad

- Cálculo de la tasa de falla de cada elemento (cont.)

1. Definir la función requerida y sus variables de entorno
2. Confeccionar el diagrama de confiabilidad correspondiente (RBD)
3. Identificar las condiciones de operación de cada bloque del RBD
4. Determinar la tasa de falla para cada elemento del RBD
5. Calcular la confiabilidad para cada elemento del RBD
6. Calcular la confiabilidad del sistema  $R_s(t)$
7. Modificar el diseño y comenzar por el punto 1 nuevamente.

$$\lambda = \lambda_0 \cdot \pi_T \cdot \pi_E \cdot \pi_Q \cdot \pi_A$$

Application Factor - $\pi_A$	
Application	$\pi_A$
Linear Amplification	1.5
Switching	.70

# Confiabilidad

## Estimación de la Confiabilidad

- Cálculo de la tasa de falla de cada elemento (cont.)
  - Ejemplo MIL-HDBK-217F

1. Definir la función requerida y sus variables de entorno
2. Confeccionar el diagrama de confiabilidad correspondiente (RBD)
3. Identificar las condiciones de operación de cada bloque del RBD
4. Determinar la tasa de falla para cada elemento del RBD
5. Calcular la confiabilidad para cada elemento del RBD
6. Calcular la confiabilidad del sistema  $R_s(t)$
7. Modificar el diseño y comenzar por el punto 1 nuevamente.

6.3 TRANSISTORS, LOW FREQUENCY, BIPOLAR					
SPECIFICATION MIL-S-19500		DESCRIPTION NPN (Frequency < 200 MHz) PNP (Frequency < 200 MHz)			
$\lambda_p = \lambda_b \pi_T \pi_A \pi_R \pi_S \pi_Q \pi_E$ Failures/10 <sup>6</sup> Hours					
Base Failure Rate - $\lambda_b$					
Type	$\lambda_b$	Application Factor - $\pi_A$			
NPN and PNP	.00074	Application	$\pi_A$		
		Linear Amplification	1.5		
		Switching	.70		
Temperature Factor - $\pi_T$					
T <sub>J</sub> (°C)	$\pi_T$	T <sub>J</sub> (°C)	$\pi_T$		
25	1.0	105	4.5		
30	1.1	110	4.8		
35	1.3	115	5.2		
40	1.4	120	5.6		
45	1.6	125	5.9		
50	1.7	130	6.3		
55	1.9	135	6.8		
60	2.1	140	7.2		
65	2.3	145	7.7		
70	2.5	150	8.1		
75	2.8	155	8.6		
80	3.0	160	9.1		
85	3.3	165	9.7		
90	3.6	170	10		
95	3.9	175	11		
100	4.2				
$\pi_T = \exp \left( -2114 \left( \frac{1}{T_J + 273} - \frac{1}{298} \right) \right)$					
T <sub>J</sub> = Junction Temperature (°C)					
Power Rating Factor - $\pi_R$					
Rated Power (P <sub>r</sub> , Watts)	$\pi_R$				
P <sub>r</sub> ≤ .1	.43				
P <sub>r</sub> = .5	.77				
P <sub>r</sub> = 1.0	1.0				
P <sub>r</sub> = 5.0	1.8				
P <sub>r</sub> = 10.0	2.3				
P <sub>r</sub> = 50.0	4.3				
P <sub>r</sub> = 100.0	5.5				
P <sub>r</sub> = 500.0	10				
$\pi_R = .43$		Rated Power ≤ .1W			
$\pi_R = (P_r)^{.37}$		Rated Power > .1W			

# Confiabilidad

## Estimación de la Confiabilidad

- Cálculo de la tasa de falla de cada elemento (cont.)
  - Ejemplos comparativa normas:

1. Definir la función requerida y sus variables de entorno
2. Confeccionar el diagrama de confiabilidad correspondiente (RBD)
3. Identificar las condiciones de operación de cada bloque del RBD
4. Determinar la tasa de falla para cada elemento del RBD
5. Calcular la confiabilidad para cada elemento del RBD
6. Calcular la confiabilidad del sistema  $R_s(t)$
7. Modificar el diseño y comenzar por el punto 1 nuevamente.

	MIL-HDBK-217 F	RDF 93	SN 29500	$\lambda_{ref}^*$
4M DRAM	37	61	34	30
1M SRAM	103	88	56	50
1M EPROM	32	54	101	30
80486 µP	509**	150	48	100
LM741 op amp	24	23	9	10
Dig. CMOS, 30,000gates, 40 pins (ASIC)	144**	34	59	20
100 mA GP diode	2	2	2	2
LED	1.5	2	2	2
1W bip. transistor	0.5	3	3.5	2
1W MOSFET	27	4	27	2
1nF ceramic capacitor ( $125^\circ\text{C}$ , class 2)	1.5	2	2	1
1µF foil capacitor	3	2	1	1
100 µF Ta solid capacitor ( $125^\circ\text{C}$ , $\leq 0.4\Omega/\text{V}$ )	2	13	2	5
100 µF Al wet capacitor ( $125^\circ\text{C}$ )	18	10	4	10
100 kΩ metal film resistor	0.5	0.3	0.1	0.2
50 kΩ cermet potentiometer	41	16	40	10

\*  $\lambda_{ref}$  is the failure rate assumed here as a possible reference for computations according to IEC 61709 [2.24]

\*\* obviously too high

# Confiabilidad

## Estimación de la Confiabilidad

### 5. Cálculo de la confiabilidad de cada elemento.

1. Definir la función requerida y sus variables de entorno
2. Confeccionar el diagrama de confiabilidad correspondiente (RBD)
3. Identificar las condiciones de operación de cada bloque del RBD
4. Determinar la tasa de falla para cada elemento del RBD
5. Calcular la confiabilidad para cada elemento del RBD
6. Calcular la confiabilidad del sistema  $Rs(t)$
7. Modificar el diseño y comenzar por el punto 1 nuevamente.

- Sabiendo que:

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(x)dx}$$

$$\lambda(t) = -\frac{1}{R(t)} \frac{dR(t)}{dt}$$

- El tiempo medio entre fallas para un elemento queda determinado por:

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

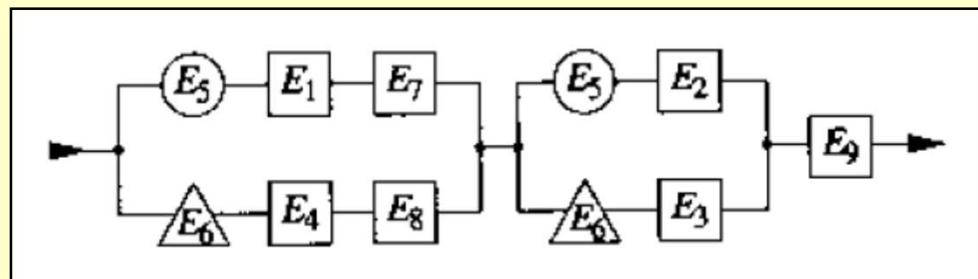
# Confiabilidad

## Estimación de la Confiabilidad

### 6. Cálculo de la confiabilidad del sistema.

1. Definir la función requerida y sus variables de entorno
2. Confeccionar el diagrama de confiabilidad correspondiente (RBD)
3. Identificar las condiciones de operación de cada bloque del RBD
4. Determinar la tasa de falla para cada elemento del RBD
5. Calcular la confiabilidad para cada elemento del RBD
6. Calcular la confiabilidad del sistema  $R_s(t)$
7. Modificar el diseño y comenzar por el punto 1 nuevamente.

- Rara vez el sistema está compuesto por un solo elemento
- Es necesario establecer un modelo de cálculo para estimar la confiabilidad de diversos elementos interconectados de acuerdo al RBD.



- Los modelos básicos a estudiar son:
  - Elementos en serie
  - Elementos en paralelo
    - Redundancia activa
    - Redundancia pasiva

# Confiabilidad

## Estimación de la Confiabilidad

- Elementos en serie.

1. Definir la función requerida y sus variables de entorno
2. Confeccionar el diagrama de confiabilidad correspondiente (RBD)
3. Identificar las condiciones de operación de cada bloque del RBD
4. Determinar la tasa de falla para cada elemento del RBD
5. Calcular la confiabilidad para cada elemento del RBD
6. Calcular la confiabilidad del sistema  $R_s(t)$
7. Modificar el diseño y comenzar por el punto 1 nuevamente.

**Conclusión:** Todas los elementos deben funcionar correctamente La tasa de fallas de un sistema sin redundancia conformado por elementos independientes es igual a la suma de la tasa de falla de sus componentes

- Supongamos el evento:

$e_i$ = el elemento  $E_i$  trabaja sin fallas en el intervalo  $(0,t]$

- Confiabilidad asociada a este elemento será:

$$\Pr\{e_i\} = \Pr\{\tau_i > t\} = R_i(t)$$

- Por lo que la confiabilidad del sistema será:

$$R_s(t) = \Pr\{e_1 \cap \dots \cap e_n\}$$

- Por lo que:

$$R_s(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) \quad \lambda_s(t) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(t) \quad \frac{1}{\lambda_s} = MTBF_s$$

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(x) dx}$$

# Confiabilidad

## Estimación de la Confiabilidad

1. Definir la función requerida y sus variables de entorno
2. Confeccionar el diagrama de confiabilidad correspondiente (RBD)
3. Identificar las condiciones de operación de cada bloque del RBD
4. Determinar la tasa de falla para cada elemento del RBD
5. Calcular la confiabilidad para cada elemento del RBD
6. Calcular la confiabilidad del sistema  $R_s(t)$
7. Modificar el diseño y comenzar por el punto 1 nuevamente.

### ■ Elementos en Paralelo.

- Mismas hipótesis que para el caso anterior.
- La función requerida es llevada a cabo si al menos uno de los elementos funciona correctamente.
- Supongamos el evento en un sistema de dos:  
$$R_s(t) = \Pr\{e_1 \cup e_2\} = \Pr\{e_1\} + \Pr\{e_2\} - \Pr\{e_1 \cap e_2\}$$
$$R_s(t) = \Pr\{e_1\} + \Pr\{e_2\} - \Pr\{e_1\} \cdot \Pr\{e_2\} = R_1(t) + R_2(t) - R_1(t) \cdot R_2(t)$$
- Para el caso particular donde:

$$R_1 = R_2 = e^{-\lambda t} \quad \rightarrow \quad R_s = 2 e^{-\lambda t} - e^{-2\lambda t}$$

$$MTTF_S = \frac{2}{\lambda} - \frac{1}{2\lambda} = \frac{3}{2\lambda}$$

- Generalizando:

- Para un sistema k-de-n

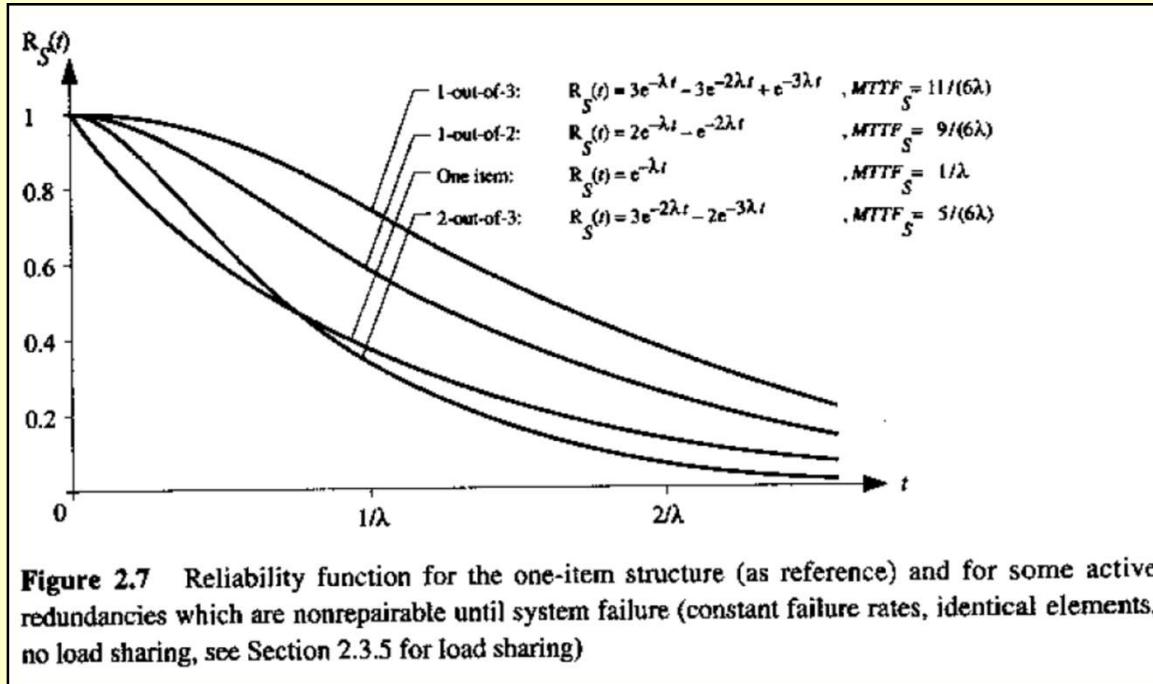
$$R_s(t) = \sum_{i=k}^n \binom{n}{i} R^i(t) (1 - R(t))^{n-i}$$

# Confiabilidad

## Estimación de la Confiabilidad

- Elementos en Paralelo (cont.).

1. Definir la función requerida y sus variables de entorno
2. Confeccionar el diagrama de confiabilidad correspondiente (RBD)
3. Identificar las condiciones de operación de cada bloque del RBD
4. Determinar la tasa de falla para cada elemento del RBD
5. Calcular la confiabilidad para cada elemento del RBD
6. Calcular la confiabilidad del sistema  $R_s(t)$
7. Modificar el diseño y comenzar por el punto 1 nuevamente.



**Figure 2.7** Reliability function for the one-item structure (as reference) and for some active redundancies which are nonrepairable until system failure (constant failure rates, identical elements, no load sharing, see Section 2.3.5 for load sharing)

### Conclusión:

**El incremento de la confiabilidad empleando redundancia es muy importante cuando la vida esperada del sistema es mucho menor que  $1/\lambda$**

# Confiabilidad

## Estimación de la Confiabilidad

- Estructuras comunes:

- Definir la función requerida y sus variables de entorno
- Confeccionar el diagrama de confiabilidad correspondiente (RBD)
- Identificar las condiciones de operación de cada bloque del RBD
- Determinar la tasa de falla para cada elemento del RBD
- Calcular la confiabilidad para cada elemento del RBD
- Calcular la confiabilidad del sistema  $R_S(t)$**
- Modificar el diseño y comenzar por el punto 1 nuevamente.

Reliability Block Diagram	Reliability Function ( $R_S = R_S(t)$ , $R_i = R_i(t)$ )	Remarks
1	$R_S = R_i$	One-item structure, for $\lambda(t) = \lambda \Rightarrow R_i(t) = e^{-\lambda_i t}$
2	$R_S = \prod_{i=1}^n R_i$	Series structure $\lambda_S(t) = \lambda_1(t) + \dots + \lambda_n(t)$
3	$R_S = R_1 + R_2 - R_1 R_2$	1-out-of-2 redundancy, $R_1(t) = R_2(t) = e^{-\lambda t} \Rightarrow R_S(t) = 2e^{-\lambda t} - e^{-2\lambda t}$
4	$R_1 = \dots = R_n = R$ $R_S = \sum_{i=k}^n \binom{n}{i} R^i (1-R)^{n-i}$	k-out-of-n redundancy, for $k=1 \Rightarrow R_S = 1 - (1-R)^n$
5	$R_S = (R_1 R_2 R_3 + R_4 R_5 - R_1 R_2 R_3 R_4 R_5) R_6 R_7$	Series/parallel structure

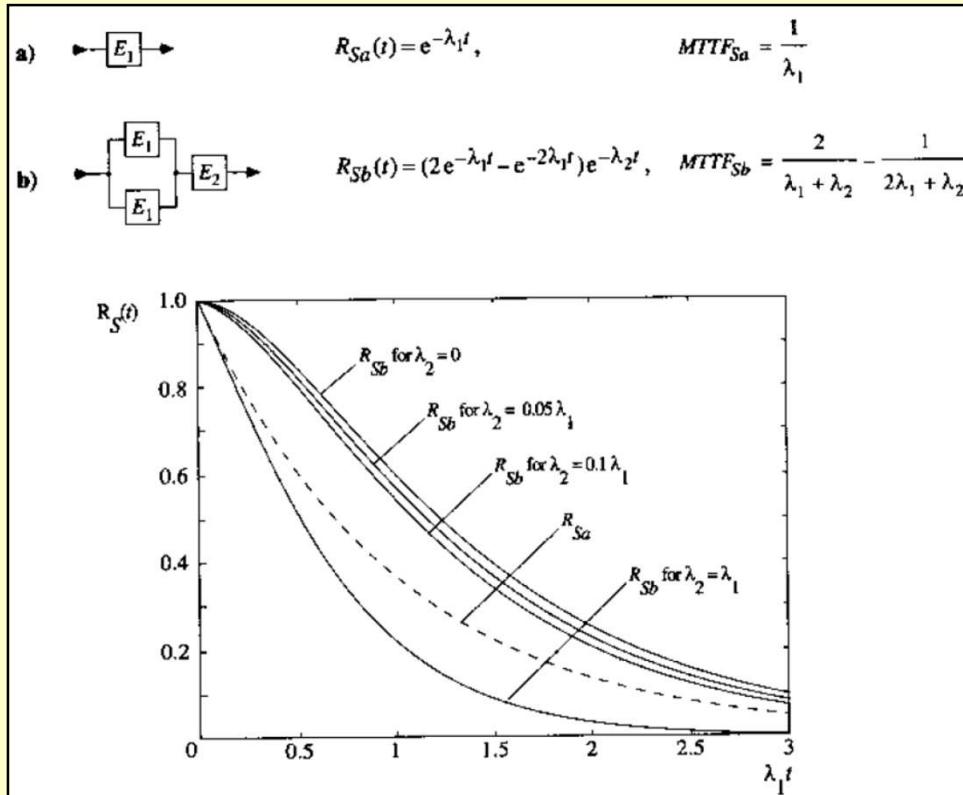
# Confiabilidad

## Estimación de la Confiabilidad

- Redundancia Activa:

1. Definir la función requerida y sus variables de entorno
2. Confeccionar el diagrama de confiabilidad correspondiente (RBD)
3. Identificar las condiciones de operación de cada bloque del RBD
4. Determinar la tasa de falla para cada elemento del RBD
5. Calcular la confiabilidad para cada elemento del RBD
6. Calcular la confiabilidad del sistema  $R_s(t)$
7. Modificar el diseño y comenzar por el punto 1 nuevamente.

**Conclusión:** El uso de redundancia activa generalmente implica el agregado de un elemento serie encargado de realizar la comutación entre dos o más módulos de backup. La confiabilidad de elemento serie es de suma importancia y afecta directamente al sistema. La tasa de fallas del elemento comutador en un sistema con redundancia activa, no debe ser más que el 10% de la tasa de fallas de los elementos redundantes.



# Confiabilidad

## Estimación de la Confiabilidad

### 7. Modificar el diseño:

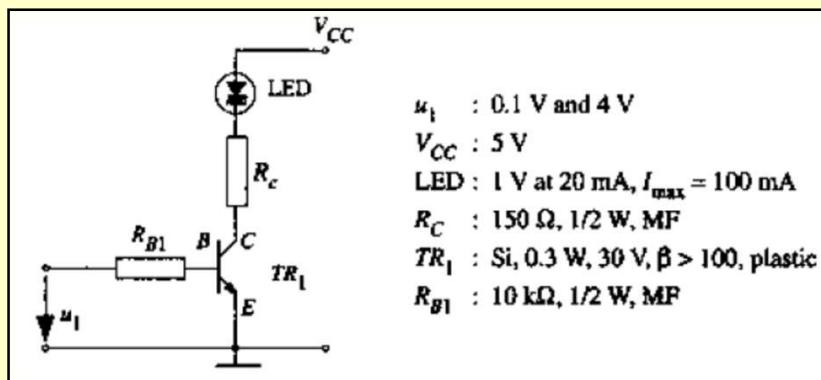
1. Definir la función requerida y sus variables de entorno
2. Confeccionar el diagrama de confiabilidad correspondiente (RBD)
3. Identificar las condiciones de operación de cada bloque del RBD
4. Determinar la tasa de falla para cada elemento del RBD
5. Calcular la confiabilidad para cada elemento del RBD
6. Calcular la confiabilidad del sistema  $Rs(t)$
7. Modificar el diseño y comenzar por el punto 1 nuevamente.

- Si las metas de confiabilidad no son alcanzadas, se deben identificar las debilidades.
- Se deben plantear alternativas de diseño para minimizar dicha debilidades
- Se debe elegir las más apropiada
- Se tiene que realizar todo el proceso de estimación de confiabilidad nuevamente.

# Confiabilidad

## Estimación de la Confiabilidad

- Ejemplo:
  - Calcular la confiabilidad estimada del circuito mostrado a continuación.

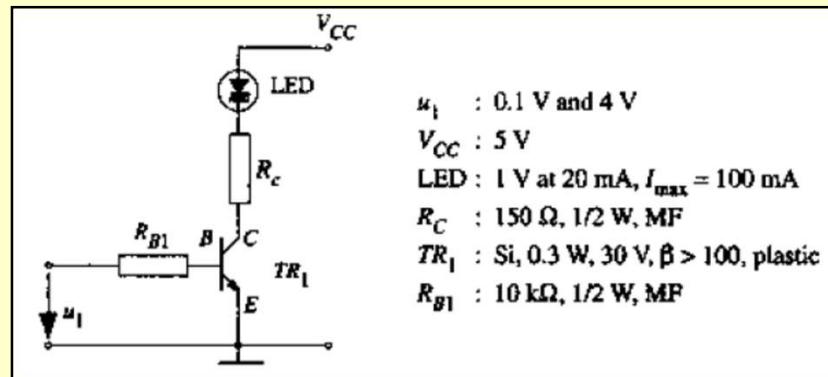


- Datos adicionales:
  - Función Requerida: El LED debe encender cuando  $u_1$  está en alto.
  - Condiciones ambientales:
    - $T_a = 50^\circ\text{C}$  dentro del equipo.  $T_a = 30^\circ\text{C}$  en la posición del LED
    - Tipo de ambiente: GB (MIL-HDBK-217)
  - Nivel de calidad de componentes CECC.

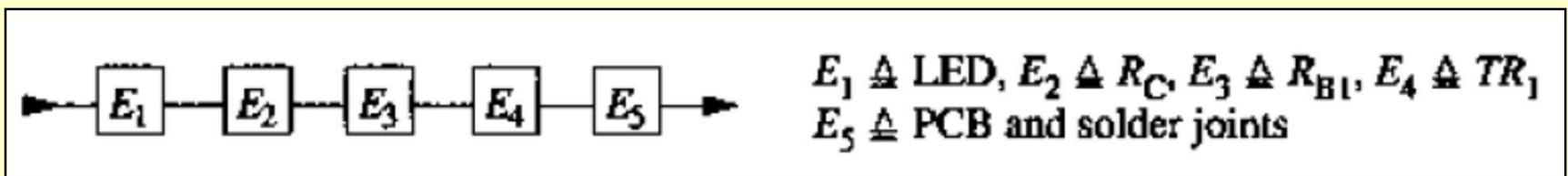
# Confiabilidad

## Estimación de la Confiabilidad

- Ejemplo (cont.):



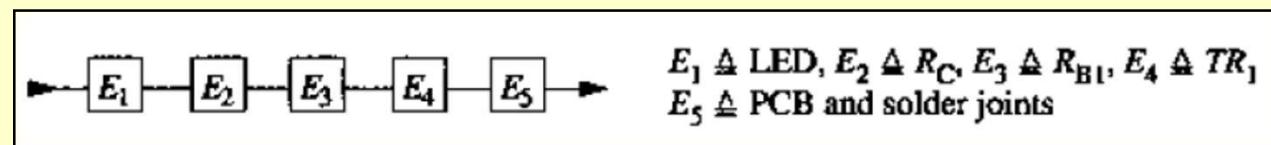
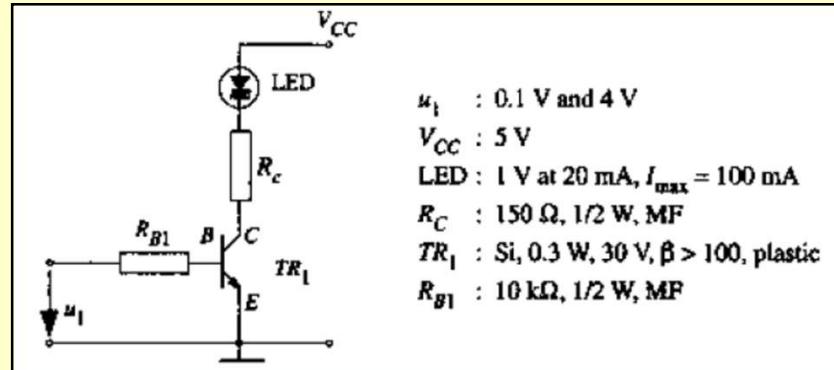
- RBD



# Confiabilidad

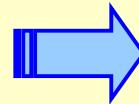
## Estimación de la Confiabilidad

- Ejemplo (cont.):



- Suponiendo válido que:

<b>LED</b>	: $\lambda_1 = 1.3 \cdot 10^{-9} h^{-1}$
<b>Transistor</b>	: $\lambda_4 = 3 \cdot 10^{-9} h^{-1}$
<b>Resistor</b>	: $\lambda_2 = \lambda_3 = 0.3 \cdot 10^{-9} h^{-1}$ , $\lambda_5 = 1 \cdot 10^{-9} h^{-1}$



$$\lambda_S = \sum \lambda_i = 5.9 \cdot 10^{-9} h^{-1}$$

$$R_S(t) = e^{-\lambda_S t}$$

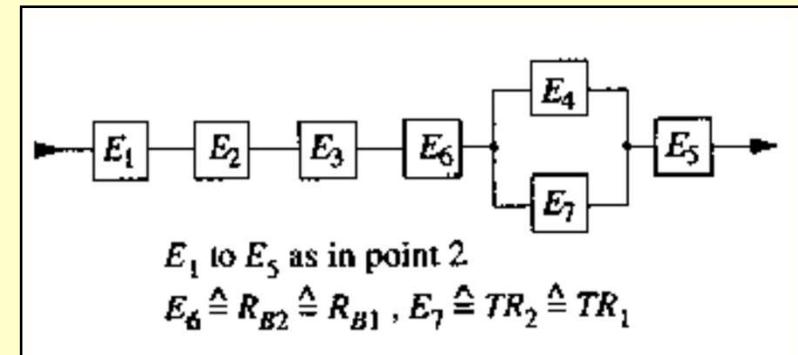
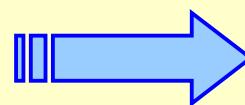
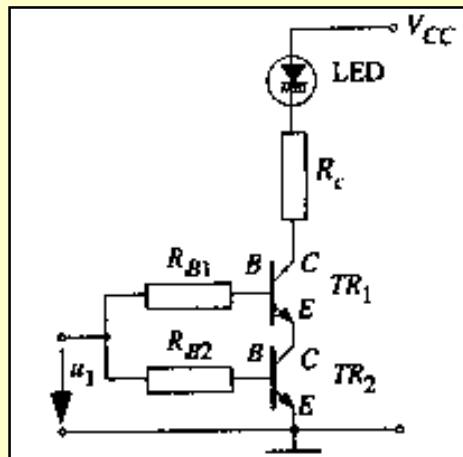
$$R_S(10 \text{ years}) > 0.999$$

# Confiabilidad

## Estimación de la Confiabilidad

- Ejemplo (cont.):
  - Que sucede si la confiabilidad calculada no es aceptable?
  - Cuál es el elemento menos confiable?
  - Que alternativa existe para mejorar la confiabilidad?

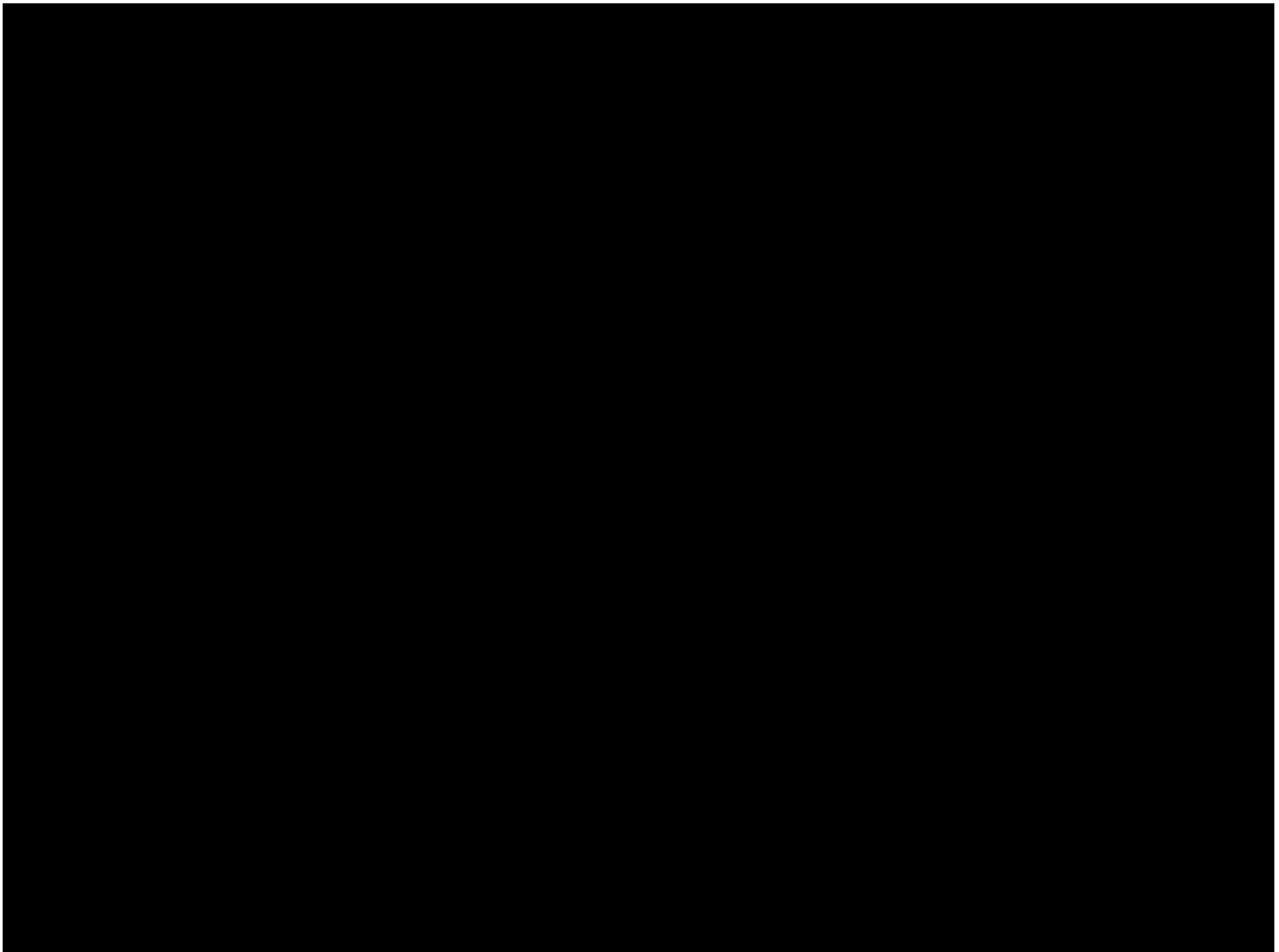
LED	: $\lambda_1 \approx 1.3 \cdot 10^{-9} \text{ h}^{-1}$
Transistor	: $\lambda_4 \approx 3 \cdot 10^{-9} \text{ h}^{-1}$
Resistor	: $\lambda_2 = \lambda_3 \approx 0.3 \cdot 10^{-9} \text{ h}^{-1}$ $\lambda_5 = 1 \cdot 10^{-9} \text{ h}^{-1}$



- La confiabilidad resultante es:
- Puede ser aproximada a:
- Qué sucedería si el modo de falla del transistor fuera la abertura entre colector y emisor? Es válido el análisis realizado?

$$R_S(t) = e^{-3.2 \cdot 10^{-9} t} (2e^{-3 \cdot 10^{-9} t} - e^{-6 \cdot 10^{-9} t}),$$

$$R_S(t) \approx e^{-3.2 \cdot 10^{-9} t} \quad \text{for } t \leq 10^6 \text{ h.}$$



# Confiabilidad del Software

*Diseño de Equipos Electrónicos*

*ITBA*

# Confiabilidad del software

## Antecedentes

- La confiabilidad del Hardware fue introducida como una disciplina durante la Segunda Guerra Mundial para evaluar la probabilidad de éxito de los cohetes balísticos.
- Ya en la década del 60, la ingeniería de confiabilidad había evolucionado como una parte integral del desarrollo de productos tanto comerciales como en aplicaciones profesionales.
- La disciplina de la fiabilidad del software es mucho más joven. Se inició a mediados de los '70.
- A fines de los '80 surgieron nuevas tecnologías, conceptos y paradigmas.
- Los mismos continúan en este siglo y obligan a repasar algunas metodologías.

# Confiabilidad del software

- La confiabilidad del software se define como la probabilidad de que el software no causará ninguna falla en el sistema, en un intervalo de tiempo, bajo condiciones especificadas.
- Esta probabilidad es función de las entradas en uso del sistema, como así también de las fallas latentes del software.
- Las entradas al sistema pueden ser finalmente determinantes en que alguna falla latente sea encontrada durante la operación del sistema.

# Confiabilidad del software

Diferencias en el tratamiento de la confiabilidad en soft:

- La edad del software no tiene relación con la tasa de fallas.
- La frecuencia de uso del soft no influye en su confiabilidad.
- El software se convierte en obsoleto cuando una interface estándar evoluciona y el hardware se convierte en anticuado.
- A diferencia del hardware, el soft no puede ser tocado ni retenido.
- El software debe ser ajustado con el hardware antes de poder ser probado.
- El software además de las fallas totales, tiene variados grados de éxito acorde con su complejidad y aplicación.
- Aunque no es ejecutable, la documentación es considerada como parte integral del software.

# Confiabilidad del software

Aspectos similares de la fiabilidad de hard y soft:

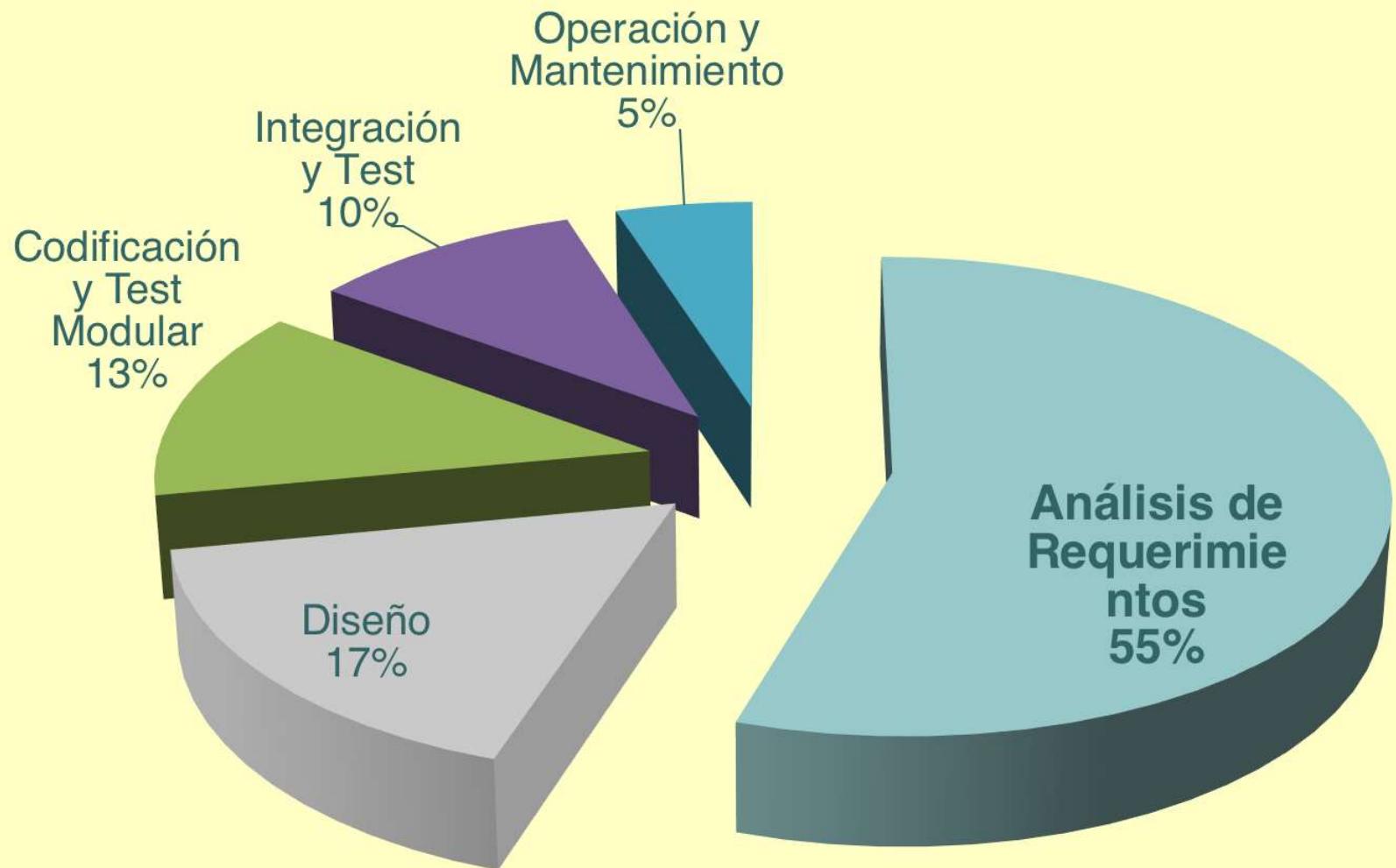
- La confiabilidad del hardware es una función de la complejidad del equipo. Intuitivamente uno podrá esperar que para el software suceda lo mismo.
- Los elementos electrónicos de estado sólido, no presentan mecanismos de desgaste observables durante un largo periodo de tiempo. Los defectos que causan fallas, son incorporados durante la fabricación del elemento. Lo mismo sucede para el software.
- La confiabilidad del hardware puede mejorarse mediante ensayos. Esto es similar a encontrar y eliminar bugs en un soft incrementando su fiabilidad.

# Confiabilidad del software

## **Tipos de fallas en el software**

- Defectos en los requerimientos.
- Defectos en el diseño.
- Defectos en el código.
- Defectos en el algoritmo.
- Defectos en las interfaces.
- Defectos en la documentación.
- Defectos en el rendimiento.

# Proporción de errores de un software durante su desarrollo

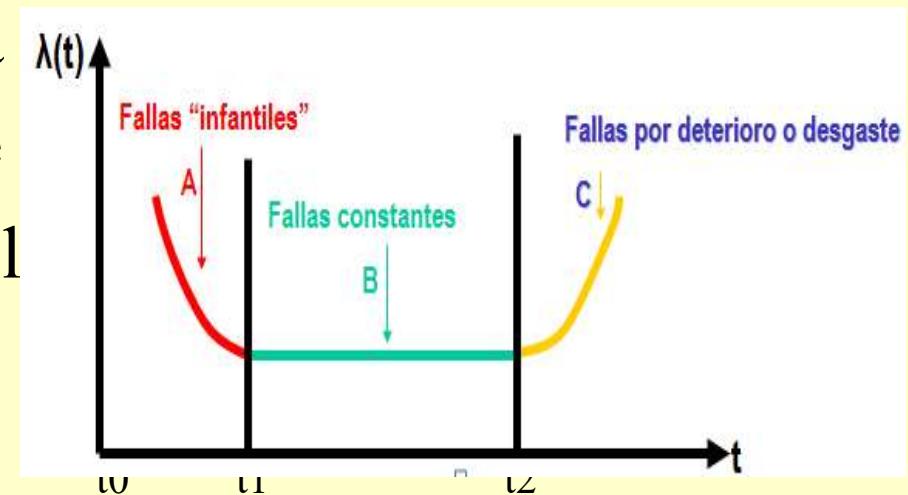


# Confiabilidad del software

## Consideraciones en el ciclo de vida

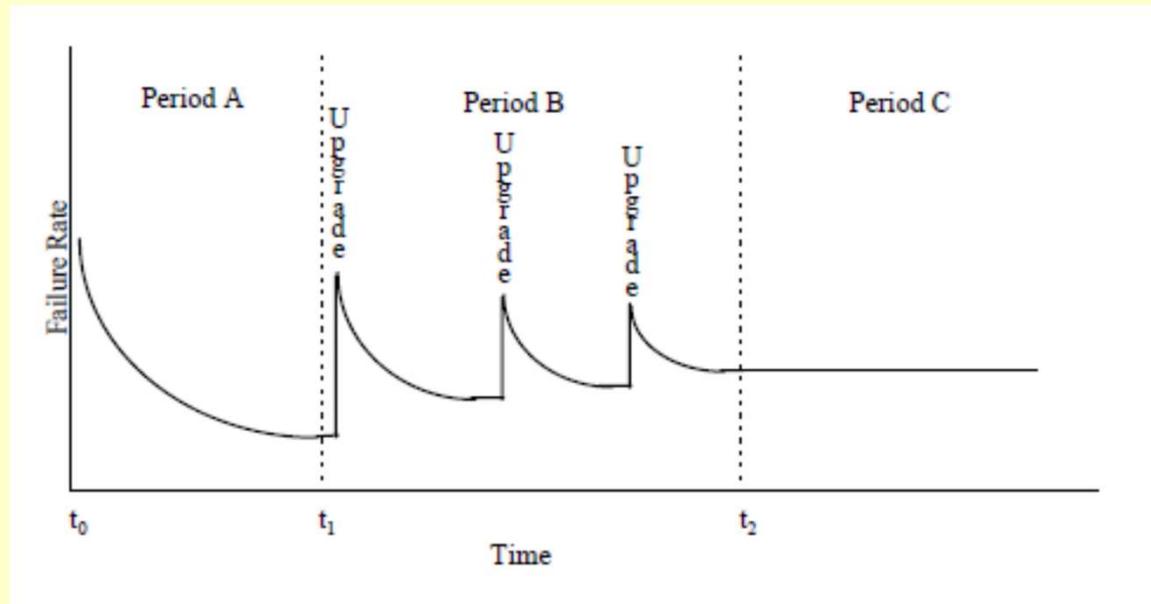
Hardware: Curva de la bañera

Esta curva no es aplicable de manera directa en el caso del software, el soft no sufre desgaste.



Sin embargo si el ciclo de vida del hardware es considerado como el ciclo del desarrollo del soft hasta el lanzamiento y comercialización, la curva puede ser análoga hasta  $t_2$ .

# Confiabilidad del software



- $t_0$  instante en el que se inicia el test. El período A desde  $t_0$  a  $t_1$  es considerado la fase de “debug”.
- $t_1$  momento en que se inicia la distribución.
- $t_2$  es el momento en el cual se alcanza el final de la vida usable.

# Confiabilidad del software

- $t_0$  instante en el que se inicia el test.

El período A desde  $t_0$  a  $t_1$  es considerado la fase de “debug”. Los errores de codificación (mejor dicho los errores hallados y corregidos) o de operación que no están acorde con las especificaciones son identificados y corregidos. Esta es una diferencia clave entre el hard y el soft. El “clock” es distinto.

*Los tiempos de desarrollo/test NO se incluyen en los cálculos de confiabilidad del hard y SI se incluyen para el soft.*

# Confiabilidad del software

- $t_1$  momento en que se inicia la distribución.  
Las fallas que ocurren durante el período B ( $t_1$  a  $t_2$ ), son encontradas o bien por usuarios o por test posteriores a la distribución. Para estos errores, subsecuentemente se efectúan nuevas versiones (no necesariamente en correspondencia con cada error reportado).

## Confiabilidad del software

- $t_2$  es el momento en el cual se alcanza el final de la vida usable.

Muchos errores reportados durante el período C, luego de  $t_2$  muestran la incapacidad del soft para reunir los cambios necesarios para satisfacer las necesidades del cliente. En este marco de referencia, el soft está todavía funcionando cumpliendo las especificaciones originales y no es considerado como que está fallado, pero la especificación ya no se considera adecuada para satisfacer las necesidades actuales. El software ha alcanzado el fin de su vida útil. Los reportes de falla del período C pueden ser las bases para la generación de los requerimientos de un nuevo sistema.

# Confiabilidad del software

COMPARACION ENTRE MODELOS DE PREDICCION Y ESTIMACION		
	PREDICCIÓN	ESTIMACION
DATOS UTILIZADOS	Datos históricos	Datos provenientes del actual desarrollo de soft.
CUANDO SE USA?	Etapas previas del desarrollo, antes de los test. Incluso en fase conceptual.	Avanzado en el ciclo de vida cuando ya se obtuvieron datos. No en fase conceptual.
QUE DA?	Predice fiabilidad en algún momento futuro.	Estima la fiabilidad tanto presente como futura.

# Confiabilidad del software

## Modelos de Predicción

- **Modelo de MUSA o del Tiempo de Ejecución**

Desarrollado por John Musa de los laboratorios Bell en los '70, fue uno de los primeros modelos de predicción de la confiabilidad del software. Predice la intensidad inicial de las fallas. Estas fallas por unidad de tiempo inicial, es una función de las no conocidas pero estimadas fallas esperadas, N en un tiempo infinito.

La ecuación para efectuar la predicción es:

$$\lambda_0 = k \cdot p \cdot w_0$$

Todos los tiempos utilizados son de ejecución.

# Confiabilidad del software

**Modelo de MUSA**  $\lambda_0 = k \cdot p \cdot w_0$

- $k$  = es una constante cuantizada para la estructura dinámica del programa y de las máquinas.  $4,2 \times 10^{-7}$  valor adoptado si no se conoce expresamente.
- $p$ = estima el número de ejecuciones por unidad de tiempo.  
 $= r/SLOC/ER$
- $r$ = promedio de la velocidad de ejecución de instrucciones,  
SLOC= líneas de código fuente.
- ER Assembler:1 Macroassembler: 1,5 C: 2,5  
COBOL, FORTRAN: 3 ADA: 4,5
- $w_0$  = Estimación del número inicial de fallas en el programa.  
Puede ser calculado utilizando  $w_0 = N \cdot B$   
Por default se puede asumir 6 fallas/ 1000 SLOC.
  - $N$ = número total de defectos inherentes.
  - $B$ = Proporción de defectos que se convierten en fallas. Se puede asumir 95%.

# Confiabilidad del software

## **Modelos de estimación**

Los modelos por conteo de fallas y para tasa de fallas son las técnicas más comunes para estimación.

Los modelos de conteo de fallas incluyen técnicas basadas en distribuciones exponenciales, Weibull y también en el teorema de Bayes.

# Confiabilidad del software

## Modelos de estimación

- **Modelos con distribución exponencial**

En general los modelos exponenciales asumen que el soft se halla en estado operacional y que todas las fallas que se presentan son independientes entre sí. Partimos de lo siguiente:

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

Con una forma general para la confiabilidad:

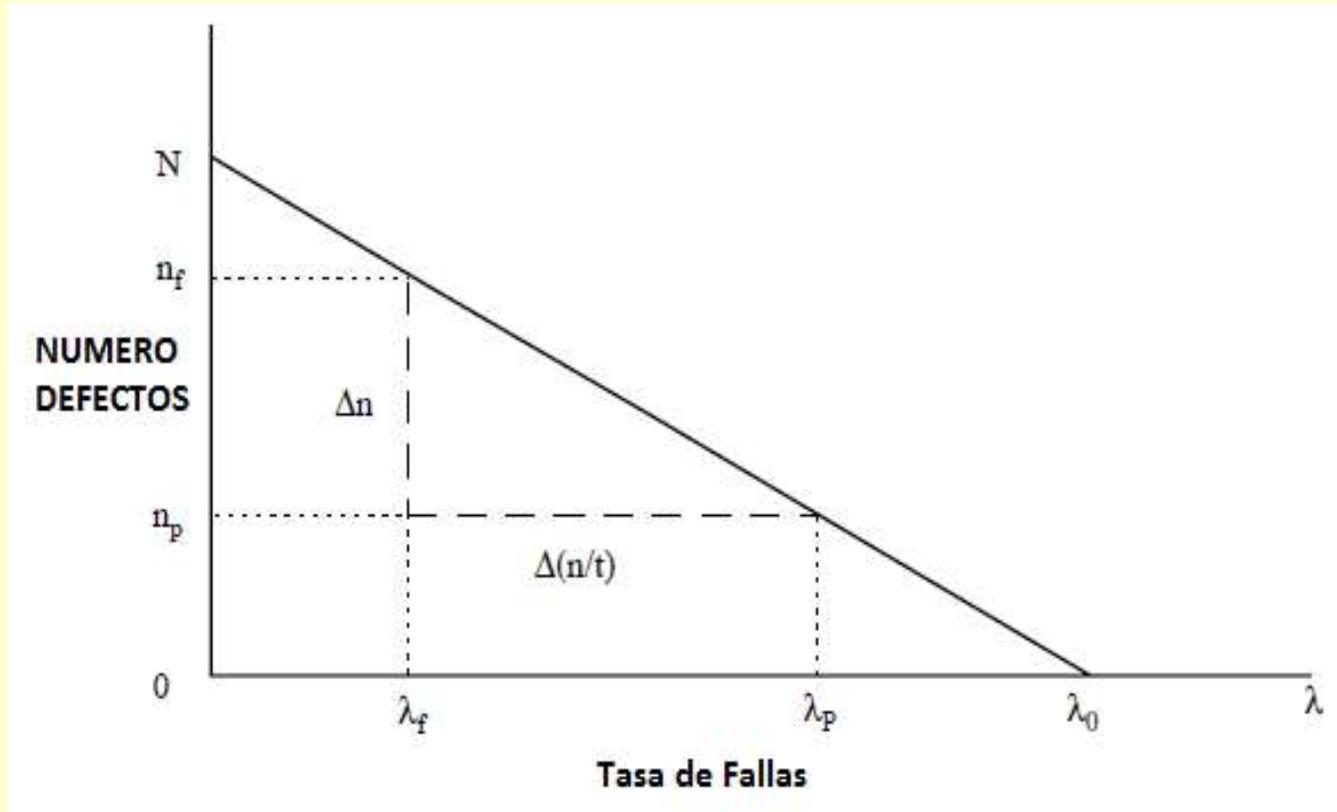
$$R(t) = e^{-\lambda t}$$

Y el tiempo medio hasta la siguiente falla:

$$MTTF = 1/\lambda$$

# Confiabilidad del software

## Modelos con distribución exponencial



La mayor desventaja que presenta es que no puede ser utilizado de manera temprana en el desarrollo del soft ya que requiere que el mismo se halle operativo, por lo tanto no sirve para tener una aproximación inicial del la fiabilidad del software que se está desarrollando.

# Confiabilidad del software

## **Modelos con distribución exponencial**

### **Modelo exponencial general**

Asume que todos los errores son iguales en severidad y probabilidad de detección y que c/u es corregido de manera inmediata una vez detectado.

La tasa de fallas  $\lambda$  está directamente relacionada con el número de fallas remantes en el soft. Esto es  $\lambda$  es una función del número de errores corregidos  $c$ :

$$\lambda = \mathbf{k} (N - c)$$

$\mathbf{k}$  es una constante de proporcionalidad que puede estimarse a partir de la pendiente del ploteo de la tasa de fallas observada vs. Número de fallas corregidas.

# Confiabilidad del software

## **Modelos con distribución exponencial**

### **Modelo exponencial general**

La proyección del número de fallas que se necesitan detectar para alcanzar la tasa de fallas final  $\lambda_f$  está dada por:

$$\Delta n = (1/k) \cdot \lambda_p / \lambda_f$$

La proyección del tiempo necesario para alcanzar el  $\lambda_f$  está dada por:

$$\Delta t = (1/k) \cdot \ln(\lambda_p / \lambda_f)$$

La mayor desventaja de esta aproximación es que los defectos no solo deben ser detectados, sino también corregidos.

# Confiabilidad del software

## **Modelos con distribución exponencial**

### **Modelo de Shooman**

Similar al modelo exponencial general excepto que cada falla está normalizada por el número de líneas de código.

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

Con una tasa de fallas proporcional a la tasa residual de errores.

$$\varepsilon_r(\zeta) = \varepsilon_T - \varepsilon_c(\zeta)$$

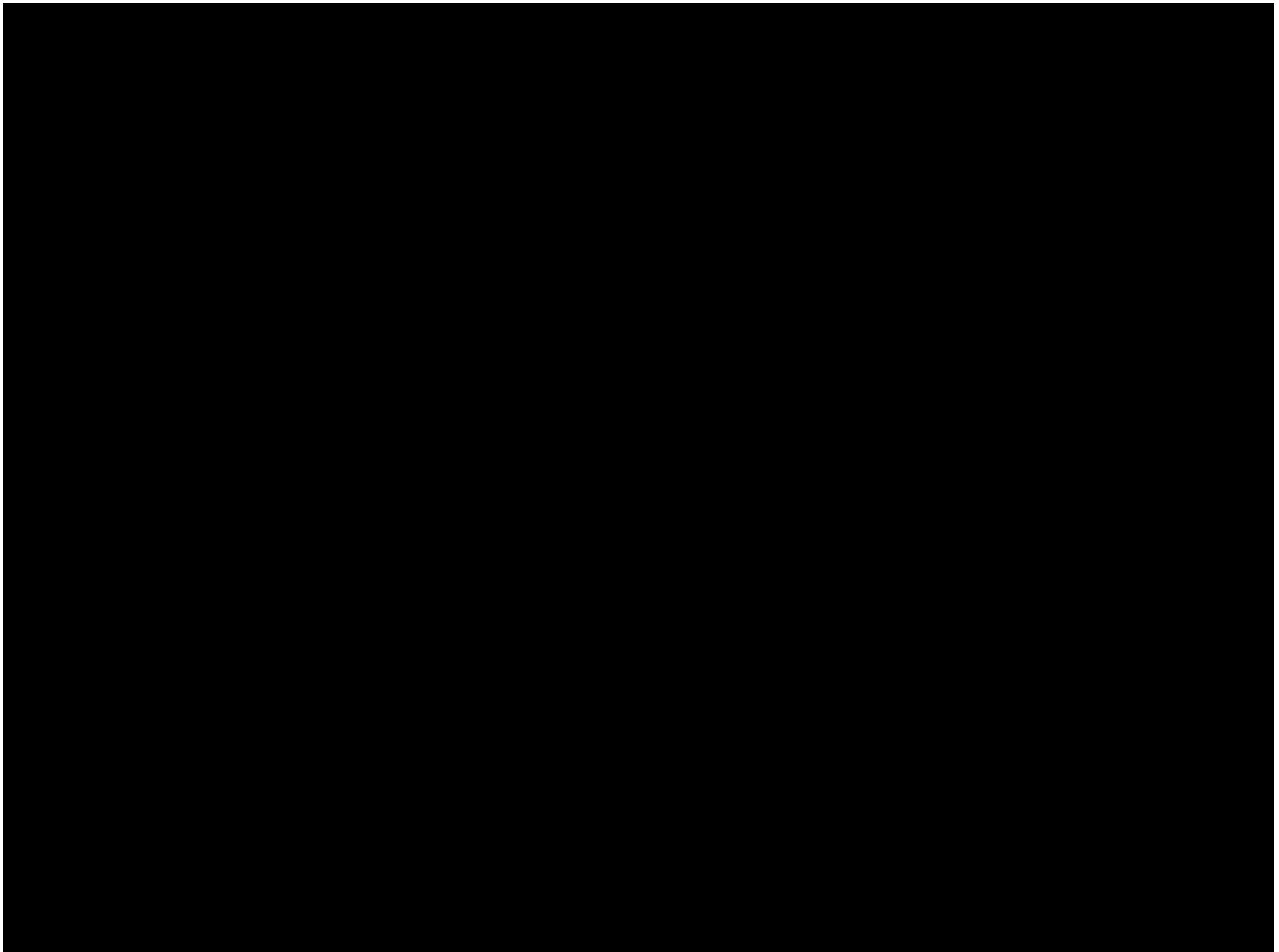
Donde  $\varepsilon_T$  es la tasa de errores totales y  $\varepsilon_c(\zeta)$  es la tasa de corrección de errores que depende de la cantidad de errores corregidos al cabo del tiempo  $\zeta$

# Confiabilidad del software

## Modelo de Shooman

$$R(t) = e^{-k \varepsilon_r(\zeta) t} = e^{-k(\varepsilon_T - \varepsilon_c(\zeta)) t}$$

- El modelo implica que con mayor tiempo de depuración  $\zeta$  aumenta la fiabilidad.
- Para aplicarlo hay que conocer  $\varepsilon_T$  y la constante  $k$ , pues  $\varepsilon_c$  resulta del proceso y ello solo puede hacerse corriendo el programa y evaluando el tiempo de ejecución hasta que aparezca un error.



# Ensayos de Confiabilidad

*Diseño de Equipos Electrónicos*

*ITBA*

# Confiabilidad

## Ensayos de Confiabilidad

### ■ ¿Para que sirven?

- Sirven para evaluar la confiabilidad alcanzada por un determinado sistema o producto.
- Permiten evaluar si la confiabilidad estimada coincide con el parámetro del producto real.
- Permiten detectar rápidamente debilidades que fueron omitidas durante la estimación de la confiabilidad.
- Son parte esencial del proceso de aprendizaje y maduración de un producto.

### ■ ¿Qué condiciones debe cumplir un ensayo?

- Las condiciones de evaluación deben ser lo más cerca posible a la aplicación real del producto.

### ■ ¿Qué tipos de ensayo existen?

- Estimación de la confiabilidad.
- Verificación de la confiabilidad (test de hipótesis)

# Confiabilidad

## Ensayos de Confiabilidad

- ¿Para que sirven?
  - Para evaluar la confiabilidad alcanzada por un determinado sistema o producto.
  - Permiten evaluar si la confiabilidad estimada coincide con el parámetro del producto real.
  - Permiten detectar rápidamente debilidades que fueron omitidas durante la estimación de la confiabilidad.
  - Son parte esencial del proceso de aprendizaje y maduración de un producto.
- ¿Qué condiciones debe cumplir un ensayo?
  - Las condiciones de evaluación deben ser lo más cerca posible a la aplicación real del producto.
- ¿Qué tipos de ensayo existen?
  - Estimación de la confiabilidad.
  - Verificación de la confiabilidad (test de hipótesis)

# Confiabilidad

## Ensayos de Confiabilidad

- ¿Para que sirven?
  - Para evaluar la confiabilidad alcanzada por un determinado sistema o producto.
- Permiten evaluar si la confiabilidad estimada coincide con el parámetro del producto real.
  - Permiten detectar rápidamente debilidades que fueron omitidas durante la estimación de la confiabilidad.
  - Son parte esencial del proceso de aprendizaje y maduración de un producto.
- ¿Qué condiciones debe cumplir un ensayo?
  - Las condiciones de evaluación deben ser lo más cerca posible a la aplicación real del producto.
- ¿Qué tipos de ensayo existen?
  - Estimación de la confiabilidad.
  - Verificación de la confiabilidad (test de hipótesis)

# Confiabilidad

## Ensayos de Confiabilidad

- ¿Para que sirven?
  - Para evaluar la confiabilidad alcanzada por un determinado sistema o producto.
  - Permiten evaluar si la confiabilidad estimada coincide con el parámetro del producto real.
- Permiten detectar rápidamente debilidades que fueron omitidas durante la estimación de la confiabilidad.
  - Son parte esencial del proceso de aprendizaje y maduración de un producto.
- ¿Qué condiciones debe cumplir un ensayo?
  - Las condiciones de evaluación deben ser lo más cerca posible a la aplicación real del producto.
- ¿Qué tipos de ensayo existen?
  - Estimación de la confiabilidad.
  - Verificación de la confiabilidad (test de hipótesis)

# Confiabilidad

## Ensayos de Confiabilidad

- ¿Para que sirven?
  - Para evaluar la confiabilidad alcanzada por un determinado sistema o producto.
  - Permiten evaluar si la confiabilidad estimada coincide con el parámetro del producto real.
  - Permiten detectar rápidamente debilidades que fueron omitidas durante la estimación de la confiabilidad.
- Son parte esencial del proceso de aprendizaje y maduración de un producto.
- ¿Qué condiciones debe cumplir un ensayo?
  - Las condiciones de evaluación deben ser lo más cerca posible a la aplicación real del producto.
- ¿Qué tipos de ensayo existen?
  - Estimación de la confiabilidad.
  - Verificación de la confiabilidad (test de hipótesis)

# Confiabilidad

## Ensayos de Confiabilidad

- ¿Para que sirven?
- Para evaluar la confiabilidad alcanzada por un determinado sistema o producto.
- Permiten evaluar si la confiabilidad estimada coincide con el parámetro del producto real.
- Permiten detectar rápidamente debilidades que fueron omitidas durante la estimación de la confiabilidad.
- Son parte esencial del proceso de aprendizaje y maduración de un producto.
- ¿Qué condiciones debe cumplir un ensayo?
  - Las condiciones de evaluación deben ser lo más cerca posible a la aplicación real del producto.
- ¿Qué tipos de ensayo existen?
  - Estimación de la confiabilidad.
  - Verificación de la confiabilidad (test de hipótesis)

# Confiabilidad

## Ensayos de Confiabilidad

- ¿Para que sirven?
  - Para evaluar la confiabilidad alcanzada por un determinado sistema o producto.
  - Permiten evaluar si la confiabilidad estimada coincide con el parámetro del producto real.
  - Permiten detectar rápidamente debilidades que fueron omitidas durante la estimación de la confiabilidad.
  - Son parte esencial del proceso de aprendizaje y maduración de un producto.
  - ¿Qué condiciones debe cumplir un ensayo?
  - Las condiciones de evaluación deben ser lo más cerca posible a la aplicación real del producto.
- 
- ¿Qué tipos de ensayo existen?
    - Estimación de la confiabilidad
    - Verificación de la confiabilidad (test de hipótesis)

# Confiabilidad

## Ensayos de Confiabilidad

- ¿Para que sirven?
  - Para evaluar la confiabilidad alcanzada por un determinado sistema o producto.
  - Permiten evaluar si la confiabilidad estimada coincide con el parámetro del producto real.
  - Permiten detectar rápidamente debilidades que fueron omitidas durante la estimación de la confiabilidad.
  - Son parte esencial del proceso de aprendizaje y maduración de un producto.
  - ¿Qué condiciones debe cumplir un ensayo?
  - Las condiciones de evaluación deben ser lo más cerca posible a la aplicación real del producto.
- 
- ¿Qué tipos de ensayo existen?
    - Estimación de la confiabilidad.
    - Verificación de la confiabilidad (test de hipótesis)

# Confiabilidad

## Ensayos de Confiabilidad

### Estimación de la confiabilidad

- Se define:
  - $p$ : probabilidad de falla de un elemento.
  - $R=1-p$               Confiabilidad del elemento.
  - $S$ : Muestra aleatoria de  $n$  elementos.
- Se supone:
  - La probabilidad de fallas es constante para cada elemento.
  - Cada elemento de la muestra es estadísticamente independiente.
  - Que la población es homogénea y mucho mayor que el tamaño de la muestra.
- Bajo estas condiciones se puede utilizar la distribución binomial y los ensayos de Bernoulli para caracterizar la población.

# Confiabilidad

## Ensayos de Confiabilidad

### Estimación de la confiabilidad

- Se define:
  - $p$ : probabilidad de falla de un elemento.
  - $R=1-p$               Confiabilidad del elemento.
  - $S$ : Muestra aleatoria de  $n$  elementos.
- Se supone:
  - La probabilidad de fallas es constante para cada elemento.
  - Cada elemento de la muestra es estadísticamente independiente.
  - Que la población es homogénea y mucho mayor que el tamaño de la muestra.
- Bajo estas condiciones se puede utilizar la distribución binomial y los ensayos de Bernoulli para caracterizar la población.

# Confiabilidad

## Ensayos de Confiabilidad

### Estimación de la confiabilidad

- Se define:
  - $p$ : probabilidad de falla de un elemento.
  - $R=1-p$       Confiabilidad del elemento.
  - $S$ : Muestra aleatoria de  $n$  elementos.
- Se supone:
  - La probabilidad de fallas es constante para cada elemento.
  - Cada elemento de la muestra es estadísticamente independiente.
  - Que la población es homogénea y mucho mayor que el tamaño de la muestra.
- Bajo estas condiciones se puede utilizar la distribución binomial y los ensayos de Bernoulli para caracterizar la población.

# Confiabilidad

## Ensayos de Confiabilidad

### Estimación de la confiabilidad

- Se define:
  - $p$ : probabilidad de falla de un elemento.
  - $R=1-p$       Confiabilidad del elemento.
  - $S$ : Muestra aleatoria de  $n$  elementos.
- Se supone:
  - La probabilidad de fallas es constante para cada elemento.
  - Cada elemento de la muestra es estadísticamente independiente.
  - Que la población es homogénea y mucho mayor que el tamaño de la muestra.
- Bajo estas condiciones se puede utilizar la distribución binomial y los ensayos de Bernoulli para caracterizar la población.

# Confiabilidad

## Ensayos de Confiabilidad

### Estimación de la confiabilidad

- Se define:
  - $p$ : probabilidad de falla de un elemento.
  - $R=1-p$       Confiabilidad del elemento.
  - $S$ : Muestra aleatoria de  $n$  elementos.
- Se supone:
  - La probabilidad de fallas es constante para cada elemento.
  - Cada elemento de la muestra es estadísticamente independiente.
  - Que la población es homogénea y mucho mayor que el tamaño de la muestra.
- Bajo estas condiciones se puede utilizar la distribución binomial y los ensayos de Bernoulli para caracterizar la población.

$$p_k = \Pr\{\zeta = k\} = \binom{n}{k} p^k (1-p)^{n-k}, \quad k = 0, \dots, n, \quad 0 < p < 1.$$

$$\Pr\{\zeta \leq k\} = \sum_{i=0}^k \binom{n}{i} p^i (1-p)^{n-i}, \quad k = 0, \dots, n, \quad 0 < p < 1,$$

$$E[\zeta] = np,$$

$$\text{Var}[\zeta] = np(1-p).$$

# Confiabilidad

## Ensayos de Confiabilidad

- Estimación puntual de la confiabilidad
  - Sea:
    - n: Tamaño de la muestra de una población homogénea.
    - k: Cantidad de elementos defectuosos dentro de la muestra
  - ¿Cuál será la probabilidad de falla del elemento?
    - Se busca un estimador de la tasa de falla de la población de máxima verosimilitud
    - Se define entonces:

$$\hat{p} = \frac{k}{n}$$

- ¿Qué problema presenta este estimador?
  - Es puntual
  - No contempla un riego
  - No da idea del corrimiento que puede tener este estimador y el parámetro real.
- ¿Cómo obtener más información?
  - Estimando un intervalo.

# Confiabilidad

## Ensayos de Confiabilidad

- Estimación puntual de la confiabilidad
  - Sea:
    - n: Tamaño de la muestra de una población homogénea.
    - k: Cantidad de elementos defectuosos dentro de la muestra
  - ¿Cuál será la probabilidad de falla del elemento?
    - Se busca un estimador de la tasa de falla de la población de máxima verosimilitud
    - Se define entonces:

$$\hat{p} = \frac{k}{n}$$

- ¿Qué problema presenta este estimador?
  - Es puntual
  - No contempla un riesgo
  - No da idea del corrimiento que puede tener este estimador y el parámetro real.
- ¿Cómo obtener más información?
  - Estimando un intervalo.

# Confiabilidad

## Ensayos de Confiabilidad

- Estimación de intervalo de confiabilidad:
  - Se define:

$\hat{p}_l$  : Estimador del extremo inferior del intervalo

$\hat{p}_u$  : Estimador del extremo superior del intervalo

$[\hat{p}_l, \hat{p}_u]$ : Intervalo de confianza

$\gamma$  : Nivel de confianza

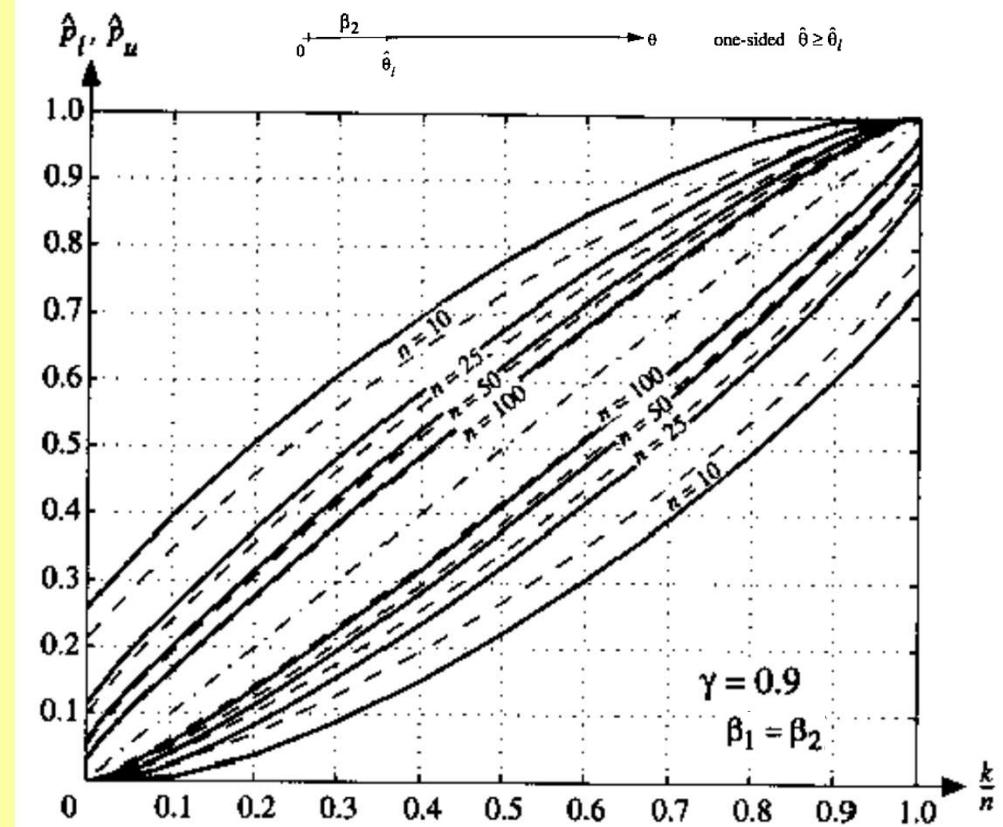
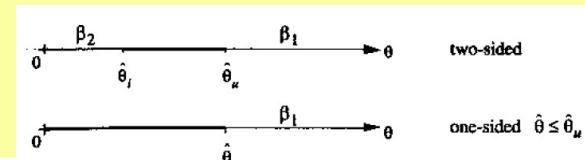
$$\gamma = 1 - \beta_1 - \beta_2$$

$$\sum_{i=k}^n \binom{n}{i} \hat{p}_l^i (1 - \hat{p}_l)^{n-i} = \beta_2$$

$$\sum_{i=0}^k \binom{n}{i} \hat{p}_u^i (1 - \hat{p}_u)^{n-i} = \beta_1$$

$\beta_1$  : Riesgo a que  $p$  sea mayor a  $\hat{p}_u$

$\beta_2$  : Riesgo a que  $p$  sea menor a  $\hat{p}_l$



# Confiabilidad

## Ensayos de Confiabilidad

- Estimación de intervalo de confiabilidad:
  - Se define:

$\hat{p}_l$  : Estimador del extremo inferior del intervalo

$\hat{p}_u$  : Estimador del extremo superior del intervalo

$[\hat{p}_l, \hat{p}_u]$ : Intervalo de confianza

$\gamma$  : Nivel de confianza

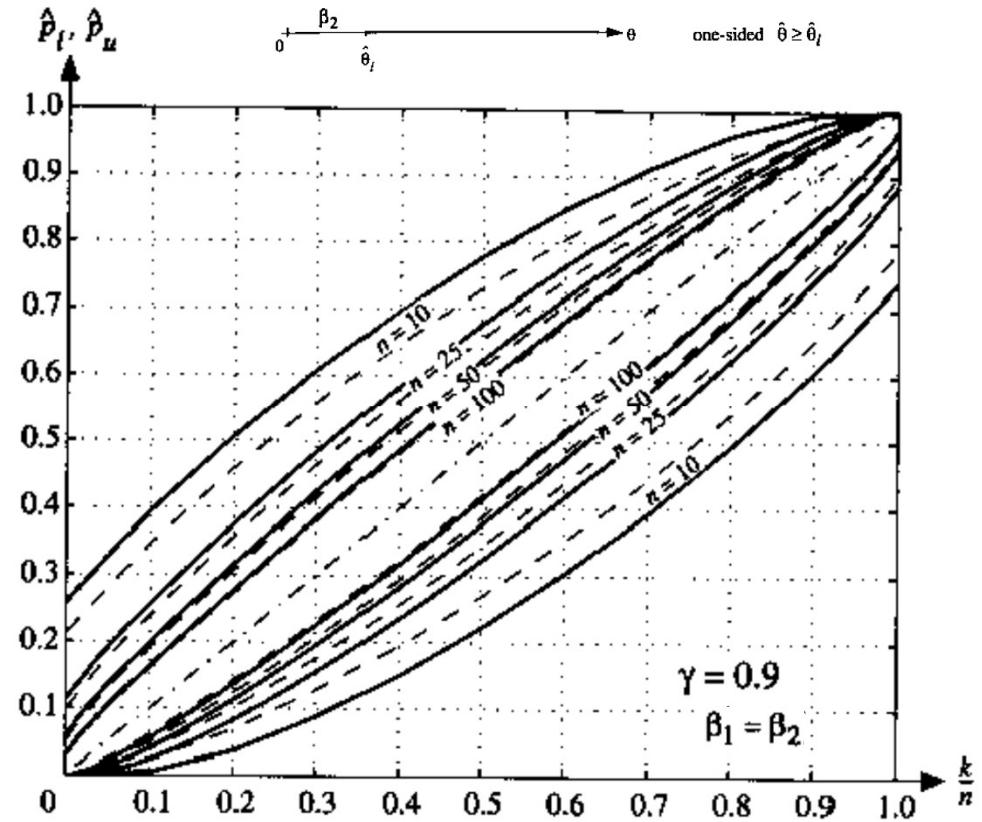
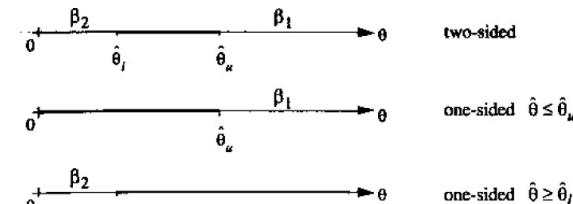
$$\gamma = 1 - \beta_1 - \beta_2$$

$$\sum_{i=k}^n \binom{n}{i} \hat{p}_l^i (1 - \hat{p}_l)^{n-i} = \beta_2$$

$$\sum_{i=0}^k \binom{n}{i} \hat{p}_u^i (1 - \hat{p}_u)^{n-i} = \beta_1$$

$\beta_1$  : Riesgo a que  $p$  sea mayor a  $\hat{p}_u$

$\beta_2$  : Riesgo a que  $p$  sea menor a  $\hat{p}_l$



# Confiabilidad

## Ensayos de Confiabilidad

- Estimación de intervalo de confiabilidad (cont.)
  - Ejemplo:
    - Un experimento analiza 100 semielaborados de los cuales 95 ejemplares pasaron satisfactoriamente la prueba.
    - Determinar el intervalo de confianza para la confiabilidad suponiendo un riesgo del 10%
  - Estimación puntual

$$\hat{R} = \frac{n - k}{n} = \frac{95}{100} = 0.95$$

- Estimación intervalo

$$\begin{aligned}\hat{p} &= 1 - \hat{R} \\ \hat{p} &= 0.05\end{aligned}$$

$$\gamma = 1 - 0.1 = 0.9 (\beta_1 = \beta_2 = 0.05)$$

$$\hat{p} = [\hat{p}_l, \hat{p}_u] = [0.03, 0.10]$$

$$\hat{R} = [\hat{R}_l, \hat{R}_u] = [0.9, 0.97]$$

# Confiabilidad

## Ensayos de Confiabilidad

- Estimación de intervalo de confiabilidad ( $\hat{R}$ )

- Ejemplo:

- Un experimento analiza 100 semielaborados y 5 fallan al satisfactoriamente la prueba.
    - Determinar el intervalo de confianza para la probabilidad de que un dispositivo funcione 10%

- Estimación puntual

$$\hat{R} = \frac{n-k}{n} = \frac{95}{100} = 0.95$$

- Estimación intervalo

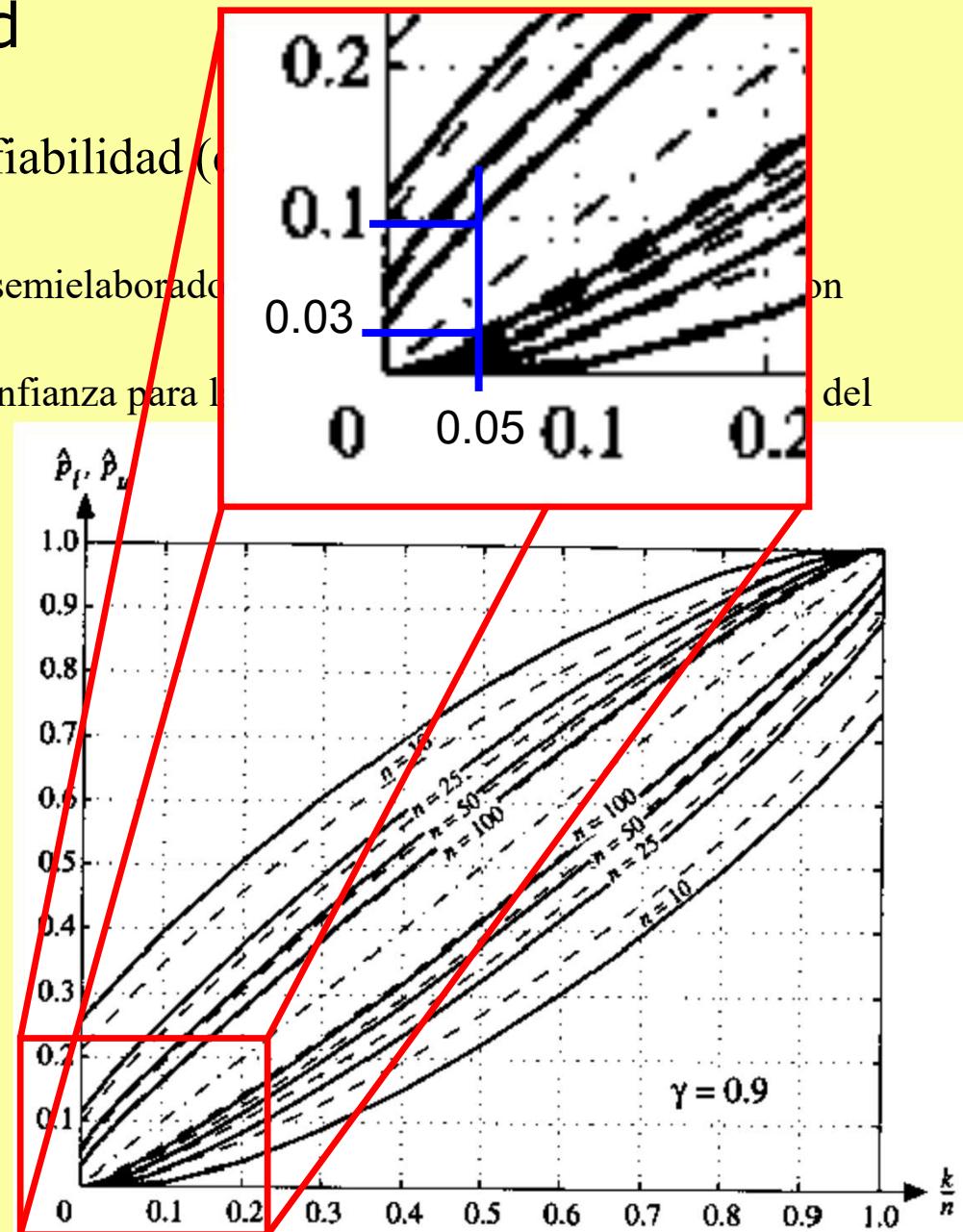
$$\hat{p} = 1 - \hat{R}$$

$$\hat{p} = 0.05$$

$$\gamma = 1 - 0.1 = 0.9 (\beta_1 = \beta_2 = 0.05)$$

$$\hat{p} = [\hat{p}_l, \hat{p}_u] = [0.03, 0.10]$$

$$\hat{R} = [\hat{R}_l, \hat{R}_u] = [0.9, 0.97]$$



# Confiabilidad

## Ensayos de Confiabilidad

- Estimación de intervalo de confiabilidad (c)

- Ejemplo:

- Un experimento analiza 100 semielaborados y 5 se satisfactoriamente la prueba.
- Determinar el intervalo de confiabilidad con un nivel de confiabilidad de 90% (10%)

- Estimación puntual

$$\hat{R} = \frac{n - k}{n} = \frac{95}{100} = 0.95$$

- Estimación intervalo

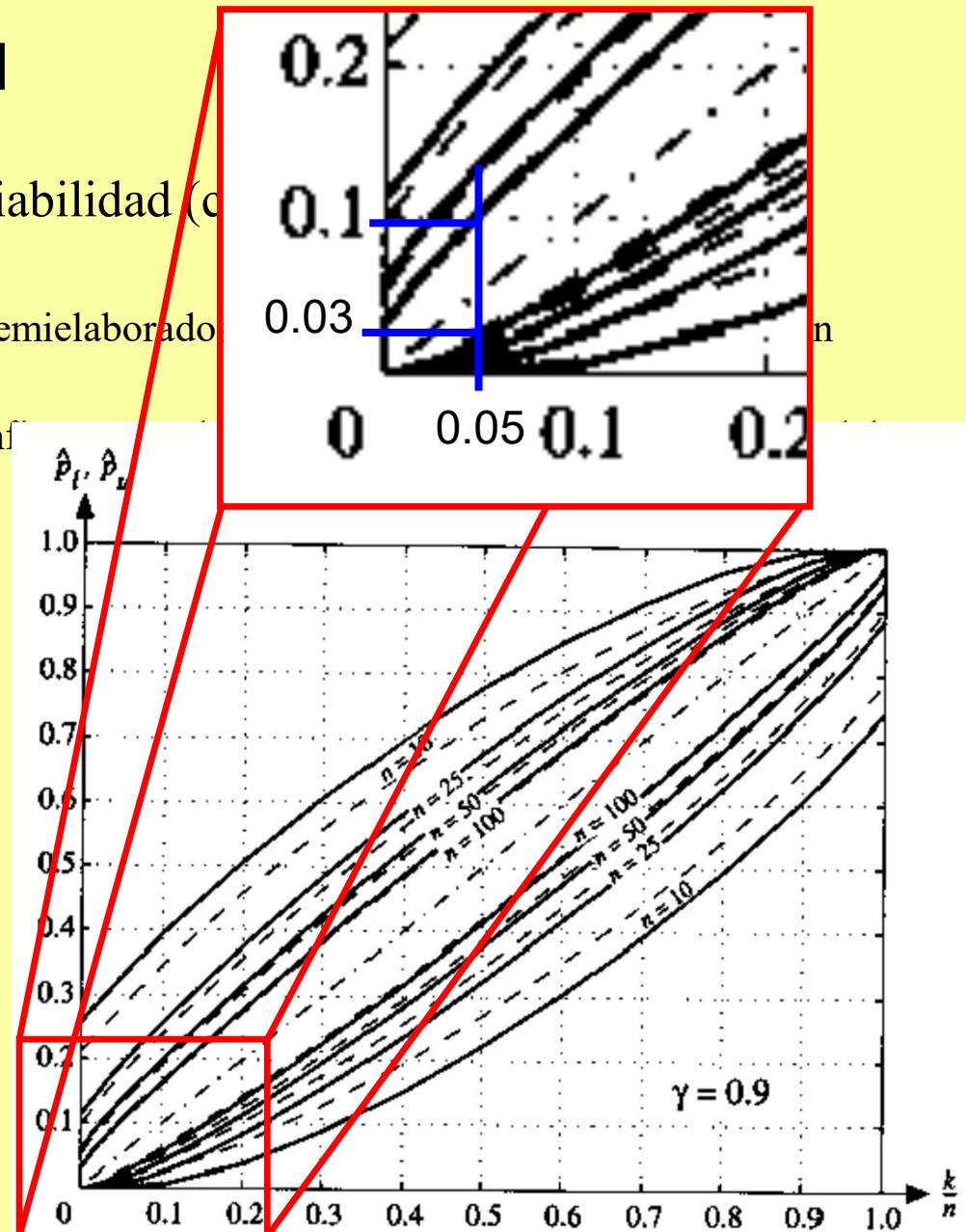
$$\hat{p} = 1 - \hat{R}$$

$$\hat{p} = 0.05$$

$$\gamma = 1 - 0.1 = 0.9 (\beta_1 = \beta_2 = 0.05)$$

$$\hat{p} = [\hat{p}_l, \hat{p}_u] = [0.03, 0.10]$$

$$\hat{R} = [\hat{R}_l, \hat{R}_u] = [0.9, 0.97]$$



# Confiabilidad

## Ensayos de Confiabilidad

### ■ Ensayos de aceptación

- Se basa en un test de hipótesis estadístico
- Se define una hipótesis nula ( $H_0$ ) y una hipótesis alternativa ( $H_1$ )

$$\begin{aligned} H_0 &: R > R_0 \\ H_1 &: R < R_1 \end{aligned}$$

- El ensayo es satisfactorio con una probabilidad  $1-\alpha$  si la confiabilidad real (desconocida) es mayor que  $R_0$
- El ensayo es rechazada con una probabilidad  $\beta$  si la confiabilidad es menor que  $R_1$
- Siendo:
  - $\alpha$ : riesgo a rechazar la hipótesis nula aún cuando la confiabilidad real es mayor que  $R_0$
  - $\beta$ : riesgo de aceptar la hipótesis nula cuando la confiabilidad real es menor que  $R_1$ .

	$H_0$ is rejected	$H_0$ is accepted
$H_0$ is true	false $\rightarrow$ type I error ( $\alpha$ )	correct
$H_0$ is false ( $H_1$ is true)	correct	false $\rightarrow$ type II error ( $\beta$ )

# Confiabilidad

## Ensayos de Confiabilidad

- Ensayos de aceptación (cont.)
  - Procedimiento:
    - Basados en  $R_0$ ,  $R_1$ ,  $\alpha$  y  $\beta$  obtener el valor de  $c$  y  $n$  que cumplen con:

$$\begin{aligned} p_0 &= 1 - R_0 \\ p_1 &= 1 - R_1 \\ \sum_{i=0}^c \binom{n}{i} p_0^i (1-p_0)^{n-i} &\geq 1 - \alpha \\ \sum_{i=0}^c \binom{n}{i} p_1^i (1-p_1)^{n-i} &\geq \beta \end{aligned}$$

- Tomar una muestra de  $n$  ejemplares y determinar el número de defectuosos  $k$

Aceptar $H_0$	si $k \leq c$
Rechazar $H_0$	si $k > c$

# Confiabilidad

## Ensayos de Confiabilidad

- Ensayos de aceptación (cont.)
  - Ejemplo
    - La confiabilidad de un dado sistema era  $R=0.9$  y mediante acciones de diseño fue mejorada. En un test de 100 sistemas, 94 fueron exitosos. ¿la confiabilidad fue incrementada hasta 0.95? Utilizar un error de tipo I del 20%

$$\begin{aligned} p_0 &= 1 - R_0 = 1 - 0.95 = 0.05 \\ \alpha &= 0.20 \\ n &= 100 \\ \sum_{i=0}^c \binom{n}{i} p_0^i (1-p_0)^{n-i} &\geq 1 - \alpha \quad \Rightarrow \quad c = 7 \end{aligned}$$

- Debido a que solo fallaron 6 ejemplares, se puede afirmar con un nivel de confianza del 80% que la confiabilidad ha sido mejorada por arriba de 0.95

# Confiabilidad

## Ensayos de Confiabilidad

- Ensayos de aceptación (correlacionados)
  - Ejemplo
    - La confiabilidad de un diseño mejorada. En un ensayo se realizó con 100 sistemas, ¿la confiabilidad fue incrementada del 20%?

$$p_0 = 1 - R_0 = 1 - 0,95 = 0,05$$

$$\alpha = 0,20$$

$$n = 100$$

$$\sum_{i=0}^c \binom{n}{i} p_0^i (1-p_0)^{n-i} \geq 1 - \alpha = 0,80$$

- Debido a que solo fallaron 6 ejemplos se tiene una confianza del 80% que la confiabilidad es mayor al 0.95

Ejemplo: Un sistema tenía una confiabilidad  $R = 0,9$  y mediante acuerdo de diseño fue mejorada. Se realizó un test sobre 100 sistemas, 94 resultaron exitoso. Utilizando un error tipo I del 20% puede afirmarse que la confiabilidad ha sido mejorada por arriba del 95%?

$$p_0 = 1 - R_0 = 1 - 0,95 = 0,05$$

$$\alpha = 0,20 \Rightarrow 1 - \alpha = 0,80$$

$$n = 100$$

$$\sum_{i=0}^c \binom{n}{i} p_0^i (1-p_0)^{n-i} \geq 1 - \alpha = 0,80$$

Acumulado

$$i=0 \rightarrow \binom{100}{0} 0,05^0 (0,95)^{100} = 0,00592$$

$$i=1 \rightarrow \binom{100}{1} 0,05^1 (0,95)^{99} = 0,05116$$

$$i=2 \rightarrow \binom{100}{2} 0,05^2 (0,95)^{98} = 0,08118 \quad 0,11826$$

$$i=3 \rightarrow \binom{100}{3} 0,05^3 (0,95)^{97} = 0,15958$$

$$i=4 \rightarrow \binom{100}{4} 0,05^4 (0,95)^{96} = 0,17814 \quad 0,43595$$

$$i=5 \rightarrow \binom{100}{5} 0,05^5 (0,95)^{95} = 0,18002$$

$$i=6 \rightarrow \binom{100}{6} 0,05^6 (0,95)^{94} = 0,15001 \quad 0,76601$$

$$i=7 \rightarrow \binom{100}{7} 0,05^7 (0,95)^{93} = 0,10603 \quad 0,87204$$

Como solo fallaron 6 ejemplos se puede afirmar con un nivel de confiabilidad del 80% que la confiabilidad ha sido mejorada, por encima del 0,95

# Confiabilidad

## Ensayos de Confiabilidad

- Estimación de la tasa de fallas o MTBF
  - Supone una tasa de fallas constante con distribución exponencial
  - La cantidad de fallas está gobernada por un proceso de poisson
  - Por lo tanto,

$$\Pr\{k \text{ failures within } T \mid \lambda\} = \frac{(\lambda T)^k}{k!} e^{-\lambda T}.$$

- Debido a las propiedades asociadas a un proceso de poisson y la distribución exponencial, el tiempo acumulado de operación puede ser dividido de varias formas
  - Un solo equipo que es inmediatamente reparado ante cada falla.
    - $T = t$  = tiempo calendario
  - $m$  equipos idénticos, cada uno reemplazado inmediatamente ante la falla.
    - $T = m.t$

# Confiabilidad

## Ensayos de Confiabilidad

- Estimación de la tasa de fallas o MTBF (cont.)
  - En la práctica existen al menos 4 métodos de evaluación
    - Cantidad fija de fallas (k) y reparación instantánea

$$\hat{\lambda} = \frac{k-1}{m \cdot t_k}$$

- Cantidad fija de fallas (k) sin reparación

$$\hat{\lambda} = \frac{k-1}{t_1 + \dots + t_k + (m-k)t_k}$$

- Tiempo de ensayo fijo sin reparación

$$\hat{\lambda} = \frac{k}{t_1 + \dots + t_k + (m-k)t}$$

- Tiempo de ensayo fijo sin reparación y sin conocer el instante de falla de cada elemento

$$\hat{\lambda} \approx \frac{k}{mt} \left( 1 + \frac{k}{2m} \right)$$

# Confiabilidad

## Ensayos de Confiabilidad

- Estimación de la tasa de fallas o MTBF (cont.)
  - El estimador de mayor verosimilitud para el caso de un ensayo restringido en tiempo T donde se han registrado k fallas es:

$$\hat{\lambda} = \frac{k}{T}$$

- El modelo establece que para determinar el intervalo de confianza se debe cumplir con:

$$\sum_{i=0}^k \frac{(\hat{\lambda}_u T)^i}{i!} e^{-\hat{\lambda}_u T} = \beta_1$$

$$\sum_{i=k}^{\infty} \frac{(\hat{\lambda}_l T)^i}{i!} e^{-\hat{\lambda}_l T} = \beta_2$$

$$\gamma = 1 - \beta_1 - \beta_2$$

- Siendo solución:

$$\hat{\lambda}_l = \frac{\chi^2_{2k, \beta_2}}{2T}$$

$$\hat{\lambda}_u = \frac{\chi^2_{2(k+1), 1-\beta_1}}{2T},$$

$$MTBF_l = \frac{2T}{\chi^2_{2(k+1), 1-\beta_1}}$$

$$MTBF_u = \frac{2T}{\chi^2_{2k, \beta_2}}.$$

# Confiabilidad

## Ensayos de Confiabilidad

- Estimación de la tasa de fallas o MTBF (cont.)
  - En la práctica se trabaja con curvas y gráficos que permiten obtener valores rápidamente

$$\hat{\lambda}_l = \frac{\chi^2_{2k, \beta_2}}{2T}$$

$$\hat{MTBF}_l = \frac{2T}{\chi^2_{2(k+1), 1-\beta_1}}$$

$$\hat{\lambda}_u = \frac{\chi^2_{2(k+1), 1-\beta_1}}{2T},$$

$$\hat{MTBF}_u = \frac{2T}{\chi^2_{2k, \beta_2}}.$$

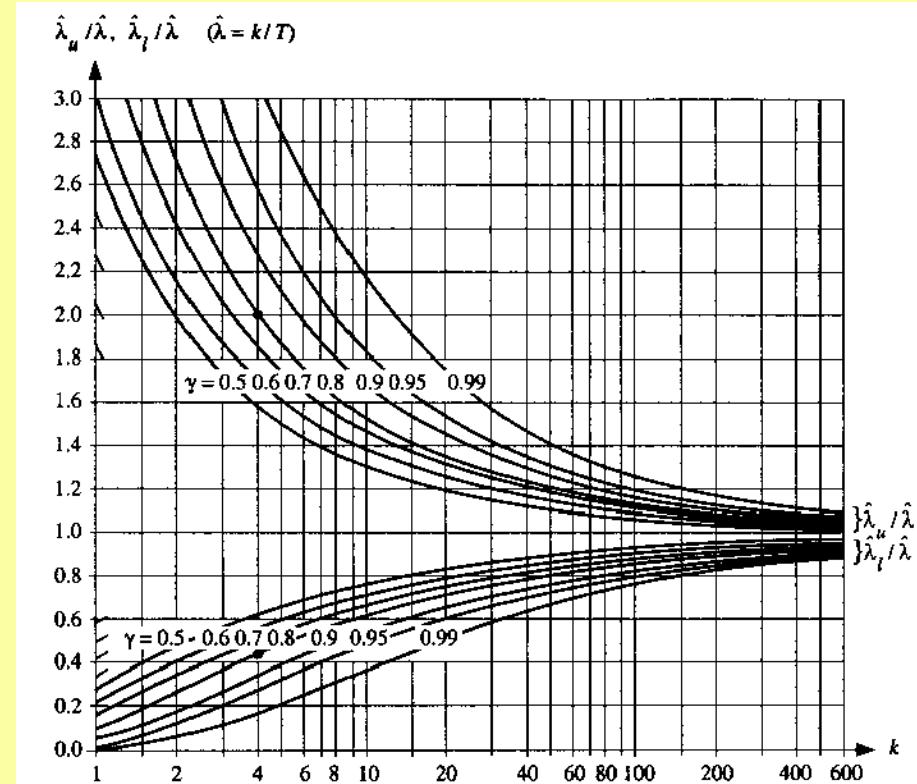


Figure 7.6 Confidence limits  $\hat{\lambda}_l$  and  $\hat{\lambda}_u$  for an unknown constant failure rate  $\lambda$  or  $MTBF = 1/\lambda$  ( $T$ =given (fixed) cumulative operating time (time censoring)),  $k$  = number of failures during  $T$ ,  $\gamma$  = confidence level  $= 1 - \beta_1 - \beta_2$  (here with  $\beta_1 = \beta_2$ ),  $\hat{MTBF}_l = 1/\hat{\lambda}_u$  and  $\hat{MTBF}_u = 1/\hat{\lambda}_l$

# Confiabilidad

## Ensayos de Confiabilidad

### Ensayos truncados

- Ocurre un número de fallas predeterminado  $r^*$
- Alcanza un tiempo preestablecido  $t^*$

La forma de calcular el tiempo varía según la manera de realizar la prueba:

- $T = n \cdot t^*$  Test con reemplazo
- $T = \sum_{i=1}^{r^*} t_i + (n - r)t^*$  Test sin reemplazo

Para el cálculo de los intervalos de confianza se emplea la distribución Chi cuadrado

Type of Confidence Limits	Fixed Number of Failures, $r^*$	Fixed Truncation Time $t^*$
One Sided (Lower Limit)	$\left( \frac{2T}{\chi^2(\alpha, 2r)}, \infty \right)$	$\left( \frac{2T}{\chi^2(\alpha, 2r+2)}, \infty \right)$
Two Sided (Upper and Lower Limits)	$\left( \frac{2T}{\chi^2(\frac{\alpha}{2}, 2r)}, \frac{2T}{\chi^2(1-\frac{\alpha}{2}, 2r)} \right)$	$\left( \frac{2T}{\chi^2(\frac{\alpha}{2}, 2r+2)}, \frac{2T}{\chi^2(1-\frac{\alpha}{2}, 2r)} \right)$

**SECTION 8: RELIABILITY DATA COLLECTION AND ANALYSIS,  
DEMONSTRATION, AND GROWTH**

TABLE 8.3-11: DISTRIBUTION OF  $\chi^2$  (CHI-SQUARE)

DF	Probability													
	0.99	0.95	0.90	0.80	0.75	0.50	0.25	0.20	0.10	0.05	0.025	0.01	0.001	
1	0.00016	0.00098	0.00598	0.0198	0.0462	0.10135	0.435	1.325	1.642	2.706	3.841	5.024	6.635	10.827
2	0.0201	0.0506	0.105	0.211	0.446	0.5755	1.386	2.772	5.215	4.605	5.991	7.377	9.210	13.815
3	0.15	0.216	0.332	0.584	1.005	1.2125	2.366	4.108	4.642	6.231	7.815	9.548	11.541	16.268
4	0.297	0.434	0.711	1.064	1.649	1.9225	3.537	5.385	5.989	7.779	9.448	11.145	13.277	18.465
5	0.534	0.831	1.145	1.610	2.345	2.674	4.351	6.625	7.239	9.236	11.070	12.832	15.086	20.517
6	0.872	1.237	1.635	2.204	3.070	3.454	5.348	7.840	8.508	10.645	12.592	14.449	16.812	22.457
7	1.239	1.689	2.167	2.835	3.822	4.254	6.346	9.037	9.803	12.017	14.067	16.015	18.475	24.322
8	1.646	2.179	2.735	3.490	4.394	5.070	7.344	10.218	11.030	13.362	15.307	17.334	20.090	26.125
9	2.088	2.700	3.325	4.168	5.380	5.998	8.345	11.388	12.242	14.684	16.919	19.025	21.666	27.877
10	2.538	3.247	3.940	4.885	6.179	6.737	9.542	12.548	13.442	15.987	18.307	20.485	23.209	29.538
11	3.003	3.816	4.575	5.378	6.989	7.584	10.541	13.701	14.631	17.275	19.675	21.920	24.725	31.264
12	3.571	4.404	5.226	6.304	7.807	8.438	11.540	14.845	15.812	18.549	21.026	23.536	26.217	32.909
13	4.107	5.008	5.892	7.042	8.654	9.299	12.540	15.984	16.985	19.812	22.362	24.735	27.688	34.528
14	4.660	5.628	6.571	7.790	9.467	10.165	13.339	17.117	18.151	21.064	23.685	26.139	29.141	36.125
15	5.229	6.242	7.261	8.547	10.307	11.036	14.339	18.245	19.311	22.307	24.994	27.488	30.578	37.607
16	5.812	6.907	7.962	9.312	11.132	11.912	15.338	19.368	20.465	23.542	26.296	28.845	32.000	39.252
17	6.408	7.564	8.672	10.085	12.002	12.791	16.338	20.488	21.615	24.769	27.387	30.191	33.409	40.790
18	7.015	8.231	9.390	10.845	12.837	13.675	17.338	21.605	22.760	25.989	28.669	31.526	34.805	42.512
19	7.633	8.906	10.137	11.681	13.716	14.562	18.338	22.717	23.900	27.204	30.144	32.832	36.191	43.820
20	8.260	9.291	10.851	12.443	14.278	15.452	19.337	23.827	25.038	28.412	31.410	34.169	37.266	45.515
21	8.897	10.285	11.291	13.240	15.445	16.344	20.337	24.935	26.171	29.615	32.671	35.479	38.932	46.797
22	9.542	10.982	12.338	14.041	16.314	17.239	21.337	26.039	27.301	30.815	33.924	36.780	40.289	48.268
23	10.196	11.688	13.091	14.848	17.187	18.137	22.337	27.141	28.429	32.007	35.172	38.075	41.638	49.728
24	10.856	12.400	13.848	15.639	18.062	19.037	23.337	28.241	29.535	33.196	36.415	39.364	42.980	51.179
25	11.524	13.129	14.611	16.475	18.940	19.939	24.337	29.539	30.675	34.382	37.652	40.646	44.314	52.620
26	12.198	13.844	15.379	17.292	19.820	20.843	25.336	30.434	31.795	35.365	38.885	41.925	45.642	54.052
27	12.879	14.573	16.151	18.134	20.703	21.749	26.336	31.528	32.912	36.741	40.113	43.194	46.965	55.476
28	13.565	15.308	16.928	18.935	21.588	22.657	27.336	32.620	34.027	37.916	41.337	44.460	48.278	56.895
29	14.256	16.047	17.708	19.768	22.475	23.566	28.336	33.711	35.139	39.087	42.507	45.722	49.588	58.302
30	14.953	16.791	18.495	20.599	23.364	24.476	29.336	34.799	36.250	40.256	43.775	46.98	50.892	59.705

# Confiabilidad

## Ensayos de Confiabilidad

Ejemplo: Veinte elementos se ensayan mediante un test con reemplazo. El test continúa hasta que se observen 10 elementos fallados. Esto ocurre luego de 80 horas. Calcular:

- MTBF de los elementos (estimación puntual)
- Los intervalos de confianza de una y dos colas al 95% para el MTBF

SOLUCION

$$a) \text{MTBF} = \frac{nt^*}{r} = \frac{(20)(80)}{10} = 160 \text{ h}$$

$$b) \alpha = 1 - \text{nivel Confianza} = 1 - 0,95 = 0,05$$

$$2r = 2 \text{ (nro. Fallas)} = 2.(10) = 20$$

Entramos a la table de Chi Cuadrado con estos parámetros y obtenemos:

$$C\left[\frac{2T}{\chi^2_{(0.05, 2r)}}, \infty\right] = C\left[\frac{2(1600)}{\chi^2_{(0.05, 20)}}, \infty\right] = C\left[\frac{3200}{31.41}, \infty\right] = C[101.88, \infty] = .95 \quad \text{ensayo de 1 cola}$$

$$C\left(\frac{2T}{\chi^2_{\left(\frac{\alpha}{2}, 2r\right)}}, \frac{2T}{\chi^2_{\left(1 - \frac{\alpha}{2}, 2r\right)}}\right) = C\left(\frac{3200}{34.17}, \frac{3200}{9.591}\right) = C(93.65, 333.65) = .95 \quad \text{ensayo de 2 colas}$$

# Confiabilidad

## Ensayos de Confiabilidad

Ejemplo: Veinte elementos se ensayan mediante un test sin reemplazo el cual se finaliza a las 100 horas. Las fallas de los elementos se observaron a las 10 horas, 16 hs, 17 hs, 25 hs, 31hs, 46 hs y 65 hs.Calcular:

- El intervalo de confianza de una cola al 90 % ( $\alpha= 0,10$ )
- Los límites de dos colas al 90% para el MTBF

SOLUCION

a)

$$C = C \left( \frac{2 \left[ \left( \sum_{i=1}^7 t_i \right) + (20 - 7)100 \right]}{\chi^2(10,16)} \right]_{\infty} = C \left( \frac{3020}{23.54} \right) = C(128.3, \infty) = .90 \quad \text{ensayo de 1 cola}$$

b)

$$C \left( \frac{2T}{\chi^2 \left( \frac{\alpha}{2}, 2r+2 \right)}, \frac{2T}{\chi^2 \left( 1 - \frac{\alpha}{2}, 2r \right)} \right) = C \left( \frac{3020}{26.30}, \frac{3020}{6.57} \right) = C(114.83, 459.67) = .90 \quad \text{ensayo de 2 colas}$$

# Confiabilidad

## Ensayos de Confiabilidad

- Ensayos Acelerados
  - Generalmente se utilizan para reducir el tiempo de ensayo debido gran confiabilidad que tienen los equipos hoy en día.
  - Se trata de sobre-cargar a los elementos de manera de aumentar la probabilidad de falla pero sin sacarlo fuera de especificación
  - La temperatura es el elemento generalmente utilizado como acelerador
  - El modelo de Arrhenius es que gobierna el factor de aceleración y la temperatura

$$v = v_0 e^{-\frac{E_a}{kT}},$$

$$\frac{t_1}{t_2} = e^{\frac{E_a}{k} \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)},$$

$$A = e^{\frac{E_a}{k} \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)}.$$

$$A = \frac{MTTF_1}{MTTF_2} \quad \text{or} \quad A = \frac{MTBF_1}{MTBF_2} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1}$$

# Confiabilidad

## Ensayos de Confiabilidad

- Ensayos Acelerados

- Generalmente se utilizan para reducir el tiempo de ensayo debido gran confiabilidad que tienen los equipos hoy en día.
- Se trata de sobre-cargar a los elementos de manera de aumentar la probabilidad de falla pero sin sacarlo fuera de especificación
- **La temperatura es el elemento generalmente utilizado como acelerador**
- El modelo de Arrhenius es que gobierna el factor de aceleración y la temperatura

### *Regla de los 10 grados*

La vida de un componente o material se reduce a la mitad por cada  $10^{\circ}\text{C}$  de aumento en la temperatura.



# CONFIABILIDAD

La fiabilidad o confiabilidad es la característica de un **elemento** expresada por la probabilidad de que el elemento realizará su **función requerida** bajo determinadas **condiciones** para un **intervalo de tiempo** dado.

**Elemento:** Unidad funcional que puede ser considerada una entidad (componente, producto, equipo, sistema, etc.)

**Función requerida:** Determina qué hace el elemento.

**Condiciones:** Se deben especificar las características ambientales de funcionamiento (humedad, temperatura, corriente, tensión, etc.)

**Intervalo de Tiempo:** En general se toma al tiempo como parámetro, por lo que se define la  $R(t)$  como la probabilidad de no falla durante el intervalo de tiempo  $(0;t]$ , suponiendo que  $R(0)=1$ , o sea que al comienzo el elemento se encuentra en servicio.

## Fiabilidad estimada vs. predecida

**Estimada:** Se calcula, basándose en la confiabilidad de los elementos y en la tasa de falla de los componentes.

**Predecida:** Se obtiene de un análisis estadístico de los resultados de un ensayo o de campo.

Al definir la fiabilidad como una probabilidad, esta lleva implícita las siguientes consideraciones:

Los resultados son aplicables al comportamiento de poblaciones.

Los resultados son en principio solo aplicables al lote del cual se extrajeron las muestras.

Los resultados se obtienen de tratamientos estadísticos basados en pruebas experimentales o en evaluaciones de campo.

Existirá un riesgo de estimación asociado al tratamiento estadístico.

La realidad es que si la caracterización se restringiera a un solo lote serviría de muy poco. Para que sea útil debe permitir aplicar resultados hacia futuro, e incluso predecir comportamientos. Para que pueda extenderse a otros lotes se requiere que mantengan la misma caracterización estadística. Esto puede inferirse si la nueva población es fabricada de la misma manera, con los mismos insumos, procesos y controles. Esto último solo puede asegurarse si el proceso de fabricación está bajo control, o sea debidamente documentado y con una repetibilidad que no dependa de una persona o de otros factores del proceso que estén fuera de control. Esto implica mantener la variabilidad del proceso. Ahora bien, como el control de cada proceso es propio de cada fabricante, la fiabilidad de un mismo tipo de componente fabricado por dos empresas distintas,

seguramente puede ser diferente. Este factor debe ser tenido en cuenta por el diseñador al seleccionar los elementos con los cuales debe ser fabricado su diseño.

## Fallas

Se dice que se ha producido una falla cuando un elemento deja de cumplir su función. Debe entenderse que funcionar significa cumplir con una especificación determinada.

### Clasificación de las Fallas

Las fallas pueden clasificarse de diferente manera, por ejemplo:

Modo: Síntoma por cual la falla es detectada. Ej: Cortocircuito, fatiga, etc.

Causa:

*Intrínseca:* Debido a una debilidad del componente.

*Externa:* Por incorrecto uso del componente.

*Sistemática:* Fallas de tipo determinístico.

Efecto: Se refiere a la consecuencia de la falla, pueden ser:

No relevante.

Crítica.

Parcial.

Completa.

Primaria o Secundaria.

Falla Primaria: No causadas ni directa ni indirectamente por la falla de otro dispositivo.

Falla Secundaria: Provocadas por la falla de otro dispositivo.

También pueden clasificarse en:

Fallas por mal uso: Básicamente por aplicar el elemento fuera de sus límites de trabajo.

Fallas por debilidad inherente: Utilizando el dispositivo dentro de su rango de trabajo.

Fallas por desgaste: Sobreviene con el uso y es una característica de la población.

También, según la velocidad de aparición se habla de fallas repentinas o progresivas.

Según su grado o severidad pueden ser fallas parciales o completas (cuando pierde toda funcionalidad).

Por otro lado si la falla es por un lapso de tiempo y sin mediar acción externa se recobra la plena funcionalidad, entonces se habla de fallas intermitentes.

Se llega finalmente a una categorización muy relevante de fallas en dos grandes grupos:

**Fallas catastróficas:** repentinias + completas + definitivas

**Fallas por degradación o paramétricas:** progresivas + parciales

**Todo el tratamiento que sigue se refiere a fallas catastróficas.**

## **Tasa de Fallas**

Llamamos  $N_f$  a los elementos de un lote, en un instante dado habrá  $N_f(t)$  elementos que fallaron y  $N_s$  elementos que continúan funcionando correctamente.

Supongamos que queremos hallar la cantidad de elementos fallados en el intervalo de tiempo posterior a  $t$ ,  $t+\Delta t$ . Es obvio que solo podrán fallar en  $\Delta t$  aquellos que se hallan funcionando en el instante  $t$ . Al coeficiente de proporcionalidad se lo denomina Tasa de Falla y se lo indica por  $\lambda(t)$ ; por ser en general una función de  $t$ , es decir:

$$\Delta N_f(t) = \lambda(t) N_s(t) \Delta t$$

$$\lambda(t) = 1/N_s(t) \cdot \Delta N_f(t)/\Delta t$$

En base a la definición de la función de fallas  $F(t) = N_f(t) / N_0$  (probabilidad de falla) y del concepto de fiabilidad  $R(t) = 1 - F(t) = N_s(t) / N_0$ ; la cantidad de elementos fallados en  $\Delta t$  será:

$$\Delta N_f(t) = \Delta F(t) \cdot N_0 = (\Delta F(t) / \Delta t) \cdot \Delta t \cdot N_0 = f(t) \cdot N_0 \cdot \Delta t$$

Por lo que resulta;

$$\lambda = f(t) \cdot (N_{\text{No}} / N_{\text{S}}(t)) \cdot (\Delta t / \Delta t) = f(t) / R(t) = (-1 / R(t)) \cdot (dR(t) / dt)$$

$$\lambda(t) = \frac{-1}{R(t)} \cdot \frac{dR(t)}{dt}$$

Esto último, expresa la tasa de fallas como la probabilidad de que el elemento falle en el intervalo  $\Delta t$  subsiguiente al instante  $t$ , suponiéndolo en funcionamiento en el instante  $t$ , y nos permite hallar una expresión general de la confiabilidad como:

$$R(t) = e^{- \int_0^t \lambda(x) dx}$$

Por lo tanto el tiempo a la falla queda determinado por:

$$MTTF = E(\tau) = \int_0^\infty t \cdot f(t) dt = \int_0^\infty t \cdot R'(t) dt$$

Para el caso en los cuales se puede suponer constante la tasa de fallas, se obtiene el tiempo medio entre fallas de la siguiente manera:

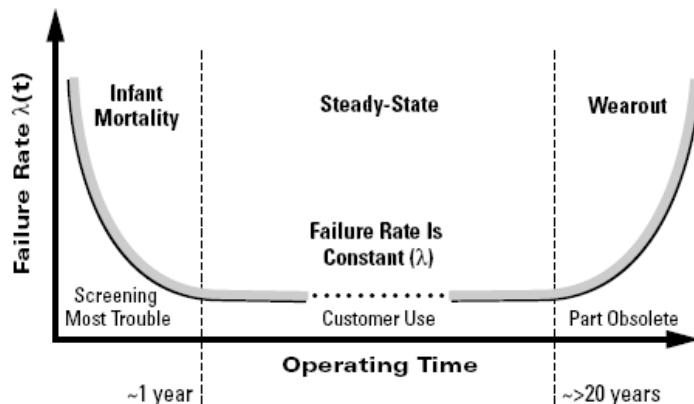
$$MTBF = \int_0^\infty R(t) dt = \int_0^\infty e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda}$$

Por otro lado y debido a que la tasa de fallas medida en 1/hora es una unidad muy grande, en la norma militar HDBK-217 se la expresa en fallas por millón de horas, ( $10^{-6}$  1/h). Asimismo, en el ambiente profesional se introdujo como unidad específica el FIT (failure in time), unidad de fallas en el tiempo, que mide la cantidad de fallas cada  $10^{-9}$  horas, o sea

$$1 \text{ FIT} = 10^{-9} [1 / \text{hora}]$$

La tasa de fallas es en general variable con el tiempo, siendo usual proponer un modelo genérico que es consecuencia de varios mecanismos. Uno debido a debilidades que puede tener el elemento por vicios en el proceso de fabricación o debilidad de los materiales y otro debido al desgaste al

que está sometido el dispositivo (fallas por degradación). La combinación de ambos efectos determina un comportamiento conocido como curva de la bañera.



Esta curva, sumamente conocida y utilizada en ingeniería, explica muy bien el comportamiento agregado de muchos componentes. Cabe aclarar que en el caso particular de sistemas electrónicos, es común que antes de alcanzar la zona de desgaste por envejecimiento, dichos sistemas sean sacados de servicio por obsolescencia, con lo cual, una vez superada la etapa de mortalidad infantil, un comportamiento basado en una tasa de fallas constante describe en forma muy adecuada la realidad.

## Cálculo de la confiabilidad estimada

Aplicación de la norma MIL-HDBK 217 F

Existen varios métodos desarrollados para poder estimar la confiabilidad de un sistema, equipo, circuito, etc., a partir de sus elementos constituyentes.

Entre ellos podemos mencionar:

**Método de las Redes:** Muy aplicable para estimar la confiabilidad de equipos sin elementos redundantes.

**Simulación de Montecarlo:** Se utiliza cuando los elementos tienen dos modos de falla y ambos tienen diferentes consecuencias.

**Árbol de Fallas:** Cuando se deben conocer sólo ciertas fallas atendiendo sus consecuencias.

Específicamente es muy utilizado cuando se deben realizar estimaciones de seguridad.

**Cadenas de Markov:** Muy utilizado cuando se trabaja con sistemas con redundancia.

**Método de las cargas (HDBK 217):** Sumamente utilizado, ideal para efectuar comparaciones.

Este último método fue propuesto por el Departamento de Defensa de los EEUU y ha sido adoptado casi universalmente, no sólo es utilizado a nivel militar, sino también en la industria en general.

Cabe aclarar que en la industria de las telecomunicaciones es muy utilizado el conjunto de normas desarrollado por Bellcore (Bell Communications Research inc.).

## **Norma MIL HDBK 217 F**

Constituye una de las principales fuentes de datos para estimar la confiabilidad de componentes electrónicos. Está basada en muchos años de experiencia y ensayos de una enorme cantidad de equipos sometidos a todo tipo de condiciones de trabajo.

La versión original data de 1961. Hoy está disponible de manera pública y gratuita la versión de 1991 con las modificaciones de 1995. Existe una versión plus que contó con participación de la NASA.

Como las condiciones de ambiente en las cuales deben funcionar los equipos, afectan de manera sustancial a la confiabilidad de los mismos, se tipifican 14 tipos de ambientes distintos. Se parte de GB Ground Benign, hasta CL Cannon Launch que representan condiciones extremas.

La norma prevé dos procedimientos básicos de cálculo, aplicables especialmente en diferentes etapas del diseño:

**Parts Counts Reliability Prediction:** El método de conteo de partes, es aplicable en especial en las fases iniciales del diseño.

**Parts Stress Analysis Method:** Conocido como método de las cargas, es utilizable cuando se conocen a qué cargas van a estar sometidos los componentes por lo que se puede aplicar en etapas más avanzadas.

Por ser un estándar para caracterizar equipos militares, la MIL HDBK 217 es considerada muy severa en términos de márgenes de seguridad, estimando tasas de falla que pueden llegar a ser uno o dos órdenes de magnitud, superiores a los esperables, en especial para componentes actuales.

Otro aspecto a considerar es que los dispositivos semiconductores, en especial IC's y LSI's, han mejorado continuamente y de hecho lo continúan haciendo día a día, hecho que no se reflejado en los valores que contiene la norma. Esto último hace recomendable que si se poseen las tasas de falla base actualizadas y garantizadas por el fabricante, se utilicen dichos valores individuales en lugar de los tabulados en la norma. Sin embargo este último hecho no invalida el método utilizado, el cual ha sido comprobado con el tiempo, demostrando ser sumamente adecuado para garantizar la confiabilidad de todo tipo de equipos.

### **Método de conteo de partes**

Se realiza en fases tempranas del proyecto, donde no se tiene en cuenta la carga, sino la cantidad de elementos de igual tipo, a los cuales se les aplica la tasa de fallas básica. Parte del supuesto de que a esta altura del proyecto solo se conoce la configuración inicial de los circuitos, tipo y cantidad de componentes.

La información necesaria para aplicar este método incluye:

Tipo genérico de partes (incluida la complejidad de circuitos microelectrónicos).

Cantidad de elementos de cada tipo.

Calidad de los elementos (cuando es conocido o pueda ser asumido).

Condiciones ambientales genéricas para cada ítem.

Para este método la expresión general de la tasa de falla es:

$$\lambda_{ITEM} = \sum_{i=1}^n N_i (\lambda_{Gi} \pi_{Qi})$$

$\lambda_{ITEM}$  = Tasa de fallas total de la parte o ítem considerado.

$\lambda_{Gi}$  = Tasa de falla genérica para la parte i.

$\pi_{Qi}$  = Factor de calidad.

$N_i$  = Cantidad de elementos i.

n = número de diferentes partes genéricas.

Esta ecuación se aplica a una condición ambiental y de trabajo dada. Si los ítems son sometidos a otras condiciones y estas son conocidas de antemano, se debería corregir por este factor.

$\pi_{Qi}$  depende del nivel de ensayo, burn-in e inspección al que se halla sujeto el componente. Cuanto más rigurosa es la especificación y mayor la calidad, más pequeña es la tasa de fallas y por ende el factor  $\pi_{Qi}$ .

Para entender mejor el método, desarrollaremos un ejemplo de aplicación:

Se conoce que un circuito consta de 326 elementos en total incluyendo dos impresos doble capa.

En la siguiente tabla se detallan los ítems y los valores de  $\pi_{Q}$  y  $\lambda$ :

Part Type	Failure Rate ( $\lambda_G$ ) per $10^6$ Hrs.)	Quantity Used (N)	Quality Factor ( $\pi_Q$ )	Total Failure rate per $10^6$ Hrs. ( $\lambda_G \times N \times \pi_Q$ )
Microcircuit				
Linear	0.18	20	2	7.20
Memory	0.07	5	2	0.70
Diode				
General Purpose	0.05	30	1	1.50
Regulator	0.04	20	1	0.80
Transistor				
Power	0.07	20	1	1.40
FET	0.16	5	1	0.80
Resistor				
Composition	0.05	80	3	1.20
Variable	0.07	20	3	0.42
Capacitor				
Ceramic	0.06	60	3	1.08
Tantalum	0.04	40	3	0.48
Switch				
Rocker	0.41	5	2	4.10
Rotary	2.00	5	2	20.00
Transformer				
Power	0.80	2	1	1.60
Connector				
Edge	0.45	2	1	0.90
Circular	0.10	10	1	1.00
Circuit Board				
Two Layer	0.16	2	1	0.32
Total		326		43.50

$$MTBF_{TOTAL} = 1/\lambda_T = 1/43.5 \times 10^6 = 22,989 \text{ hours}$$

Este método supone una distribución exponencial, o sea  $\lambda$ = constante y que todas las partes se encuentren en serie desde el punto de vista de la confiabilidad.

Si las condiciones operativas se alejan mucho de las nominales, el método anterior se aleja demasiado y hay que recurrir al segundo método. Esto último es lo que normalmente hay que aplicar en las etapas más avanzadas del proyecto.

## Método de las cargas o stress method

Existe un cierto número de técnicas empíricas que se basan en las cargas a que son sometidos los elementos. Entre ellas además de la HDBK 217, podemos nombrar:

Bellcore RPP, Nippon Telegraph and Telephone, British Telecom HRD-4, Centro Nacional de Telecomunicaciones Francés y el procedimiento desarrollado por la empresa Siemens.

Aquí vamos a desarrollar el de la Norma HDBK-217F. Antes conviene repasar cuales son los factores de mayor influencia en cada tipo de componente desde el punto de vista de la fiabilidad.

La tabla nos muestra que factores son los dominantes y cuales importantes para distintos tipos de componentes electrónicos.

Esto nos permite presentar un resumen de aquellos factores que hay que considerar de acuerdo a los componentes que utilicemos en nuestro diseño y que podemos ver en el siguiente cuadro:

Component	Ambient temp. ( $\theta_A$ )	Junction temp. ( $\theta_J$ )	Power stress (S)	Voltage stress (S)	Current stress (S)	Breakdown voltage	Technology	Complexity	Package	Application	Contact construction	Range	Production maturity	Environment ( $\pi_E$ )	Quality ( $\pi_Q$ )
Digital and linear ICs	D	D		x	x	x			x				x	x	x
Hybrid circuits	D	D	D	D	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Bipolar transistors	D	D		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
FETs	D	D		x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x
Diodes	D			x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x
Thyristors	D			x	x		x			x	x	x	x	x	x
Optoelectronic components	D		x	x		x	x	x				x	x	x	x
Resistors	D	D			x							x	x	x	x
Capacitors	D		D		x							x	x	x	x
Coils, transformers	D	x	x		x							x	x	x	x
Relays, switches	D		x	x	x	x		x	x	x		x	x	x	x
Connectors	D			x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x

D denotes dominant, x denotes important

El método de las cargas parte del supuesto que una tasa de fallas base  $\lambda_B$  de un elemento se ve afectada por una serie de multiplicadores, cada uno de los cuales se corresponde con una condición de carga.

El modelo de coeficientes a aplicar es función del tipo de componente.

i

$$\lambda_i = \lambda_{Bi} \cdot \prod_l \pi_{ji}$$

$\lambda_{Bi}$  es una función de la temperatura de trabajo y del factor de solicitud o sea  $f(S, T)$ . En la norma i encontramos tablas, curvas o fórmulas que permiten calcular esto.

$\prod_l \pi_{ji}$  la productoria de distintos factores de ajuste es función del tipo de componente que se trate.

l

Tipo de Parte	Factores Influyentes
Circuitos Integrados	Temperatura, complejidad, tensión de alimentación.
Semiconductores discretos	Temperatura, Potencia disipada, tensión de ruptura.
Capacitores	Temperatura, tensión, tipo.
Resistores	Temperatura, Potencia disipada, tipo.
Inductores	Temperatura, corriente, tensión aislación.

Como consecuencia de lo antedicho, los factores de ajuste  $\Pi_{ji}$  que dependen del tipo de componente en juego y de su aplicación concreta, hacen que no sean necesarios todos los ajustes para todos los componentes.

Dentro de los factores de ajuste más comunes tenemos:

$\Pi_T$  factor por Temperatura.

$\Pi_Q$  factor por Calidad. Fundamental es la norma bajo la cual está fabricado.

$\Pi_E$  factor Ambiental. Si la aplicación es en tierra, aérea, móvil, etc.

$\Pi_L$  factor por Aprendizaje. Tiene en cuenta la maduración de la tecnología.

$\Pi_C$  factor de Complejidad. Depende del tipo de dispositivo, x ej. número de pines, bits de una memoria, etc.

$\Pi_A$  factor de aplicación en semiconductores. Más importante en alta frecuencia.

Según el tipo de componentes, pueden existir factores más específicos que pueden ser, tensión, corriente, disipación, etc. En la norma se encuentran contemplados casi todos los componentes electrónicos, desde conectores, soldaduras, memorias, circuitos integrados, etc., indicando para cada uno una tasa de fallas básica y los factores de carga que permiten hacer la estimación efectiva de su tasa de fallas para la aplicación particular.

Esto último sirve como guía al diseñador para conocer qué factores afectan en distinta medida la confiabilidad de su diseño. Normalmente también se indican en la norma las expresiones analíticas que permiten calcular el valor de cada factor.

Ejemplo: Cálculo de la tasa de fallas de un transistor N MOSFET (SPP04N5OC3)

Características del Transistor	STRESS de la Aplicación particular
$I_{D\text{MAX}} = 4,5 \text{ A}$	$I_D = 1,5 \text{ A}$
$V_{DS\text{MAX}} = 560 \text{ V}$	$V_{DS} = 350 \text{ V}$
$P_{D\text{MAX}} = 50 \text{ W} @ 25^\circ\text{C}$	$P_d = 6,8 \text{ W}$
$\theta_{jc} = 2,5 \text{ }^\circ\text{C/W}$	$T_a = 55^\circ\text{C}$
$C_{iss} = 470 \text{ pF}$	$f_s = 55 \text{ KHz}$
$T_{j\text{MAX}} = 150^\circ\text{C}$	Equipo terrestre en condiciones óptimas

$\theta_{cs}$  = Resistencia Térmica encapsulado disipador (0,5-0,7 °C/W)

$$\theta_{ca \text{ MAX}} = ((T_{j\text{MAX}} - T_a)/(P_d)) \cdot (\theta_{cs} + \theta_{jc}) \quad \text{Resistencia térmica máxima entre disipador/ambiente}$$

El modelo de tasa de falla a aplicar según la norma para transistores MOSFET canal N o P y frecuencia de trabajo menor a 400 MHz se halla en la tabla 6-4 (página 6-8) de la HDBK 217 F. (Copia de la misma se agrega como figura).

$$\lambda_p = \lambda_b \cdot N \cdot \Pi_T \cdot \Pi_A \cdot \Pi_Q \cdot \Pi_E \cdot \text{Fallas/ } 10^6 \text{ horas}$$

$$\lambda_b = 0,012 \text{ fallas/ } 10^6 \text{ horas}$$

$\Pi_A$  = factor aplicación. Función de Pr Rated Output Power. Como  $P_d = 6,8 \text{ W}$ , de la tabla obtengo:

$$\Pi_A = 4.$$

$\Pi_Q$  = Quality Factor. Asumimos calidad comercial y encapsulado plástico.  $\Pi_Q = 8$ .

$\Pi_E$  = Equipo en tierra bajo óptimas condiciones.  $G_B = > \Pi_E = 1$ .

Para el cálculo de  $\Pi_T$  es necesario calcular la  $T_j$  sabiendo que la  $T_a = 55^\circ\text{C}$ .

$$\theta_{ja} = \theta_{jc} + \theta_{cs} + \theta_{sa} \quad \text{donde}$$

$\theta_{ja}$  Resistencia térmica juntura ambiente

$\theta_{jc}$  Resistencia térmica juntura carcaza =  $2,5 \text{ }^\circ\text{C/W}$

$\theta_{cs}$  Resistencia térmica carcaza disipador: adopto  $0,5 \text{ }^\circ\text{C/W}$

$\theta_{sa}$  Resistencia térmica disipador ambiente. Tengo que calcular el disipador.

Usamos para esto último el cálculo de la máxima resistencia entre disipador y ambiente.

$$\theta_{sa\ MAX} = ((150 - 55)/(6,8)) - (2,5 + 0,5) = 10,97 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

En general, en aplicaciones de potencia los fabricantes recomiendan un margen entre el 10 y el 15 por ciento del valor de  $\theta_{sa}$ , para asegurar un enfriamiento adecuado.

$$\Rightarrow \text{aplicando un margen del 15 \% : } \theta'_{sa} = (10,97) \cdot 0,85 = 9,32 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

$$\Rightarrow \theta_{ja} = \theta_{jc} + \theta_{cs} + \theta'_{sa} = 2,5 + 0,5 + 9,32 = 12,32 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

$$\text{Calculamos ahora la } T_j = T_a + \theta_{ja} \cdot P_d = 55 + 12,32 \cdot 6,8 = 138,77 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Ahora si podemos aplicar para el cálculo de  $\Pi_T$  la expresión de la tabla.

$$\pi_T = e^{(-1925(\frac{1}{T_j+273} - \frac{1}{298}))}$$
$$\pi_T = e^{(-1925(\frac{1}{138,77+273} - \frac{1}{298}))}$$

$$\pi_T = 5,9587 = 5,96$$

Por lo tanto la tasa de falla del elemento (transistor MOSFET) en las condiciones de carga dadas es de:

$$\lambda_p = \lambda_b \cdot N \cdot \Pi_T \cdot \Pi_A \cdot \Pi_Q \cdot \Pi_E$$

$$\lambda_p = 0,012 \cdot 5,96 \cdot 4 \cdot 8 \cdot 1 = 2,28 \text{ fallas/ } 10^6 \text{ horas}$$

En la página siguiente podemos ver una copia de la hoja de la norma HDBK-217 F, que contiene los datos utilizados para este cálculo.

## 6.4 TRANSISTORS, LOW FREQUENCY, Si FET

**SPECIFICATION**  
MIL-S-19500

**DESCRIPTION**  
N-Channel and P-Channel Si FET (Frequency  $\leq$  400 MHz)

$$\lambda_p = \lambda_b \pi_T \pi_A \pi_Q \pi_E \text{ Failures}/10^6 \text{ Hours}$$

Base Failure Rate -  $\lambda_b$ 

Transistor Type	$\lambda_b$
MOSFET	.012
JFET	.0045

Temperature Factor -  $\pi_T$ 

$T_J$ (°C)	$\pi_T$	$T_J$ (°C)	$\pi_T$
25	1.0	105	3.9
30	1.1	110	4.2
35	1.2	115	4.5
40	1.4	120	4.8
45	1.5	125	5.1
50	1.6	130	5.4
55	1.8	135	5.7
60	2.0	140	6.0
65	2.1	145	6.4
70	2.3	150	6.7
75	2.5	155	7.1
80	2.7	160	7.5
85	3.0	165	7.9
90	3.2	170	8.3
95	3.4	175	8.7
100	3.7		

$$\pi_T = \exp \left( -1925 \left( \frac{1}{T_J + 273} - \frac{1}{298} \right) \right)$$

$T_J$  = Junction Temperature (°C)

Quality Factor -  $\pi_Q$ 

Quality	$\pi_Q$
JANTXV	.70
JANTX	1.0
JAN	2.4
Lower	5.5
Plastic	8.0

Application Factor -  $\pi_A$ 

Application ( $P_r$ , Rated Output Power)	$\pi_A$
Linear Amplification ( $P_r < 2W$ )	1.5
Small Signal Switching	.70
Power FETs (Non-linear, $P_r \geq 2W$ )	
$2 \leq P_r < 5W$	2.0
$5 \leq P_r < 50W$	4.0
$50 \leq P_r < 250W$	8.0
$P_r \geq 250W$	10

Environment Factor -  $\pi_E$ 

Environment	$\pi_E$
$G_B$	1.0
$G_F$	6.0
$G_M$	9.0
$N_S$	9.0
$N_U$	19
$A_{IC}$	13
$A_{IF}$	29
$A_{UC}$	20
$A_{UF}$	43
$A_{RW}$	24
$S_F$	.50
$M_F$	14
$M_L$	32
$C_L$	320

Segundo ejemplo:

Calcular la tasa de falla para un integrado bipolar, digital de 60.000 compuertas, dual in line de 64 pines, el cual debe operar en un ambiente terrestre fijo. El integrado es fabricado por un proveedor que posee 2 años de experiencia en la tecnología.

La fórmula para calcular la tasa de fallas del integrado que nos dá la MIL HDBK 217 F es:

$$\lambda_p = (C_1 \cdot \pi_T + C_2 \cdot \pi_E) \cdot \pi_Q \cdot \pi_L$$

Donde:

$C_1$ = Factor de complejidad (60.000 compuertas).

$\pi_T$ = Factor de temperatura, basado en la temperatura de juntura.

$C_2$ = Factor de complejidad por tipo de encapsulado.

$\pi_E$ = Factor de condiciones ambientales de operación.

$\pi_Q$ = Factor de calidad (inspección y test).

$\pi_L$ = Factor de aprendizaje basado en años en producción.

Se sabe además que la temperatura de la carcaza no supera los 45 °C y la resistencia térmica es 11 °C/W. La disipación máxima del integrado es de 200 mW.

De la HDBK 217 obtenemos el factor  $C_1$  que para 60.000 compuertas es de 0,08 ( Tabla 5-1 pag. 5-3).

Determinamos ahora la temperatura de juntura. Sabemos que la manera estándar de calcular la temperatura de juntura está dada por:

$$T_j = T_c + \theta_{jc} \cdot P_d$$

$$T_j = 45^\circ\text{C} + 11^\circ\text{C}/\text{W} \cdot 0,200 \text{ W}$$

$$T_j = 47,2^\circ\text{C}$$

Para determinar el factor de aceleración por temperatura  $\pi_T$  vamos a la Tabla página

$$\pi_T = 0,1 \cdot e^{\left( \frac{-Ea}{8,617 \times 10^{-3}} \cdot \left( \frac{I}{T_j + 273} - \frac{I}{298} \right) \right)}$$

p/ silicio  $Ea= 0,4$  (TTL)

$$\pi_T = 0,1 \cdot e^{\left( -4641,98 \cdot \left( \frac{I}{47,2^\circ + 273} - \frac{I}{298^\circ} \right) \right)}$$

$$\pi_T = 0,294$$

Determinamos ahora el factor de complejidad  $C_2$  por encapsulado. Tabla 5-9 pag. 5-14. Para 64 pines DIP:

$$C_2 = 3,6 \times 10^4 \cdot (Np)^{1,08} = 0,032$$

Hallamos el factor ambiental para fijo en tierra.

$\text{GF} \Rightarrow 2 = \text{TT}_E$  Tabla 5.10 pag. 5-15

Seleccionamos el factor de calidad: elemento comercial, nivel de selección desconocido. Tabla 5-10 pag. 5-16

$\text{TT}_Q = 10$  Other commercial or Unknown Screening Level

para el factor de aprendizaje usamos la Tabla 5-10:

$$\pi_L = 0,01 \cdot e^{(5,35-0,35Y)}$$

$$\pi_L = 1 \text{ para líneas de producción de mas de 2 años}$$

En nuestro caso el cálculo nos daría  $\text{TT}_L = 1,03$  y podemos adoptar perfectamente 1.

Conocidos todos los factores ejecutamos el cálculo de  $\lambda_p$ :

$$\lambda_p = (C_1 \cdot \pi_T + C_2 \cdot \pi_E) \cdot \pi_Q \cdot \pi_L$$

$$\lambda_p = [0,08 \cdot 0,294 + 0,032 \cdot 2] \cdot 10 \cdot 1$$

$$\lambda_p = 0,875 \text{ fallas / } 10^6 \text{ horas.}$$

### Cálculo de la confiabilidad estimada para un subsistema / circuito.

El procedimiento puede resumirse en los siguientes pasos:

Definir la función requerida y sus variables de entorno

Confeccionar el diagrama de confiabilidad correspondiente (RBD)

Identificar las condiciones de operación de cada bloque del RBD

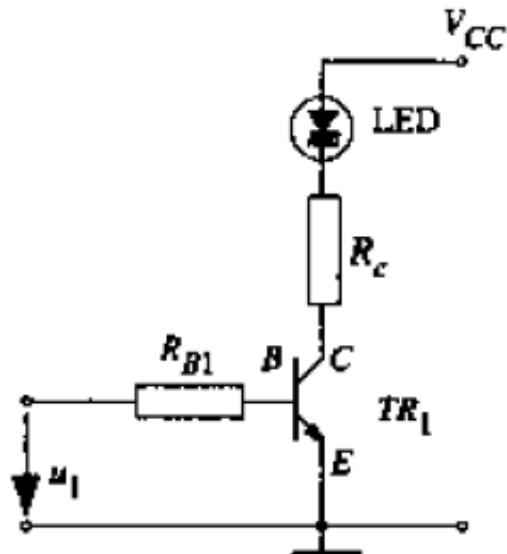
Determinar la tasa de falla para cada elemento del RBD

Calcular la confiabilidad para cada elemento del RBD

Calcular la confiabilidad del sistema  $R_s(t)$

Modificar el diseño y comenzar por el punto 1 nuevamente.

Ejemplo: Calcular la confiabilidad estimada del siguiente circuito



$u_1$  : 0.1 V and 4 V  
 $V_{CC}$  : 5 V  
LED : 1 V at 20 mA,  $I_{max} = 100$  mA  
 $R_C$  : 150  $\Omega$ , 1/2 W, MF  
 $TR_1$  : Si, 0.3 W, 30 V,  $\beta > 100$ , plastic  
 $R_{B1}$  : 10 k $\Omega$ , 1/2 W, MF

Función Requerida: El LED debe encender cuando  $u_1$  está en alto.

Condiciones Ambientales:

$T_a = 50$  °C dentro del equipo.  $T_a = 30$  °C en la posición del LED.

Tipo de ambiente GB (HDBK-217)

Nivel de Calidad: CECC.

Realizamos el Diagrama de Confiabilidad: RBD

Vemos que si falla cualquier elemento el LED no va a encender => SISTEMA SERIE

ya       $\rightarrow [E_1] \rightarrow [E_2] \rightarrow [E_3] \rightarrow [E_4] \rightarrow [E_5] \rightarrow$        $E_1 \triangleq$  LED,  $E_2 \triangleq R_C$ ,  $E_3 \triangleq R_{B1}$ ,  $E_4 \triangleq TR_1$ ,  $E_5 \triangleq$  PCB and solder joints      Supongamos que  
tasas de      de los      calculamos las  
falla de cada uno      elementos:

LED =>  $\lambda_1 = 1,3 \cdot 10^{-9}$  1/hr

Transistor=>  $\lambda_4 = 3 \cdot 10^{-9}$  1/hr

Resistor=>  $\lambda_2 = \lambda_3 = 0,3 \cdot 10^{-9}$  1/hr

PCB + Soldaduras=>  $\lambda_5 = 1 \cdot 10^{-9}$  1/hr

Como todos los elementos desde el punto de vista de la confiabilidad están en serie:

$$\dots \quad \lambda_s = \sum \lambda_i = 5,9 \cdot 10^{-9} \text{ 1/horas}$$

$$R_s(t) = e^{-\lambda_s t}$$

$$R_s(10 \text{ años}) = R_s(87.600 \text{ horas}) > 0,9994$$

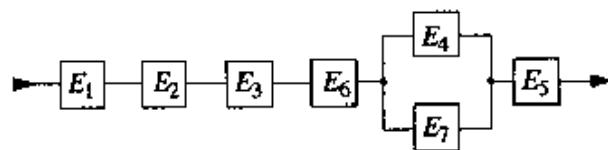
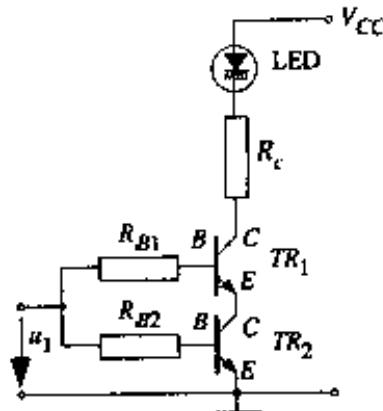
¿Qué sucede si no alcanzamos la meta de fiabilidad? => Tenemos que mejorar.

Vemos que el transistor es el elemento menos confiable. Entonces rediseñamos el circuito colocando otro transistor para lograr una redundancia contra un cortocircuito del mismo.

E1 a E5 ídem anterior

$$E_6 = R_{B2} = R_{B1}$$

$$E_7 = TR_2 = TR_1$$



$$\begin{aligned} &E_1 \text{ to } E_5 \text{ as in point 2} \\ &E_6 \triangleq R_{B2} \triangleq R_{B1}, E_7 \triangleq TR_2 \triangleq TR_1 \end{aligned}$$

Es una estructura serie / paralelo.

$$R_s = R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot R_6 \cdot R_5 \cdot (R_4 + R_7 - R_4 \cdot R_7)$$

$$R_s = e^{-1,3 \times 10^{-9}t} \times e^{-3,03 \times 10^{-9}t} \times e^{-6 \times 10^{-9}t} \times (e^{-3 \times 10^{-9}t} + e^{-3 \times 10^{-9}t} - e^{-6 \times 10^{-9}t})$$

$$R_s = e^{-3,2 \times 10^{-9}t} \times (2e^{-3 \times 10^{-9}t} - e^{-6 \times 10^{-9}t})$$

Por lo tanto:

$$R_s(10 \text{ años}) = 0,9997197 (1,9994745 - 0,9994745)$$

$$R_s(10 \text{ años}) = 0,9997197 > 0,9994 \quad \text{Mejoró la confiabilidad}$$

## Sistemas tolerantes a falla

Conocidos también como sistemas k de n. Son básicamente aquellos que por tener redundancias pueden seguir cumpliendo su función manteniendo en servicio k de n subsistemas o partes. En estos casos se puede demostrar que la confiabilidad del sistema puede ser calculada con la siguiente expresión.

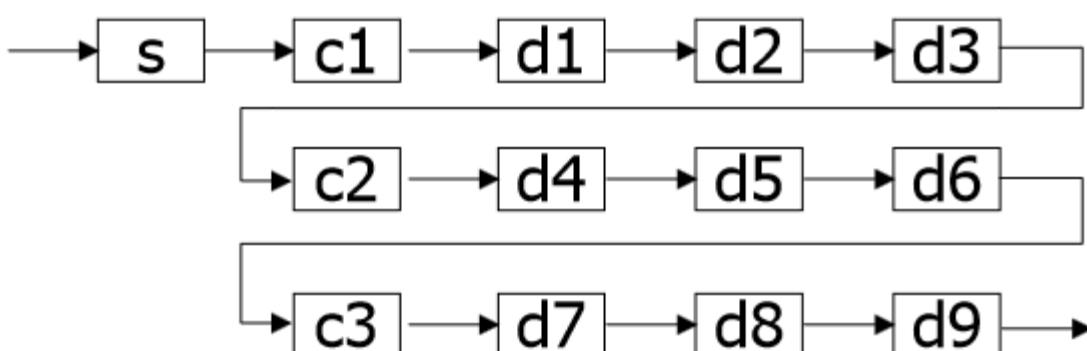
$$R_s(t) = \sum_{i=k}^n \binom{n}{i} R^i(t) (1 - R(t))^{n-i}$$

Para comprenderlo mejor desarrollaremos un ejemplo:

El servidor de una base de datos necesita 315GByte de disco, tal espacio se obtiene usando 9 discos de 35 GBytes cada uno. Por cuestiones de desempeño, no se conectan más de 3 discos a un mismo controlador. Considere los siguientes sistemas:

- a. Sistema no tolerante a fallas: el sistema se daña cuando se daña un disco o un controlador o el servidor.
  - b. Sistema tolerante a fallas: Con esta arquitectura el mal funcionamiento de un disco debido al controlador es compensado por el sistema.
- 1) Diseñar el diagrama de confiabilidad en cada caso.
  - 2) Calcular los valores de confiabilidad (MTTF) asumiendo los siguientes valores de MTTF:
    - Disco,  $MTTF_D = 200.000$  horas
    - Controlador,  $MTTF_C = 500.000$  horas
    - Servidor,  $MTTF_S = 25.000$  horas.

- a) Sistema NO Tolerante a fallas de partes.



Como se puede apreciar se trata de un sistema serie.

$$\lambda_{SIS} = \lambda_S + 3\lambda_C + 9\lambda_D = 4 \cdot 10^{-5} + 6 \cdot 10^{-6} + 4.5 \cdot 10^{-5} = 9.1 \cdot 10^{-5} \text{ 1/horas}$$

$$\lambda_{SIS} = 91 \cdot 10^{-6} \text{ 1/horas}$$

$$MTTF_{SIS} = 1 / \lambda_{SIS} = 10.989 \text{ horas}$$

$$R_{SIS} = e^{-91 \times 10^{-6} t}$$

- b) Sistema tolerante a fallas.

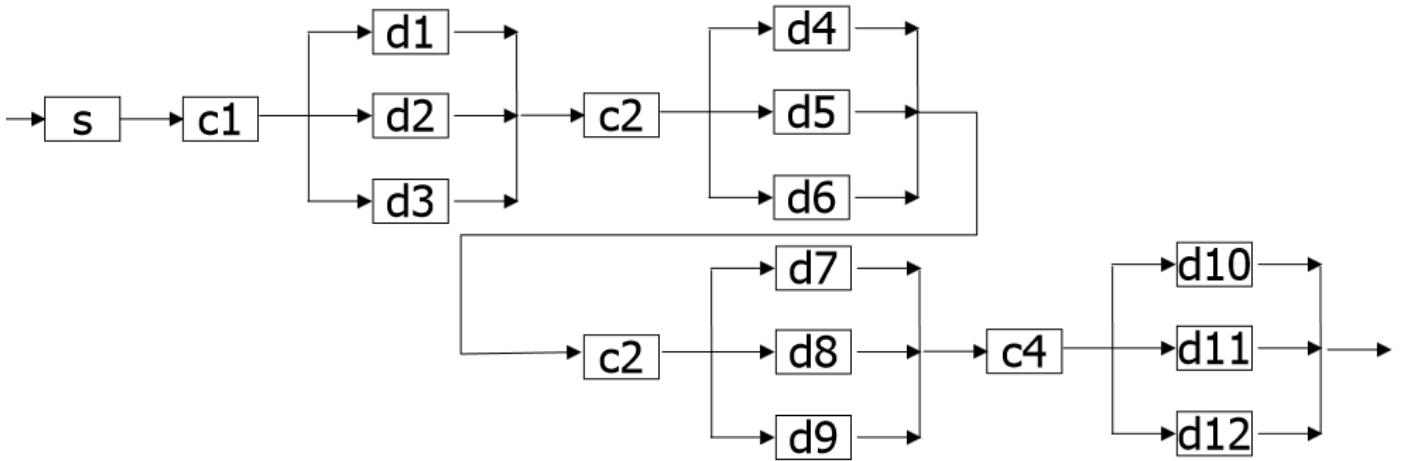
En este caso el sistema tiene en los discos un subsistema con redundancia 2 de 3 (con que funcionen 2 de los 3 discos por controlador, el sistema continúa cumpliendo su función).

Para un sistema k de n (con k=2 y n=3) tenemos:

$$\begin{aligned}
 R_S(t) &= \sum_{i=k}^n \binom{n}{i} R^i(t) (1 - R(t))^{n-i} \\
 R_{SubSD} &= \binom{3}{2} \times R^2(1 - R)^1 + \binom{3}{3} R^3(1 - R)^0 \\
 R_{SubSD} &= 3 R^2(1 - R) + R^3 = 3 R^2 - 2R^3 \\
 R_{SubSD} &= 3 e^{-2\lambda_D t} - 2e^{-3\lambda_D t} \\
 MTTF_{SubSD} &= \frac{3}{2\lambda} - \frac{2}{3\lambda} = \frac{5}{6\lambda} = \frac{5}{6} MTTF_D
 \end{aligned}$$

Diagrama de confiabilidad

Aclaración: Para que la redundancia utilizada asegure el cumplimiento de la función, debe agregarse un controlador y tres discos más a los que teníamos en el sistema sin redundancia.



Forma de cálculo abreviada y aproximada:

$$\lambda_{Sistema} = \lambda_{Server} + 4 \lambda_{Contr} + 4 \cdot 6/5. \lambda_{Disco} = 4 \cdot 10^{-5} + 4 \cdot 2 \cdot 10^{-6} + 4 \cdot 6/5 \cdot 5 \cdot 10^{-6} = 7,2 \cdot 10^{-5} \text{ 1/horas}$$

$$MTTF_{Sistema} = 13888,89 \text{ horas (muestra un incremento del 26,39% respecto del sistema no tolerante)}$$

Este último cálculo es como dijimos aproximado y nos permite hacer una rápida estimación de la mejora introducida, vamos a realizar ahora el cálculo completo.

Lo que siempre se cumple es que:  $R_{Sistema} = \prod_{i=1}^n R_i$

Recordemos que:  $\lambda_D = 5 * 10^{-6} \text{ 1/horas}$

$\lambda_C = 2 * 10^{-6} \text{ 1/horas}$

$\lambda_S = 40 * 10^{-6} \text{ 1/horas}$

Por lo tanto:

$$R_{Sistema} = e^{-40 \times 10^{-6} t} \times e^{-4 \times 2 \times 10^{-6} t} \times (3 e^{-2 \times 5 \times 10^{-6} t} - 2 e^{-3 \times 5 \times 10^{-6} t})^4$$

$$R_{Sistema} = e^{-48 \times 10^{-6} t} \times (3 e^{-10 \times 10^{-6} t} - 2 e^{-15 \times 10^{-6} t})^4$$

$$R_{Sistema} = e^{(-48-40) \times 10^{-6} t} \times (3 - 2 e^{-5 \times 10^{-6} t})^4$$

$$R_{Sistema} = e^{(-88) \times 10^{-6} t} \times (81 - 216 e^{-5 \times 10^{-6} t} + 216 e^{-10 \times 10^{-6} t} - 96 e^{-15 \times 10^{-6} t} + 16 e^{-20 \times 10^{-6} t})$$

$$R_{Sistema} = (81 e^{(-88) \times 10^{-6} t} - 216 e^{-93 \times 10^{-6} t} + 216 e^{-98 \times 10^{-6} t} - 96 e^{-103 \times 10^{-6} t} + 16 e^{-108 \times 10^{-6} t})$$

$$MTTF_{Sistema} = \int_0^{\infty} R_{Sistema} dt$$

$$MTTF_{Sistema} = \left( \frac{81}{88} - \frac{216}{93} + \frac{216}{98} - \frac{96}{103} + \frac{16}{108} \right) \times 10^6$$

$$MTTF_{Sistema} = 0,0181 \times 10^6 = 18100 \text{ horas}$$

Como se puede apreciar la forma abreviada nos había dado un valor menor. El hecho es que en realidad el  $\lambda$  equivalente hallado para el caso del subsistema 2 de 3 ( $\lambda_{2 \text{ de } 3} = 6/5 \lambda_D$ ) es una

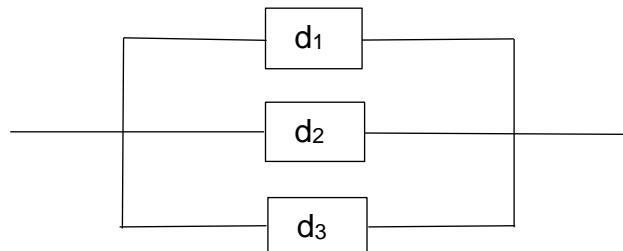
aproximación que d<sup>a</sup> valores aceptables cuando no aparecen varios en serie. Lo que sucede es que el R<sub>2 de 3</sub> no es una exponencial simple, sino una suma de ellas, lo que hace que al elevarlo a distintas potencias (en este caso a la 4) la aproximación diverja, siendo solo recomendable como un cálculo inicial.

### Otra manera de calcular la confiabilidad de un sistema 2 de 3.

Otra forma de ver el problema de la confiabilidad de un sistema que permite fallas en algunos de sus componentes es la siguiente:

Partimos de d<sub>1</sub>, d<sub>2</sub>, d<sub>3</sub> idénticos.

Si dos de los tres dispositivos funcionan, se logra que la función del conjunto se cumpla.



1. Enumeramos los casos disyuntos de funcionamiento correcto.

1.1. Los tres funcionan => R<sup>3</sup>(t)

1.2. Funcionan d<sub>1</sub> y d<sub>2</sub>, d<sub>3</sub> dañado => R<sup>2</sup> (1-R)

1.3. Funcionan d<sub>1</sub> y d<sub>3</sub>, d<sub>2</sub> dañado => R<sup>2</sup> (1-R)

1.4. Funcionan d<sub>2</sub> y d<sub>3</sub>, d<sub>1</sub> dañado => R<sup>2</sup> (1-R)

Llegado a este punto sumamos las probabilidades de todos los casos favorables:

$$R_{Subs}(t) = R^3(t) + 3 R^2(t) (1-R(t)) = R^3 + 3 R^2 - 3 R^3 = 3 R^2(t) - 2 R^3(t)$$

Si R(t) es exponencial => R<sub>Subs</sub>(t) = 3 e<sup>-2λt</sup> - 2 e<sup>-3λt</sup>

$$MTTF_{Subs} = \int_0^{\infty} 3 e^{-2\lambda t} dt = \frac{3}{2\lambda}$$

$$MTTF_{Subs} = \frac{3}{2\lambda} - \frac{2}{3\lambda} = \frac{5}{6\lambda} = \frac{5}{6} \times MTTF_i$$

## Confiabilidad de RBD (Reliability Block Diagrams) básicos.

### Modelo Serie

Para un solo equipo => R<sub>A</sub>

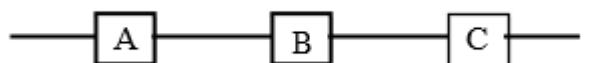


Para dos equipos => R<sub>2 serie</sub> = R<sub>A</sub> . R<sub>B</sub>

$$\text{Si } A=B \Rightarrow R_{2 \text{ serie}} = R^2$$



Para tres equipos => R<sub>3 serie</sub> = R<sub>A</sub> . R<sub>B</sub> . R<sub>C</sub>



Para n equipos => R<sub>serie</sub> = Π<sub>i=1</sub><sup>n</sup> R<sub>i</sub>

## Modelos de conexión en paralelo

En este caso hay varias opciones.

### a) Equipos en paralelo siempre activos

Llamamos  $Q$  a la probabilidad de que no funcione y  $R$  a la probabilidad de que funcione (confiabilidad), como:

$$R+Q=1 \Rightarrow Q=1-R$$

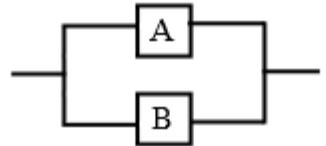
Como para que el sistema deje de funcionar deben hacerlo A y B =>

$$Q=Q_A+Q_B= (1-R_A) (1-R_B) = 1-R_A-R_B+R_A R_B$$

Pero  $R=1-Q$  =>

$$R= R_A+R_B-R_A R_B$$

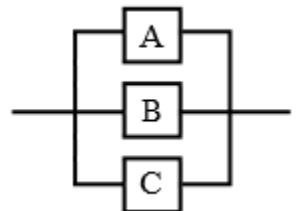
$$\text{Si } R_A=R_B=R \Rightarrow R_{\text{paral.}}= 2R-R^2$$



Para 3 equipos en paralelo con confiabilidades  $R_A$   $R_B$   $R_C$

$$R= R_A+R_B+R_C-R_A R_B-R_A R_C-R_C R_B+R_A R_B R_C$$

Para  $n$  equipos se cumple que:



$$Q_{\text{paralelo}} = \prod_{i=1}^n Q_i$$

Siendo  $Q=1-R$  y  $Q_i=1-R_i$

### b) Equipos en paralelo con uno activo y otro en reserva con un switch

El switch S detecta una falla en el elemento que se encuentra operativo y de manera instantánea comuta desde el elemento que falló al elemento



en reserva. A su vez el switch puede fallar de dos maneras diferentes.

- a. Falla cuando se requiere su conmutación  $Q_{S1}$
- b. Conmuta sin que se halla solicitado (p.ej. prematuramente)  $Q_{S2}$

Supongamos que el equipo maestro es A. Además  $Q_{S1} = 1 - R_{S1}$  y  $Q_{S2} = 1 - R_{S2}$   
Podemos entender la confiabilidad del sistema como una probabilidad condicional:

$$P = P(\text{sistema func. con A trabajando}) R_A + P(\text{sistema func. con A bajo falla}) (1-R_A)$$

$$P(\text{sistema func. con A trabajando}) = R_{S2} + (1-R_{S2}) R_B$$

$$P(\text{sistema func. con A bajo falla}) = R_{S1} R_B$$

$$R_{\text{sistema}} = R_{S2} R_A + (1-R_{S2}) R_B R_A + R_{S1} R_B (1-R_A)$$

$$R_{\text{sistema}} = R_{S2} R_A + R_B R_A - R_{S2} R_B R_A + R_{S1} R_B - R_A R_{S1} R_B$$

$$\boxed{R_{\text{sistema}} = R_B R_A (1 - R_{S1} - R_{S2}) + R_{S2} R_A + R_{S1} R_B}$$

*Como puede verse la confiabilidad del switch entra directamente en la del sistema.*

## Confiabilidad del Software

La confiabilidad del Hardware fue introducida como una disciplina durante la Segunda Guerra Mundial para evaluar la probabilidad de éxito de los cohetes balísticos. Ya en la década del 60, la ingeniería de confiabilidad había evolucionado como una parte integral del desarrollo de productos tanto comerciales como en aplicaciones profesionales.

La disciplina de la fiabilidad del software es mucho más joven. Se inició a mediados de los '70 cuando el desarrollo del soft alcanzó una razonable estabilidad. Muchos modelos de confiabilidad se desarrollaron en esa época. Sin embargo a fines de los '80 surgieron nuevas tecnologías, conceptos y paradigmas, los que continúan en este siglo y obligan a repasar algunas metodologías.

Existen diferentes definiciones acerca de la confiabilidad en Ingeniería del Software. En general se la describe como la probabilidad de que un software operando bajo determinadas condiciones dentro de un rango de entradas designadas lo haga sin fallas.

Por lo tanto, la confiabilidad del software se define como la probabilidad que el software no causará ninguna falla en el sistema, en un intervalo de tiempo, bajo condiciones específicas.

Esta probabilidad es función de las entradas en uso del sistema, como así también de las fallas latentes del software. Las entradas al sistema pueden ser finalmente determinantes en que alguna falla latente sea encontrada durante la operación del sistema.

**Existen varias diferencias en el tratamiento de la confiabilidad en hard y soft:**

- a) La edad del software no tiene relación con la tasa de fallas. Si un soft trabajaba en el pasado, este trabajará en el futuro si no hay cambios de hard o interfaces.
- b) La frecuencia de uso del soft no influye en su confiabilidad. El mismo soft puede usarse una y otra vez. Si no falló la primera vez no tendría porque fallar luego (para el mismo rango de entradas y sin cambios en el sistema). En contraste con esto, las partes físicas envejecen y se desgastan con el uso, resultando en fallas.
- c) El software se convierte en obsoleto cuando una interface estándar evoluciona y el hardware se convierte en anticuado.
- d) Con excepción de la documentación y de los medios de almacenamiento y transferencia, a diferencia del hardware, el soft no puede ser tocado ni retenido.
- e) El software no puede ser inspeccionado de manera previa a su uso.
- f) El software debe ser ajustado con el hardware antes de poder ser probado. Si una falla ocurre esta podría ser de hard, de soft o de alguna interacción no deseada en la interface entre ambos.
- g) En general (aunque no siempre) el hardware anda o no, mientras que el software además de las fallas totales, tiene variados grados de éxito acorde con su complejidad y aplicación.

h) Aunque no es ejecutable, la documentación es considerada como parte integral del software. Una documentación que no sea completa o exacta en la descripción de la operación puede ser considerada como una falla. Por ejemplo cuando un usuario no encuentra una ayuda online que él esperaba, el soft para él deja de ser totalmente confiable. este constituye el punto más débil de muchos proyectos, quizás porque el soft se termina la final del mismo, cuando queda muy poco tiempo, quedando resumida a comentarios al final de las líneas de código.

Admitidas estas diferencias, veamos ahora algunos aspectos similares:

1. La confiabilidad del hardware es una función de la complejidad del equipo. Intuitivamente uno podrá esperar que para el software suceda lo mismo.
2. Los elementos electrónicos de estado sólido, si son adecuadamente fabricados y utilizados, no presentan mecanismos de desgaste que puedan ser observados durante un largo periodo de tiempo. Los defectos que causan fallas, (mas allá de obvias aplicaciones o usos incorrectos) son incorporados durante la fabricación del elemento. Lo mismo sucede para el software.
3. La confiabilidad del hardware puede mejorarse mediante ensayos. Por ejemplo mediante test que analicen y corrijan fallas y mecanismos que podrían causar fallas tempranas. Esto es similar a encontrar y eliminar bugs en un soft incrementando su fiabilidad.

## Tipos de fallas en el software.

Algunos programadores y desarrolladores utilizan los términos *defecto*, *bug*, *avería* y *falla* de manera indistinta. Sin embargo otros autores definen estos términos de la siguiente manera:

- *Error*: Una equivocación hecha por el programador o un team de software que causa la ocurrencia de un problema.
- *Bug*: Error o defecto que encontramos dentro de un programa o software.
- *Defecto*: Un problema que podría causar que un programa falle o que produzca un resultado incorrecto.
- *Avería*: Otra palabra muy usada. Comúnmente definida como la manifestación de un error.

Otra clasificación se basa en separar los defectos en clases:

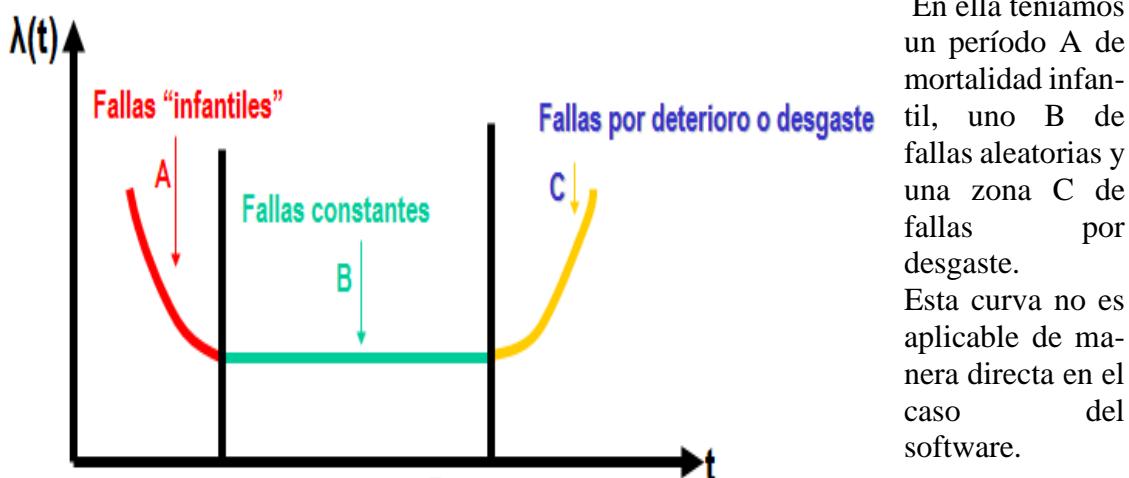
- I. Defectos en los requerimientos.
- II. Defectos en el diseño.
- III. Defectos en el código.

También podrían considerarse los siguientes:

- IV. Defectos en el algoritmo.
- V. Defectos en las interfaces.
- VI. Defectos en la documentación.
- VII. Defectos en el rendimiento.

## Consideraciones en el ciclo de vida

En la confiabilidad del hardware es común asumir que la tasa de fallas sigue la curva de la bañera:



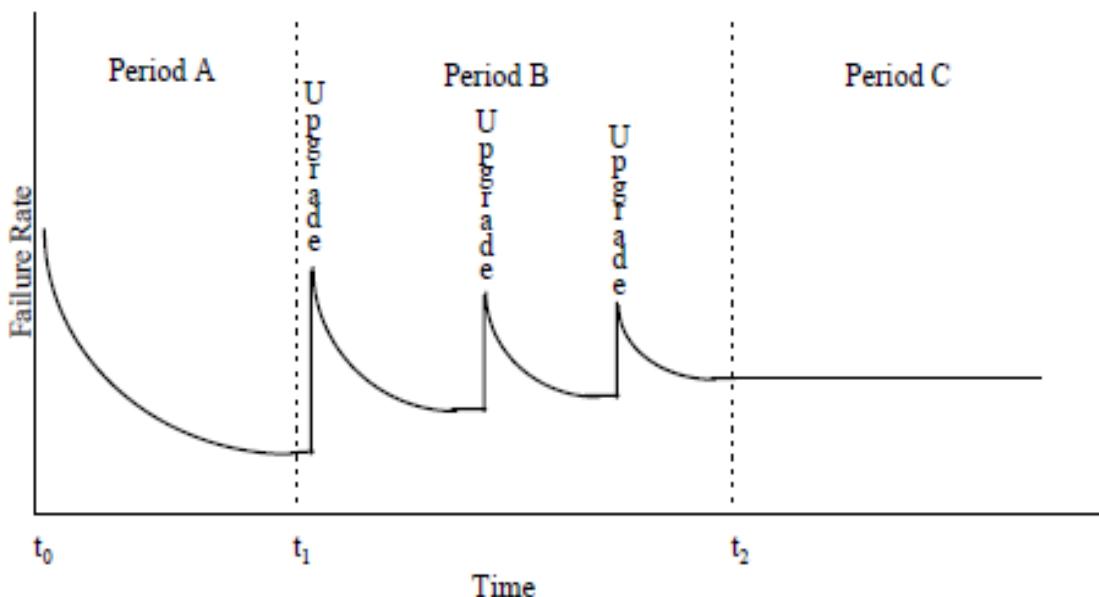
De hecho ya hemos dicho que el soft no sufre desgaste. Sin embargo si el ciclo de vida del hardware es considerado como el ciclo del desarrollo del soft hasta el lanzamiento y comercialización, la curva puede ser análoga hasta  $t_2$ .

Tenemos entonces que para el soft los instantes de tiempo típicos son:

- 1)  $t_0$  instante en el que se inicia el test. El período A desde  $t_0$  a  $t_1$  es considerado la fase de "debug". Los errores de codificación (mejor dicho los errores hallados y corregidos) o de operación que no están acorde con las especificaciones son identificados y corregidos. Esta es una diferencia clave entre el hard y el soft. El "clock" es distinto. **Los tiempos de desarrollo/test NO se incluyen en los cálculos de confiabilidad del hard y SI se incluyen para el soft.**
- 2)  $t_1$  momento en que se inicia la distribución. Las fallas que ocurren durante el período B ( $t_1$  a  $t_2$ ), son encontradas o bien por usuarios o por test posteriores a la distribución. Para estos errores, subsecuentemente se efectúan nuevas versiones (no necesariamente en correspondencia con cada error reportado).
- 3)  $t_2$  es el momento en el cual se alcanza el final de la vida útil. Muchos errores reportados durante el período C, luego de  $t_2$  muestran la incapacidad del soft para reunir los cambios necesarios para satisfacer las necesidades del cliente. En este marco de referencia, el soft está todavía funcionando cumpliendo las especificaciones originales y no es considerado como que está fallado, pero la especificación ya no se considera adecuada para satisfacer las necesidades actuales. El software ha alcanzado el fin de su vida útil. Los reportes de falla del período C pueden ser las bases para la generación de los requerimientos de un nuevo sistema.

Usualmente los upgrades de hard se realizan en el periodo A, cuando las fallas iniciales identifican necesidades de cambio. Por otro lado en el caso del software, las actualizaciones/ upgrades ocurren durante los Períodos A y B. Luego el período B no es realmente una línea plana para el soft, sino más bien contiene varios miniciclos de Períodos A y B: se lanza un upgrade, muchos de los errores introducidos durante este se identifican y se corrigen, luego se realizan otros Upgrades y así sucesivamente. Aunque la tasa de falla cae después de cada upgrade en el Período B, este puede no alcanzar el nivel logrado en el desarrollo inicial (en  $t_1$ ). Desde que cada upgrade representa un mini ciclo de desarrollo, las modificaciones pueden introducir nuevos defectos en otras partes del software no relacionadas directamente con la modificación en sí. Frecuentemente una actualización se focaliza en los nuevos requerimientos y su testeo no necesariamente engloba el sistema completo. Además la implementación de nuevos requerimientos puede impactar de forma adversa con el diseño original. Este escenario ocurre muchas veces en sistemas heredados, los cuales entraron en el Período C, desencadenando grandes esfuerzos de reingeniería.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, la siguiente es una curva que representaría mejor el ciclo de vida del software.



Otras diferencias entre el hard y el soft pueden ser:

- El concepto de selección de componentes no es adaptable al soft, por el hecho que todas las copias son iguales.
- Típicamente no lo afectan ni los factores ambientales ni las cargas.

Sin embargo sí pueden ser afectados otros factores de calidad, como ser la velocidad de ejecución ya que un usuario final puede considerar que un programa lento, no cumple los requerimientos.

## Modelos de predicción y estimación de la confiabilidad de un software.

Los modelos de fiabilidad de software se utilizan generalmente con dos propósitos: **predicción** y **estimación**.

Los modelos de predicción utilizan datos históricos para sistemas similares mientras que los de estimación usan datos obtenidos durante el test del programa a evaluar. Por lo tanto los modelos de predicción son menos precisos que los de estimación.

El objetivo de los modelos de predicción es justamente predecir la potencial tasa de fallas de manera temprana en el desarrollo del programa. Esta potencial confiabilidad permite mejorar la gestión en el manejo del software antes de comenzar con el codificado y las pruebas.

Por otro lado el objetivo de los procesos de estimación es determinar número de fallas remanentes en el soft justo antes del testeo final; lo que permitiría determinar la longitud de los test a efectuar.

### COMPARACION ENTRE MODELOS DE PREDICCION Y ESTIMACION

	PREDICCIÓN	ESTIMACION
DATOS UTILIZADOS	Datos historicos	Datos provenientes del actual desarrollo de soft.
CUANDO SE USA?	Etapas previas del desarrollo, antes de los test. Incluso en fase conceptual.	Avanzado en el ciclo de vida cuando ya se obtuvieron datos. No en fase conceptual.
QUE DA?	Predice fiabilidad en algun momento futuro.	Estima la fiabilidad tanto presente como futura.

### Modelos de Predicción

El modelo de predicción mas básico que existe, consistiría en utilizar los datos internos de la organización basados en similares. Sin embargo este recurso solo queda reservado a organizaciones con experiencia previa en soft de la misma naturaleza. Desarrollaremos otro modelo un poco mas técnico, no siendo esto para nada excluyente de distintos desarrollos que puedan incluso ser mas aplicables en determinados casos particulares.

#### Modelo de MUSA o del Tiempo de Ejecución

Desarrollado por John Musa de los laboratorios Bell en los '70, fue uno de los primeros modelos de predicción de la confiabilidad del software.

Predice la intensidad inicial de las fallas. Estas fallas por unidad de tiempo inicial, es una función de las no conocidas pero estimadas fallas esperadas, N en un tiempo infinito.

La ecuación para efectuar la predicción es:

$$\lambda_0 = k \cdot p \cdot w_0$$

Todos los tiempos utilizados son de ejecución.

$k$  = es una constante cuantizada para la estructura dinámica del programa y de las máquinas.

=  $4,2 \times 10^{-7}$  valor adoptado si no se conoce expresamente para el caso.

$p$  = estima el número de ejecuciones por unidad de tiempo.

=  $r/SLOC/ER$

$r$  = promedio de la velocidad de ejecución de instrucciones, determinado por el fabricante o por benchmarking.

SLOC = líneas de código fuente. (no se incluye código reusado)

ER Assembler: 1

Macroassembler: 1,5

C: 2,5

COBOL, FORTRAN: 3

ADA: 4,5

$w_0$  = Estimación del número inicial de fallas en el programa. Puede ser calculado utilizando

$w_0 = N \cdot B$

Por default se puede asumir 6 fallas/ 1000 SLOC.

$N$  = número total de defectos inherentes. Se estima basándose en anteriores experiencias o utilizando criterio.

$B$  = Proporción de defectos que se convierten en fallas. Proporción de defectos no corregidos antes de la distribución. Se puede asumir 95%.

Resulta importante hacer notar que el tiempo medido es el de ejecución y no el calendario.

Ejemplo: Se tiene un programa en FORTRAN de 100 líneas (SLOC) con un promedio de ejecución de 150 líneas por segundo. Hallar su tasa de fallas  $\lambda_0$  antes de comenzar el test del sistema.

$$\begin{aligned}\lambda_0 &= k \cdot p \cdot w_0 = k \cdot \frac{r}{SLOC/ER} \cdot w_0 \\ &= 4,2 \cdot 10^{-7} \cdot 150 / (100/3) \cdot 6 / 1000 = 1,26 \cdot 10^{-9} \text{ f/sec}\end{aligned}$$

Lo que equivale a decir una falla cada  $7,936 \cdot 10^8$  segundos, o una falla cada 25,16 años.

## Modelos de estimación

Los modelos para conteo de fallas y para tasa de fallas son las técnicas más comunes para estimación. Los modelos de conteo de fallas incluyen técnicas basadas en distribuciones exponenciales, Weibull y también en el teorema de Bayes.

### Modelos con distribución exponencial

En general los modelos exponenciales asumen que el soft se halla en estado operacional y que todas las fallas que se presentan son independientes entre sí. Partimos de lo siguiente:

El tiempo hasta que se produce una avería por una falla individual ( $t$ ) sigue una distribución exponencial:

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

Con una forma general para la confiabilidad:

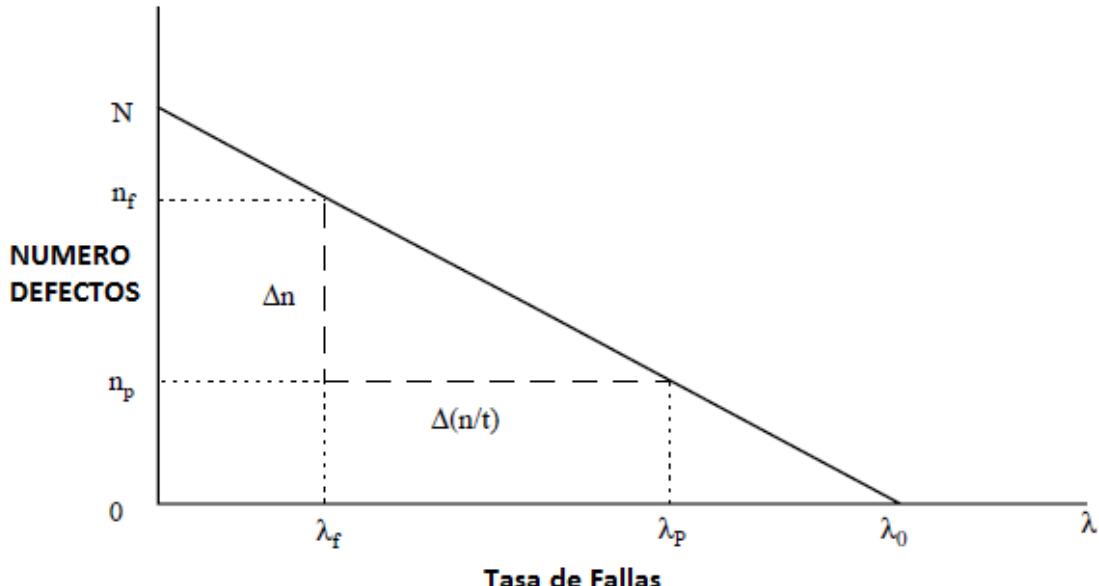
$$R(t) = e^{-\lambda t}$$

Y el tiempo medio hasta la siguiente falla:

$$MTTF = 1/\lambda$$

La notación que vamos a utilizar en el caso general de distribución exponencial es la siguiente:

N: número total de defectos.  
 n: número de defectos actual.  
 c: número de defectos actualmente corregidos.  
 N-n: Defectos aún no manifestados.  
 N-c: Defectos a ser corregidos.  
 $n_f$ : Fallas contadas.  
 $\lambda_f$ : Tasa de fallas.  
 $t_f$ : Tiempo futuro.  
 $N_p$ : fallas contadas hasta el presente.  
 $\lambda_p$ : Tasa de fallas hasta el presente.  
 $t_p$ : tiempo actual o presente.



La mayor desventaja que presenta es que no puede ser utilizado de manera temprana en el desarrollo del soft ya que requiere que el mismo se halle operativo, por lo tanto no sirve para tener una aproximación inicial del la fiabilidad del software que se está desarrollando.

Existen varios modelos basados en la distribución exponencial, entre ellos el de Musa y el de Shooman.

### Modelo exponencial general

El modelo asume que todos los errores son iguales en severidad y probabilidad de detección y que c/u es corregido de manera inmediata una vez detectado.

La tasa de fallas  $\lambda$  está directamente relacionada con el número de fallas remantes en el soft. Esto es  $\lambda$  es una función del número de errores corregidos  $c$ :  $\lambda = k(N-c)$ .

Donde  $k$  es una constante de proporcionalidad que puede estimarse a partir de la pendiente del ploteo de la tasa de fallas observada vs. Número de fallas corregidas.

La proyección del número de fallas que se necesitan detectar para alcanzar la tasa de fallas final  $\lambda_f$  está dada por:

$$\Delta n = (1/k) \cdot \lambda_p / \lambda_f$$

La proyección del tiempo necesario para alcanzar el  $\lambda_f$  está dada por:

$$\Delta t = (1/k) \cdot \ln(\lambda_p / \lambda_f)$$

La mayor desventaja de esta aproximación es que los defectos no solo deben ser detectados, sino también corregidos.

Cuando se realiza la depuración de un programa, la finalización de dicho proceso puede ocurrir por tres causas:

- a) Se ha alcanzado una meta prefijada.
- b) La tasa de remoción de errores se hace muy baja y se requiere mucho esfuerzo (tiempo) para encontrar una mejora.
- c) El proceso de depuración siembra más errores de los que corrige.

La finalización por metas puede hacerse fijando una TMEF por errores de software y aplicando el modelo de Shooman que es un caso particular del modelo exponencial.

### Modelo de Shooman

El modelo de Shooman es similar al modelo exponencial general excepto que cada falla está normalizada por las líneas de código. (número de las mismas).

El modelo propuesto por Shooman es:

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

Con una tasa de fallas proporcional a la tasa residual de errores :

$$\varepsilon_r(\zeta) = \varepsilon_T - \varepsilon_c(\zeta)$$

Donde  $\varepsilon_T$  es la tasa de errores totales y  $\varepsilon_c(\zeta)$  es la tasa de corrección de errores que depende de la cantidad de errores corregidos al cabo del tiempo  $\zeta$

$\zeta \rightarrow E_c(\zeta)$        $\varepsilon_c(\zeta) = E_c(\zeta)/I_T$       donde  $I_T$  es el número de sentencias o instrucciones  
Por lo tanto

$$R(t) = e^{-k \varepsilon_r(\zeta) t} = e^{-k(\varepsilon_T - \varepsilon_c(\zeta)) t}$$

El modelo implica que con mayor tiempo de depuración  $\zeta$  aumenta la fiabilidad.

Para aplicarlo hay que conocer  $\varepsilon_T$  y la constante  $k$ , pues  $\varepsilon_c$  resulta del proceso y ello solo puede hacerse corriendo el programa y evaluando el tiempo de ejecución hasta que aparezca un error. Dado que tenemos 2 incógnitas necesitamos contar con 2 errores para hacer una primera estimación.

Supongamos que en  $n$  ejecuciones falló  $r$  veces y tuvo  $(n-r)$  ejecuciones exitosas. Sea  $T_i$  el tiempo de una ejecución exitosa y  $t_j$  el de una fallida. Las horas totales de funcionamiento serán.

$$H = \sum_{i=1}^{n-r} T_i + \sum_{j=1}^r t_j$$

Si el modelo de fallas es exponencial, el tiempo medio entre fallas estará dado por :

$$TMEF_i = 1/\lambda_i = H/r$$

El valor de  $TMEF_i$  va aumentando con cada corrida. El modelo de Shooman supone que luego de un tiempo  $\zeta$  se alcanza un :

$$TMEF = \frac{1}{k[\frac{E_T}{I_T} - \varepsilon_c(\zeta)]}$$

Contando con dos determinaciones se pueden calcular los valores de  $k$  y  $E_T$  que son los parámetros invariables del modelo:

$$\frac{H_1}{r_1} = \frac{1}{\lambda_1} = \frac{1}{k[\frac{E_T}{I_T} - \varepsilon_c(\zeta_1)]} \quad ; \quad \frac{H_2}{r_2} = \frac{1}{\lambda_2} = \frac{1}{k[\frac{E_T}{I_T} - \varepsilon_c(\zeta_2)]}$$

En estas expresiones  $H_i$  es el tiempo acumulado de ejecución durante el cual han aparecido  $r_i$  fallas, luego de haberse corregido  $\varepsilon_c(\zeta_i)$  errores:

$$\hat{E}_T = \frac{\left[ \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right] E_c(\tau_1) - E_c(\tau_2)}{\frac{\lambda_2}{\lambda_1} - 1} \quad \hat{k} = \lambda_1 \cdot \frac{I_T}{\hat{E}_T - E_c(\tau_1)}$$

Con sucesivas correcciones, los valores estimados de  $k$  y  $E_T$  deberían tener poca

fluctuación con  $\tau$ , caso contrario el modelo sería invalido.

Para determinar el tiempo medio entre fallas, es necesario conocer, además de los dos parámetros del modelo, la tasa de errores detectados,

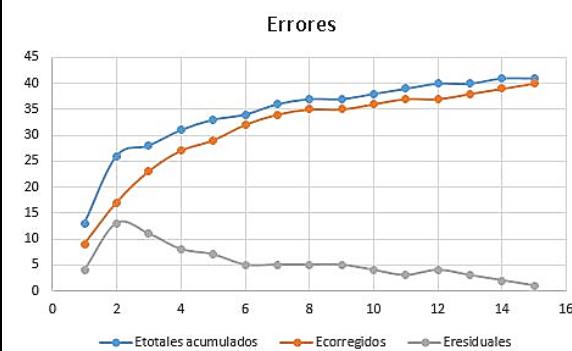
La ventaja del método de Shooman es que al normalizar los errores por línea de código se ajusta muy bien para cambios en el tamaño del producto de software y su desventaja proviene también de ello, o sea debo usarlo en las etapas finales del desarrollo del soft dado que debo conocer el número de LOC (líneas de código).

Ejemplo de aplicación:

Utilizaremos los principios vistos para desarrollar un ejemplo de estimación del tiempo medio a la falla.

Los siguientes datos están basados en el software de un proyecto de un sistema de localización.

Semanas	Etotales acumulados	Ecorregidos	Eresiduales
1	13	9	4
2	26	17	13
3	28	23	11
4	31	27	8
5	33	29	7
6	34	32	5
7	36	34	5
8	37	35	5
9	37	35	5
10	38	36	4
11	39	37	3
12	40	37	4
13	40	38	3
14	41	39	2
15	41	40	1



Como se puede apreciar con mayor tiempo de depuración, la cantidad de errores residuales disminuye, siguiendo una exponencial negativa. Cabe aclarar, que en la realidad el programa puede seguir teniendo algunos errores no detectados, que no se manifestaron durante las pruebas.

Para poder hallar los parámetros del modelo, es necesario efectuar pruebas de funcionamiento que nos revelen los tiempos de ejecución sin errores y aquellos donde el programa mostró falencias.

Adaptamos lo visto en el modelo de Shooman y en el exponencial general para calcular los parámetros que nos interesan.

Semanas	Etotales acumulados	Ecorregidos	Eresiduales	H(hrs)	$\lambda$	$\lambda_2/\lambda_1$	$E_{\text{Tot}}$	k
1	13	9	4	168	0,0774			
2	26	17	13	336	0,0774	1		
3	28	23	11	504	0,0556	0,7179	38,273	0,0023
4	31	27	8	672	0,0461	0,8304	46,579	0,0023
5	33	29	7	840	0,0393	0,8516	40,478	0,0022
6	34	32	5	1008	0,0337	0,8586	50,214	0,0023
7	36	34	5	1176	0,0306	0,9076	53,636	0,0024
8	37	35	5	1344	0,0275	0,8993	43,931	0,0024
9	37	35	5	1512	0,0245	0,8889	35	0,0021
10	38	36	4	1680	0,0226	0,9243	48,214	0,0021
11	39	37	3	1848	0,0211	0,933	50,929	0,0022
12	40	37	4	2016	0,0198	0,9402	37	0,002
13	40	38	3	2184	0,0183	0,9231	50	0,0021
14	41	39	2	2352	0,0174	0,9518	58,741	0,0023
15	41	40	1	2520	0,0163	0,9333	54	0,0024

Valores adoptados 47 0,00223

Analizamos los datos y adoptamos los valores que representan de manera adecuada a la muestra, desecharando las inestabilidades no representativas del comportamiento el software.

Con esto podemos calcular el  $\lambda$  estimado para nuestro software como:

$$\lambda = k \cdot E_r$$

Y obtenemos  $\lambda = 0,00222559$  y un MTTF estimado de 449,31 hs.

Si estos valores no satisfacen las metas de confiabilidad planteadas para el proyecto, deberíamos continuar con la depuración.

Siempre es necesario considerar que las prácticas en la industria para productos de consumo establecen que si el costo para alcanzar a resolver una falla es demasiado alto respecto del impacto que posee la resolución del problema en cuanto a su fiabilidad, la depuración se debe dar por finalizada. En otras palabras, no tiene sentido insumir excesivos recursos para resolver fallas que resultan poco probables en la vida útil del equipamiento bajo condiciones normales de operación.

# Mantenibilidad

*Diseño de Equipos Electrónicos*

*ITBA*

# Introducción

La función de mantenibilidad en el diseño se ocupa de definir todos los aspectos relacionados con la sostenibilidad en servicio de los equipos.

Dado que la falla de los elementos es aleatoria, los tiempos insumidos en la reparación deberán ser evaluados en forma probabilística.

Mantenibilidad, se define como la probabilidad de que un equipo que entró en falla pueda ser reparado en un tiempo dado, contando con recursos y procedimientos definidos.

# Introducción

La función de mantenibilidad en el diseño se ocupa de definir todos los aspectos relacionados con la sostenibilidad en servicio de los equipos.

Dado que la falla de los elementos es aleatoria, los tiempos insumidos en la reparación deberán ser evaluados en forma probabilística.

Mantenibilidad, se define como la probabilidad de que un equipo que entró en falla pueda ser reparado en un tiempo dado, contando con recursos y procedimientos definidos.

# Introducción

La función de mantenibilidad en el diseño se ocupa de definir todos los aspectos relacionados con la sostenibilidad en servicio de los equipos.

Dado que la falla de los elementos es aleatoria, los tiempos insumidos en la reparación deberán ser evaluados en forma probabilística.

Mantenibilidad, se define como la probabilidad de que un equipo que entró en falla pueda ser reparado en un tiempo dado, contando con recursos y procedimientos definidos.

# Introducción

La función de mantenibilidad en el diseño se ocupa de definir todos los aspectos relacionados con la sostenibilidad en servicio de los equipos.

Dado que la falla de los elementos es aleatoria, los tiempos insumidos en la reparación deberán ser evaluados en forma probabilística.

Mantenibilidad, se define como la probabilidad de que un equipo que entró en falla pueda ser reparado en un tiempo dado, contando con recursos y procedimientos definidos.

Los recursos dependen de:

Capacitación del personal.

Disponibilidad de repuestos.

Instrumental y bancos de prueba.

Documentación (manual de servicio).

# Introducción

La función de mantenibilidad en el diseño se ocupa de definir todos los aspectos relacionados con la sostenibilidad en servicio de los equipos.

Dado que la falla de los elementos es aleatoria, los tiempos insumidos en la reparación deberán ser evaluados en forma probabilística.

Mantenibilidad, se define como la probabilidad de que un equipo que entró en falla pueda ser reparado en un tiempo dado, contando con recursos y procedimientos definidos.

Los recursos dependen de:

Capacitación del personal.

Disponibilidad de repuestos.

Instrumental y bancos de prueba.

Documentación (manual de servicio).

**La mantenibilidad se evalúa considerando la condición más favorable y por lo tanto sólo entran en consideración los aspectos propios del equipo.**

# Introducción (cont.)

## ■ Mantenibilidad vs. Mantenimiento.

- Mantenibilidad, es una característica del equipo. Es una probabilidad.
- Mantenimiento, es una actividad desarrollada para reponer en servicio un equipo depende del sistema o estructura de mantenimiento.
  
- El estudio de la mantenibilidad busca:
  - Definir acciones que permitan aumentar la fiabilidad y la disponibilidad.
  - Determinar las acciones de mantenimiento y los procedimientos en la etapa de diseño.
  - Incrementar la serviciabilidad.
  - Prevenir que la reparación lleve a fallas secundarias.
  - Definir acciones preventivas que eviten la entrada en falla.
  - Prever la forma de no degradar la **seguridad** del equipo, durante las tareas de mantenimiento, ni a posteriori.

# Introducción (cont.)

- Mantenibilidad vs. Mantenimiento.
  - Mantenibilidad, es una característica del equipo. Es una probabilidad.
  - Mantenimiento, es una actividad desarrollada para reponer en servicio un equipo depende del sistema o estructura de mantenimiento.
- El estudio de la mantenibilidad busca:
  - Definir acciones que permitan aumentar la fiabilidad y la disponibilidad.
  - Determinar las acciones de mantenimiento y los procedimientos en la etapa de diseño.
  - Incrementar la serviciabilidad.
  - Prevenir que la reparación lleve a fallas secundarias.
  - Definir acciones preventivas que eviten la entrada en falla.
  - Prever la forma de no degradar la **seguridad** del equipo, durante las tareas de mantenimiento, ni a posteriori.

# Introducción (3)

Para poder usarla en la práctica de ingeniería, la definición anterior de mantenibilidad debe ser expresada numéricamente. De esta forma, las características cualitativas deben ser «traducidas» en medidas cuantitativas.

Se puede expresar en términos de factores de frecuencia de mantenimiento, tiempo empleado en mantenimiento y costo del mantenimiento.

Estos términos pueden ser presentados como características diferentes; por lo tanto, la mantenibilidad puede definirse según una combinación de factores.

# Introducción (4)

**Una característica de diseño e instalación, expresada como la probabilidad** de que un elemento sea conservado o recuperado en una condición especificada, a lo largo de un período dado del tiempo empleado en el mantenimiento, cuando éste se realiza de acuerdo con los procedimientos y recursos prescritos [MIL-STD-721B, DoD, 1966 USA].

**Una característica de diseño e instalación, expresada como la probabilidad** de que no se necesitará mantenimiento más de x veces en un período dado, cuando se opera el sistema de acuerdo con procedimientos prescritos.

**Una característica de diseño e instalación, expresada como la probabilidad** de que el costo de mantenimiento de un sistema no supere una cantidad de dinero especificada, cuando se opera el sistema de acuerdo con procedimientos prescritos.

# Introducción (4)

Una característica de diseño e instalación, expresada como la probabilidad de que un elemento sea conservado o recuperado en una condición especificada, a lo largo de un período dado del tiempo empleado en el mantenimiento, cuando éste se realiza de acuerdo con los procedimientos y recursos prescritos [MIL-STD-721B, DoD, 1966 USA].

**Una característica de diseño e instalación, expresada como la probabilidad de que no se necesitará mantenimiento más de x veces en un período dado, cuando se opera el sistema de acuerdo con procedimientos prescritos.**

Una característica de diseño e instalación, expresada como la probabilidad de que el costo de mantenimiento de un sistema no supere una cantidad de dinero especificada, cuando se opera el sistema de acuerdo con procedimientos prescritos.

# Introducción (4)

**Una característica de diseño e instalación, expresada como la probabilidad** de que un elemento sea conservado o recuperado en una condición especificada, a lo largo de un período dado del tiempo empleado en el mantenimiento, cuando éste se realiza de acuerdo con los procedimientos y recursos prescritos [MIL-STD-721B, DoD, 1966 USA].

**Una característica de diseño e instalación, expresada como la probabilidad** de que no se necesitará mantenimiento más de x veces en un período dado, cuando se opera el sistema de acuerdo con procedimientos prescritos.

**Una característica de diseño e instalación, expresada como la probabilidad** de que el costo de mantenimiento de un sistema no supere una cantidad de dinero especificada, cuando se opera el sistema de acuerdo con procedimientos prescritos.

# Acciones de Mantenimiento

## Mantenimiento proactivo:

- Preventivo (recurrentes y programadas) :
  - Por inspección.
  - Por recambio.
  - Por recalibración y conservación.
- Predictivo
  - Por verificación (recurrentes, programables ).
  - Por alarma (recurrentes, no programables ).
- Pasivo ( no recurrentes)

## Mantenimiento reactivo (Forzosas, no programadas) :

- Mantenimiento correctivo (recurrente)
- Mantenimiento curativo ( no recurrente )

# Acciones de Mantenimiento

Mantenimiento proactivo:

- Preventivo (recurrentes y programadas) :
  - Por inspección.
  - Por recambio.
  - Por recalibración y conservación.
- Predictivo
  - Por verificación (recurrentes, programables ).
  - Por alarma (recurrentes, no programables ).
- Pasivo ( no recurrentes)

Mantenimiento reactivo (Forzosas, no programadas) :

- Mantenimiento correctivo (recurrente)
- Mantenimiento curativo ( no recurrente )

# Acciones de Mantenimiento

Mantenimiento proactivo:

- Preventivo (recurrentes y programadas) :
  - Por inspección.
  - Por recambio.
  - Por recalibración y conservación.
- Predictivo
  - Por verificación (recurrentes, programables ).
  - Por alarma (recurrentes, no programables ).
- Pasivo ( no recurrentes)

Mantenimiento reactivo (Forzosas, no programadas) :

- Mantenimiento correctivo (recurrente)
- Mantenimiento curativo ( no recurrente )

# Mantenimiento proactivo

Se asienta en acciones de prevención o monitoreo.  
Intenta anticiparse a la aparición de las fallas.  
Busca minimizar costos y grado de afectación al servicio.  
Mejora la fiabilidad y/o disponibilidad.  
Evita los perjuicios de una falla súbita a través del cambio periódico de partes sometidas a desgastes de cualquier tipo, para evitar que el tiempo operativo no se vea afectado.  
Elimina o reduce el costo de inmovilización de repuestos.

Las acciones se dividen en:

- Activas
  - Acciones que deben ejecutarse sobre todos los equipos.
- Pasivas
  - Recomendaciones a tener en cuenta para la instalación u operación, según el ambiente en que deba operar el equipo o sistema.
  - Evita que su costo sea trasladado a todos los equipos, aún para aquellos que funcionan en ambientes muy benignos y controlados.

# Mantenimiento proactivo

Se asienta en acciones de prevención o monitoreo.

Intenta anticiparse a la aparición de las fallas.

Busca minimizar costos y grado de afectación al servicio.

Mejora la fiabilidad y/o disponibilidad.

Evita los perjuicios de una falla súbita a través del cambio periódico de partes sometidas a desgastes de cualquier tipo, para evitar que el tiempo operativo no se vea afectado.

Elimina o reduce el costo de inmovilización de repuestos.

**Las acciones se dividen en:**

- Activas
  - Acciones que deben ejecutarse sobre todos los equipos.
- Pasivas
  - Recomendaciones a tener en cuenta para la instalación u operación, según el ambiente en que deba operar el equipo o sistema.
  - Evita que su costo sea trasladado a todos los equipos, aún para aquellos que funcionan en ambientes muy benignos y controlados.

# Mantenimiento Preventivo

Las tareas de mantenimiento preventivo activo son tareas que se realizan periódicamente sobre los sistemas tendientes a prolongar el tiempo libre de falla.

En este mantenimiento existen varias acciones principales:

- Reemplazo de elementos
  - Con síntomas de desgaste.
  - Cuya probabilidad de fallas  $F(t)$  aumenta luego de transcurrido cierto tiempo.
  - Se aplica generalmente a las actividades vinculadas con elementos mecánicos sujetos a desgaste o fatiga.
- Conservación
  - Incluye todas las tareas de mantenimiento programadas para conservar al sistema o producto en una determinada condición.
- Reajuste o recalibración
  - Mantiene al equipo dentro de su especificación.
  - Previene fallas paramétricas.

# Mantenimiento Preventivo

Las tareas de mantenimiento preventivo activo son tareas que se realizan periódicamente sobre los sistemas tendientes a prolongar el tiempo libre de falla.

En este mantenimiento existen varias acciones principales:

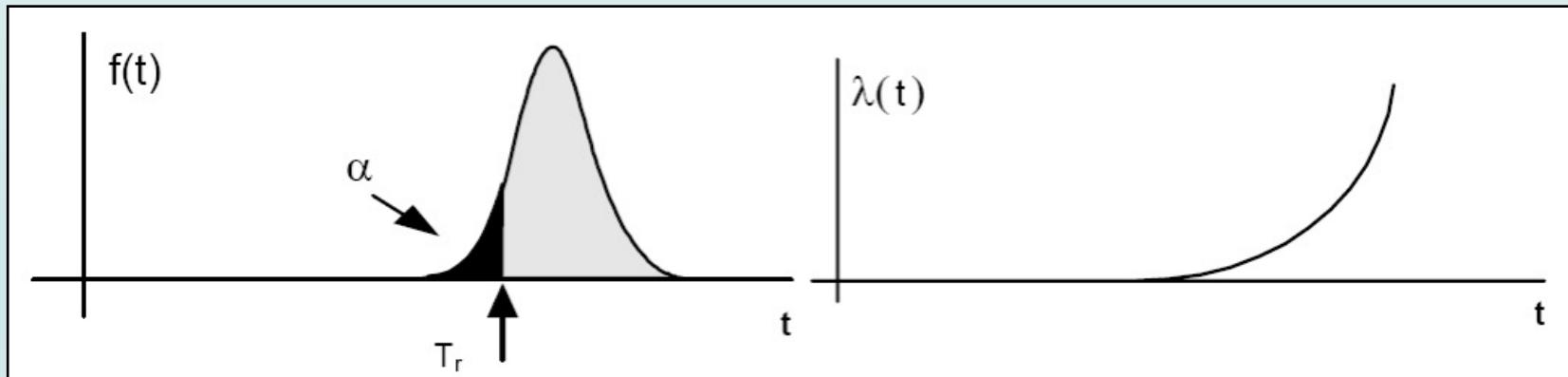
- Reemplazo de elementos
  - Con síntomas de desgaste.
  - Cuya probabilidad de fallas  $F(t)$  aumenta luego de transcurrido cierto tiempo.
  - Se aplica generalmente a las actividades vinculadas con elementos mecánicos sujetos a desgaste o fatiga.
- Conservación
  - Incluye todas las tareas de mantenimiento programadas para conservar al sistema o producto en una determinada condición.
- Reajuste o recalibración
  - Mantiene al equipo dentro de su especificación.
  - Previene fallas paramétricas.

# Mantenimiento Preventivo

## Reemplazo de elementos

Se justifica cuando la función de densidad de fallas  $f(t)$  asociada a una parte o elemento del equipo es de tipo normal y de muy poca dispersión.

Adoptando un riesgo  $\alpha$ , resultará un tiempo para el reemplazo de dicho elemento ( $T_r$ )

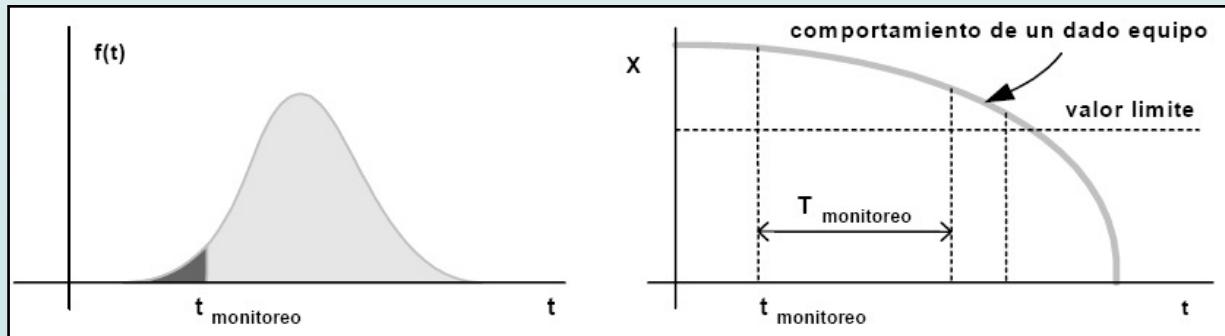


# Mantenimiento Preventivo

## Monitoreo

Cuando la dispersión es grande, es más conveniente monitorear periódicamente algún parámetro X correlacionado con la falla que sirva de indicio.

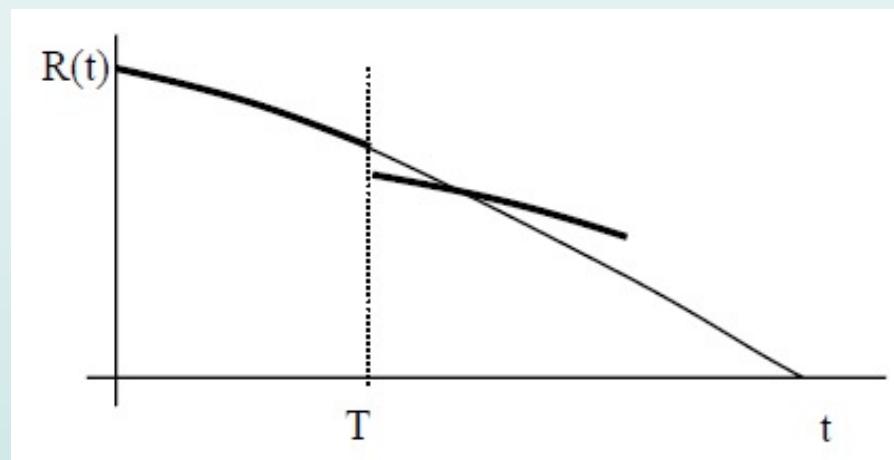
Aplicándose en tal caso una acción de mantenimiento predictivo.



# Mantenimiento Preventivo Imperfecto

Contempla la posibilidad de daño de algún componente al momento de realizar la intervención.

Siendo  $p$  la probabilidad de falla, la fiabilidad queda determinado por:



Aparece un compromiso entre la mejora que se produce con cada intervención al reemplazar componentes sujetos a desgaste y la degradación que resulta de una intervención imperfecta.

# Mantenimiento Predictivo

Mantenimiento basado fundamentalmente en detectar una falla antes de que suceda, para dar tiempo a corregirla sin perjuicios al servicio, ni detención de la producción, etc. Estos controles pueden llevarse a cabo de forma periódica o continua, en función de tipos de equipo, sistema productivo, etc.

Para ello, se usan instrumentos de diagnóstico y pruebas no destructivas, como análisis de lubricantes, comprobaciones de temperatura de equipos eléctricos, mediciones de vibraciones, etc.

# Mantenimiento Predictivo

Mantenimiento basado fundamentalmente en detectar una falla antes de que suceda, para dar tiempo a corregirla sin perjuicios al servicio, ni detención de la producción, etc. Estos controles pueden llevarse a cabo de forma periódica o continua, en función de tipos de equipo, sistema productivo, etc.

Para ello, se usan instrumentos de diagnóstico y pruebas no destructivas, como análisis de lubricantes, comprobaciones de temperatura de equipos eléctricos, mediciones de vibraciones, etc.

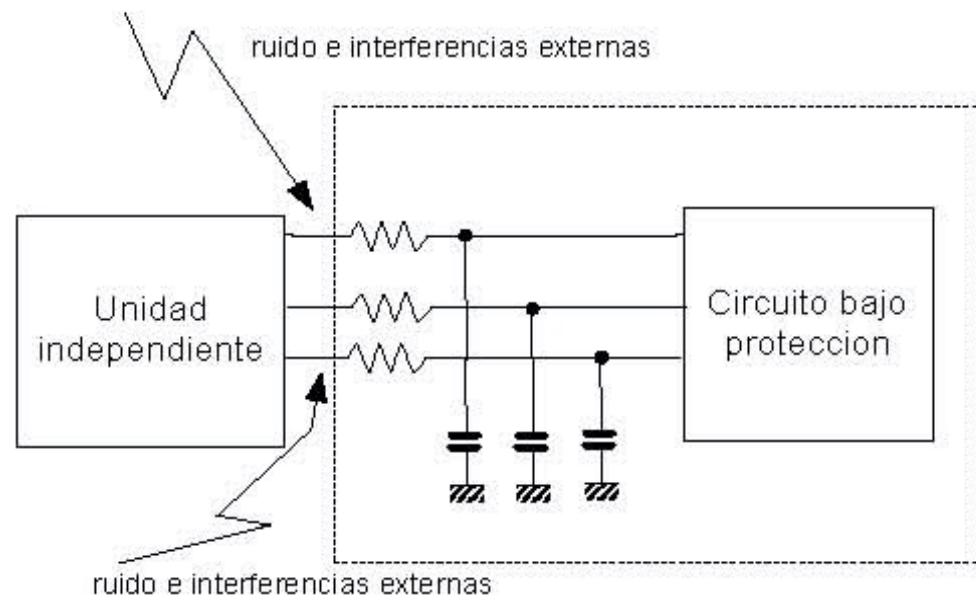
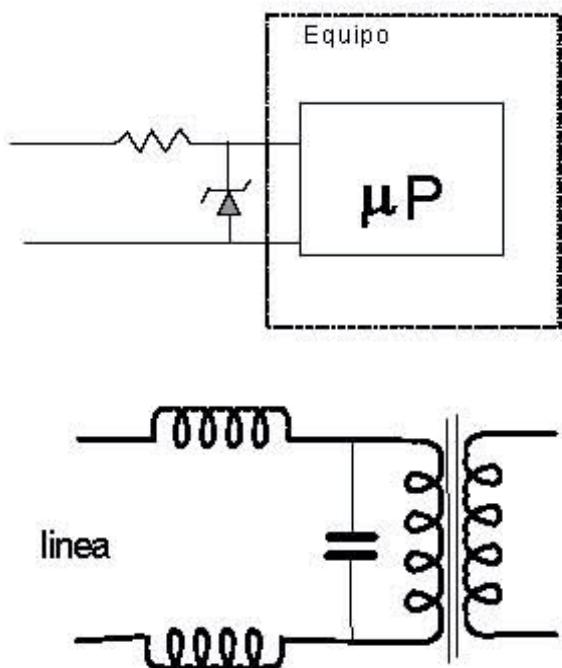
# Ventajas del Mantenimiento Predictivo

- Permite seguir la evolución de un defecto en el tiempo.
- Optimiza la gestión del personal de mantenimiento.
- La verificación del estado de la maquinaria, tanto realizada de forma periódica como de forma accidental, permite confeccionar un archivo histórico del comportamiento mecánico.
- Conocer con exactitud el tiempo límite de actuación que no implique el desarrollo de un fallo imprevisto.
- Confección de normas internas de funcionamiento o compra de nuevos equipos.
- Permitir el conocimiento del historial de actuaciones, para ser utilizada por el mantenimiento correctivo.
- Facilita el análisis de las averías.
- Permite el análisis estadístico del sistema.

# Mantenimiento Pasivo

El mantenimiento Preventivo Pasivo incluye todas las medidas para proteger al equipo de su entorno.

Se lo llama Pasivo porque no se actúa en forma directa sobre el equipo.



# Mantenimiento Reactivo

Se acciona luego que la falla aparezca.

# Mantenimiento Curativo

# Mantenimiento Correctivo

# Mantenimiento Curativo

Sobre la primera serie de equipos que es lanzada al mercado es necesario hacer un seguimiento especial de las primeras fallas que se presentan. Esto implica efectuar un análisis previo a cualquier acción correctiva, cuyo propósito es determinar si corresponde una acción de mantenimiento normal, o si es necesario introducir acciones curativas.

Serán necesarias acciones de tipo curativo cuando:

Las fallas escapan a las predicciones basadas en el modelo ( se concentran en uno o pocos elementos, y ocurren en una cantidad superior a la esperada ).

La falla tiene suficiente relevancia para ser crítica, afectando la **seguridad**.

Las fallas son consecuencia de error humano, pero susceptibles de ser evitadas por rediseño.

La falla es causada por otros equipos, o condiciones de entorno que escapan a las especificadas o previstas en el diseño.

Las acciones curativas buscan generar cambios en el diseño para evitar la repetición de fallas que responden a las características anteriores.

# Mantenimiento Curativo

Sobre la primera serie de equipos que es lanzada al mercado es necesario hacer un seguimiento especial de las primeras fallas que se presentan. Esto implica efectuar un análisis previo a cualquier acción correctiva, cuyo propósito es determinar si corresponde una acción de mantenimiento normal, o si es necesario introducir acciones curativas.

**Serán necesarias acciones de tipo curativo cuando:**

Las fallas escapan a las predicciones basadas en el modelo ( se concentran en uno o pocos elementos, y ocurren en una cantidad superior a la esperada ).

La falla tiene suficiente relevancia para ser crítica, afectando la **seguridad**.

Las fallas son consecuencia de error humano, pero susceptibles de ser evitadas por rediseño.

La falla es causada por otros equipos, o condiciones de entorno que escapan a las especificadas o previstas en el diseño.

Las acciones curativas buscan generar cambios en el diseño para evitar la repetición de fallas que responden a las características anteriores.

# Mantenimiento Correctivo

**Mantenimiento Primario:** Se trata de remover en el menor tiempo posible un módulo que contiene el elemento fallado, para sustituirlo por otro sin detenerse a aislar el elemento específico en falla, valiéndose para ello de elementos de diagnóstico apropiados.

**Mantenimiento Secundario:** Sigue al mantenimiento primario. Se realiza sobre los módulos que han sido removidos en el mantenimiento primario, apoyándose en instrumental y un banco de pruebas, ejecutándose en un lugar normalmente alejado de donde se produjo la falla.

Es mas fácil reconocer un módulo en falla que el elemento que la provoca.

El módulo, normalmente enchufable, puede ser removido y ser reemplazado en muy corto tiempo; no es este el caso de un elemento que está soldado sobre una placa de impreso.

# Mantenimiento Correctivo

**Mantenimiento Primario:** Se trata de remover en el menor tiempo posible un módulo que contiene el elemento fallado, para sustituirlo por otro sin detenerse a aislar el elemento específico en falla, valiéndose para ello de elementos de diagnóstico apropiados.

**Mantenimiento Secundario:** Sigue al mantenimiento primario. Se realiza sobre los módulos que han sido removidos en el mantenimiento primario, apoyándose en instrumental y un banco de pruebas, ejecutándose en un lugar normalmente alejado de donde se produjo la falla.

Es más fácil reconocer un módulo en falla que el elemento que la provoca. El módulo, normalmente enchufable, puede ser removido y ser reemplazado en muy corto tiempo; no es este el caso de un elemento que está soldado sobre una placa de impreso.

# Mantenimiento Correctivo

**Mantenimiento Primario:** Se trata de remover en el menor tiempo posible un módulo que contiene el elemento fallado, para sustituirlo por otro sin detenerse a aislar el elemento específico en falla, valiéndose para ello de elementos de diagnóstico apropiados.

**Mantenimiento Secundario:** Sigue al mantenimiento primario. Se realiza sobre los módulos que han sido removidos en el mantenimiento primario, apoyándose en instrumental y un banco de pruebas, ejecutándose en un lugar normalmente alejado de donde se produjo la falla.

Es mas fácil reconocer un módulo en falla que el elemento que la provoca.

El módulo, normalmente enchufable, puede ser removido y ser reemplazado en muy corto tiempo; no es este el caso de un elemento que está soldado sobre una placa de impreso.

# Función Mantenibilidad

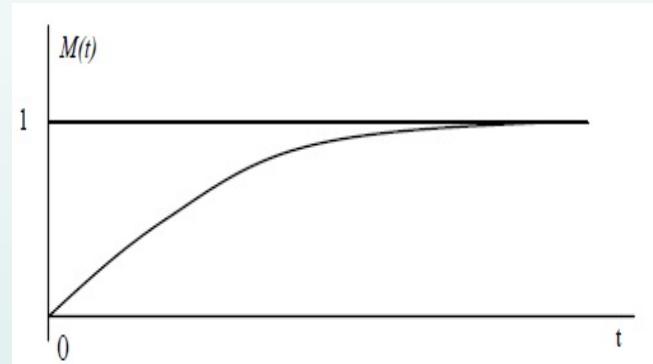
Siendo

$N_o$  : Número de equipos totales

$N_r(t)$  :Número de equipos reparados al tiempo t

La mantenibilidad al tiempo t queda determinada por:

$$M(t) = \frac{N_r(t)}{N_o}$$



La cantidad de equipos que pueden ser reparados en un intervalo de tiempo es:

$$\Delta N_r(t) = \mu(t). (N_o - N_r(t)) \Delta t$$

siendo  $\mu(t)$  la tasa de mantenibilidad

$$\frac{\Delta N_r(t)}{N_o} = \mu(t) \cdot \frac{(N_o - N_r(t))}{N_o} \cdot \Delta t$$

Operando sobre la expresión anterior, se llega a

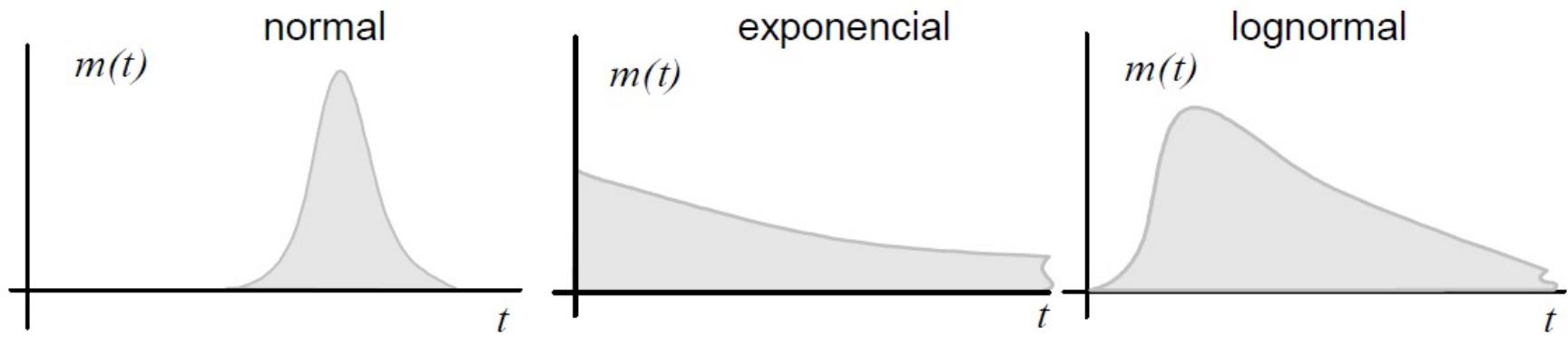
$$M(t) = 1 - e^{-\int_0^t \mu(t).dt}$$

$$m(t) = \frac{dM(t)}{dt} = \mu(t). [1 - M(t)]$$

Resultando el tiempo medio de reparación como:

$$TMR = E(t) = \int_0^\infty m(t).t.dt$$

# Cálculos de Mantenibilidad



ley normal

Tiempos determinados por acciones comunes con una leve fluctuación que depende del tipo de elemento.

Ej.: Tareas de desarmado y rearmado

modelo exponencial

La mayoría de las reparaciones demandan poco tiempo por disponer de un sistema de diagnóstico .

modelo lognormal

Existen muchas tareas de mantenimiento que requieren menos tiempo que la media. La mediana es menor que la media.

$$M(t) = 1 - e^{-\int_0^t \mu(t).dt} \quad m(t) = \frac{dM(t)}{dt} = \mu(t).[1 - M(t)] \quad TMR = E(t) = \int_0^\infty m(t).t.dt$$

# Cálculos de Mantenibilidad

## Distribución de Weibull

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t}{\eta} \right)^{\beta-1} \exp \left[ -\left( \frac{t}{\eta} \right)^\beta \right]$$

$\beta$  parámetro de forma

$\eta$  parámetro de escala o vida  
característica (63% población fallará)

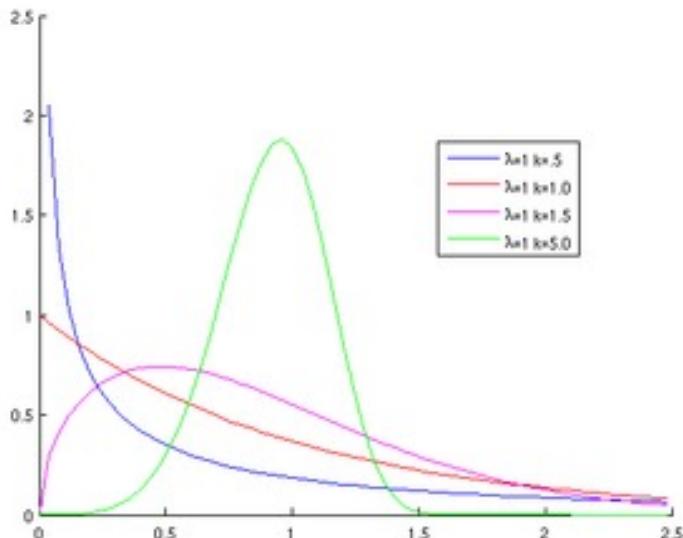
$\beta < 1$  Gamma

$\beta = 2$  Lognormal

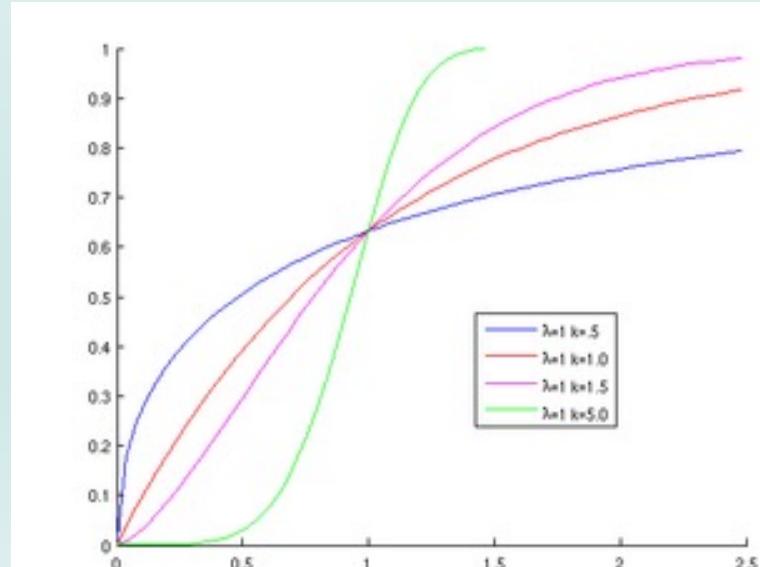
$\beta = 1$  Exponencial

$\beta = 3.5$  Normal aproximadamente

### Función de densidad de probabilidad

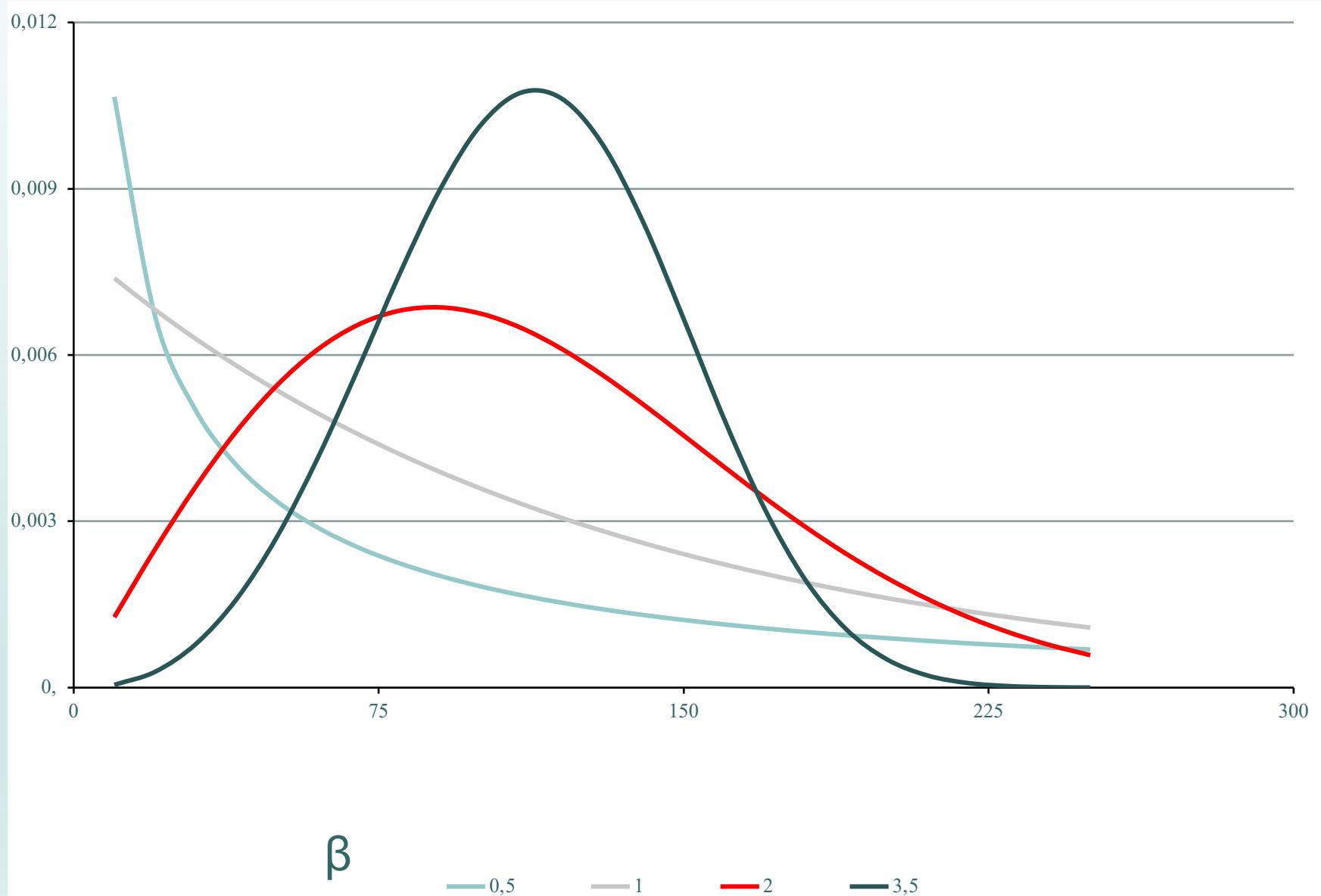


### Función de distribución acumulativa



# Cálculos de Mantenibilidad

## Función de Densidad de Distribución de Weibull



# Cálculos de Mantenibilidad

## Distribución de Weibull

Alumno i	Tiempo $t_i$	$M(t)$
1	230	0.0673
2	259	0.1635
3	279	0.2596
4	286	0.3558
5	321	0.4519
6	332	0.5481
7	351	0.6442
8	365	0.7404
9	397	0.8365
10	442	0.9327

Rango mediano

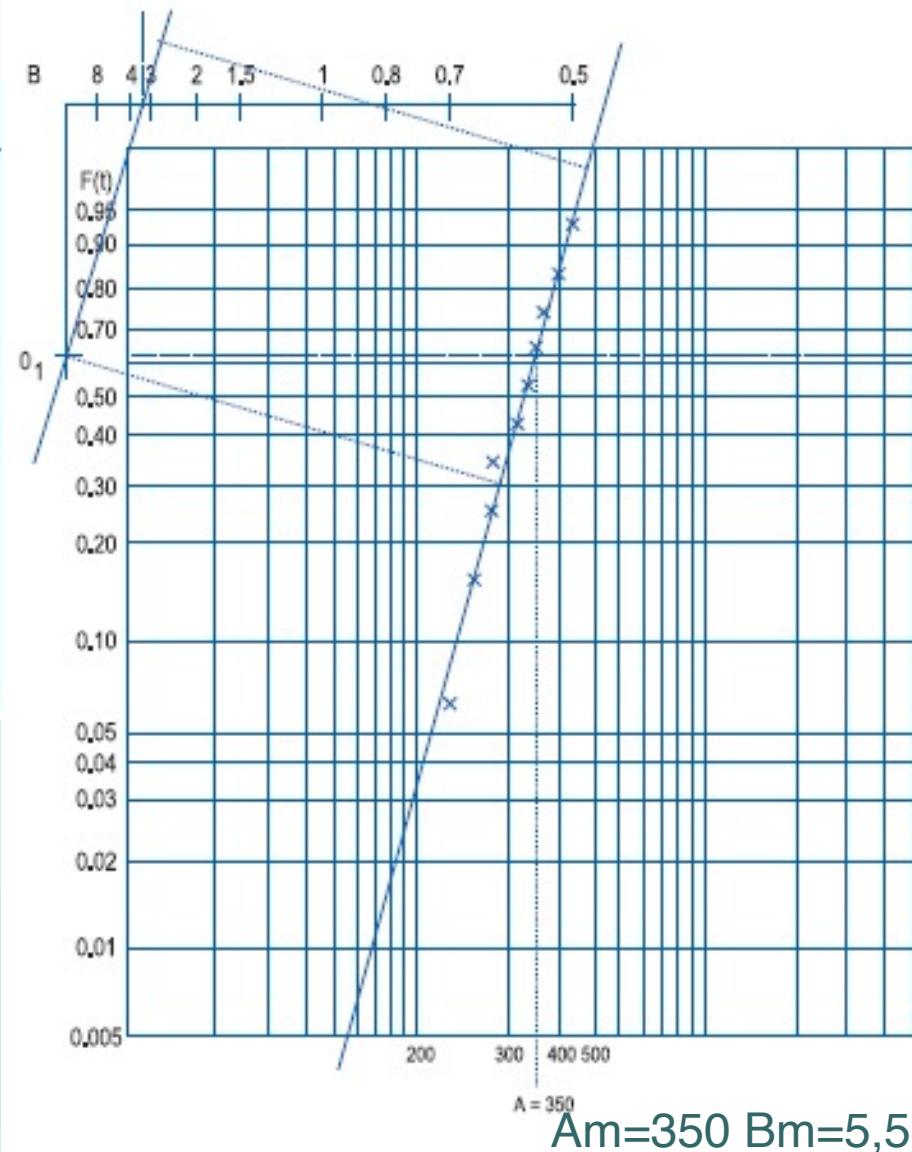
$$\text{Median Rank } (n,i) = \frac{i - 0.3}{n + 0.4}$$

where: n = number of failures

i = order number

$$E(\text{TTR}) = A_n \Gamma(1 + 1/B_n)$$

$$m(t) = \frac{\beta}{A_m} \cdot \left(\frac{t}{A_m}\right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{t}{A_m}\right)^\beta}$$



$$M(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{A_m}\right)^\beta}$$

# Cálculos de Mantenibilidad

## Ejemplo:

Tabla 1. Datos en bruto procedentes de las bitácoras de operación

Horómetro			
Comienzo	Final	Tiempo transcurrido en operación	Tiempo transcurrido en parada
0.0	706.2	706.2	
706.2	711.7		3.5
711.7	754.1	42.4	
754.1	754.7		0.6
754.7	1867.5	1112.8	
1867.5	1887.4		19.9
1887.4	2336.8	449.4	
2336.8	2348.9		12.1
2348.9	4447.2	2098.3	
4447.2	4452.0		4.8
4452.0	4559.6	107.6	
4559.6	4561.1		1.5
4561.1	5443.9	882.8	
5443.9	5450.1		6.2
5450.1	5629.4	179.3	
5629.4	5658.1		28.7
5658.1	7106.7	1450.6	
7106.7	7116.5		7.8
7116.5	7375.2	258.7	
7375.2	7384.9		9.7
7384.9	7952.3	567.4	
7952.3	7967.5		15.2
7967.5	8315.3	347.8	
8315.3	8317.8		2.5
	TOTAL =	8205.3	112.5
	MTBM =	683.8	
	MTTR =		9.4

- a)Calcular la mantenibilidad a los 10 horas y a los 30 horas
- b) Tiempo para el cual el 90% de las acciones de mantenimiento están completadas
- c) Probabilidad que el sistema se recupere en 24 horas
- d) Valor de la densidad a los 30 horas
- e) Tasa de reparación a los 30 horas
- f)Probabilidad de que la tarea de mantenimiento que no haya sido completada en las primeras 10 horas lo sea en las siguientes 24 horas
- g) Probabilidad de restituir el sistema en 8 horas o menos
- h) Calcular MTTR para que las reparaciones sean completadas en 8 horas o menos con un 90 % de probabilidad

# Disponibilidad

La disponibilidad ha sido definida como la probabilidad de que un equipo se encuentre operando, o en capacidad de operar, en un instante de tiempo  $t$  cualquiera partiendo de una condición inicial prefijada, que puede ser de funcionamiento, o desde un estado de falla.

Para equipos no reparables:

$$\text{DISPONIBILIDAD} = \text{FIABILIDAD}$$

Para equipos reparables:

$$\text{DISPONIBILIDAD} \neq \text{FIABILIDAD}$$

# Disponibilidad

La disponibilidad ha sido definida como la probabilidad de que un equipo se encuentre operando, o en capacidad de operar, en un instante de tiempo t cualquiera partiendo de una condición inicial prefijada, que puede ser de funcionamiento, o desde un estado de falla.

Para equipos **no reparables**:

$$\text{DISPONIBILIDAD} = \text{FIABILIDAD}$$

Para equipos **reparables**:

$$\text{DISPONIBILIDAD} \neq \text{FIABILIDAD}$$

# Disponibilidad intrínseca, efectiva y operativa

En un servicio de uso continuo, la disponibilidad es un factor que mide el máximo grado de utilización del equipo, dentro de su vida útil.

Este dependerá de que tiempos se consideren como de indisponibilidad del equipo.

$$A_i = \frac{TMEMc}{TMEMc + M_c}$$

Disponibilidad intrínseca o inherente

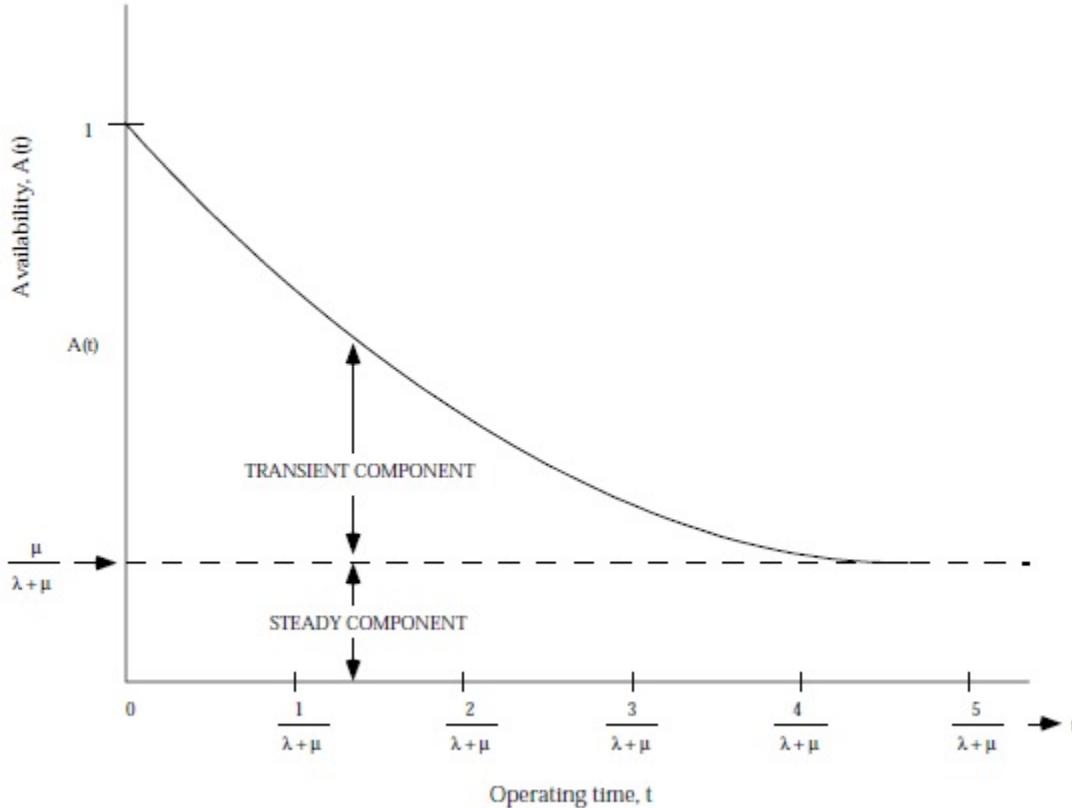
$$A_e = \frac{TMEM}{TMEM + p_c \cdot M_c + p_p \cdot M_p}$$

Disponibilidad efectiva

$$A_o = \frac{TMEM}{TMEM + p_c \cdot M_c + p_p \cdot M_p + p_c \cdot M_{AqLog}}$$

Disponibilidad operativa

# Disponibilidad



$$A(t) = P_0(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} - \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t}$$

$$\begin{aligned} A_m(t_2 - t_1) &= \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} A(t) dt = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} P_0(t) dt \\ &= \frac{\mu}{\lambda + \mu} - \frac{\lambda}{(\lambda + \mu)^2 T} \exp[-(\lambda + \mu)T] \end{aligned}$$

As  $\lambda = \frac{1}{MTBF}$  and  $\mu = \frac{1}{MTTR}$  the steady state availability becomes

$$A_s = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR}$$

Usually  $\mu$  is much larger in value than  $\lambda$ , and  $A_s$  may be written as

$$A_s = \frac{\mu}{\lambda + \mu} = \frac{1}{1 + \frac{\lambda}{\mu}}$$

$$A_s = \frac{1}{1 + \frac{\lambda}{\mu}} = 1 - \frac{\lambda}{\mu} + \frac{2}{\mu^2} - \dots \cong 1 - \frac{\lambda}{\mu}$$

# Disponibilidad

- Disponibilidad Alcanzada:

$$A_A = 1 - \frac{\text{Downtime}}{\text{Total Time}} = \frac{\text{Uptime}}{\text{Total Time}}$$

- Disponibilidad Intrínseca: no incluye tiempos administrativos ni logísticos.

$$A_i = \frac{\text{MTBF}}{\text{MTBF} + \text{MTTR}}$$

Ejemplo planta:

Tiempo total de operación= 8205,3 horas.

Tiempo de parada= 112,5 horas.

MTBM= 683,8 horas.

MTTR= 9,4 horas.

$$A_A = 1 - \frac{112,5}{8205,3}$$

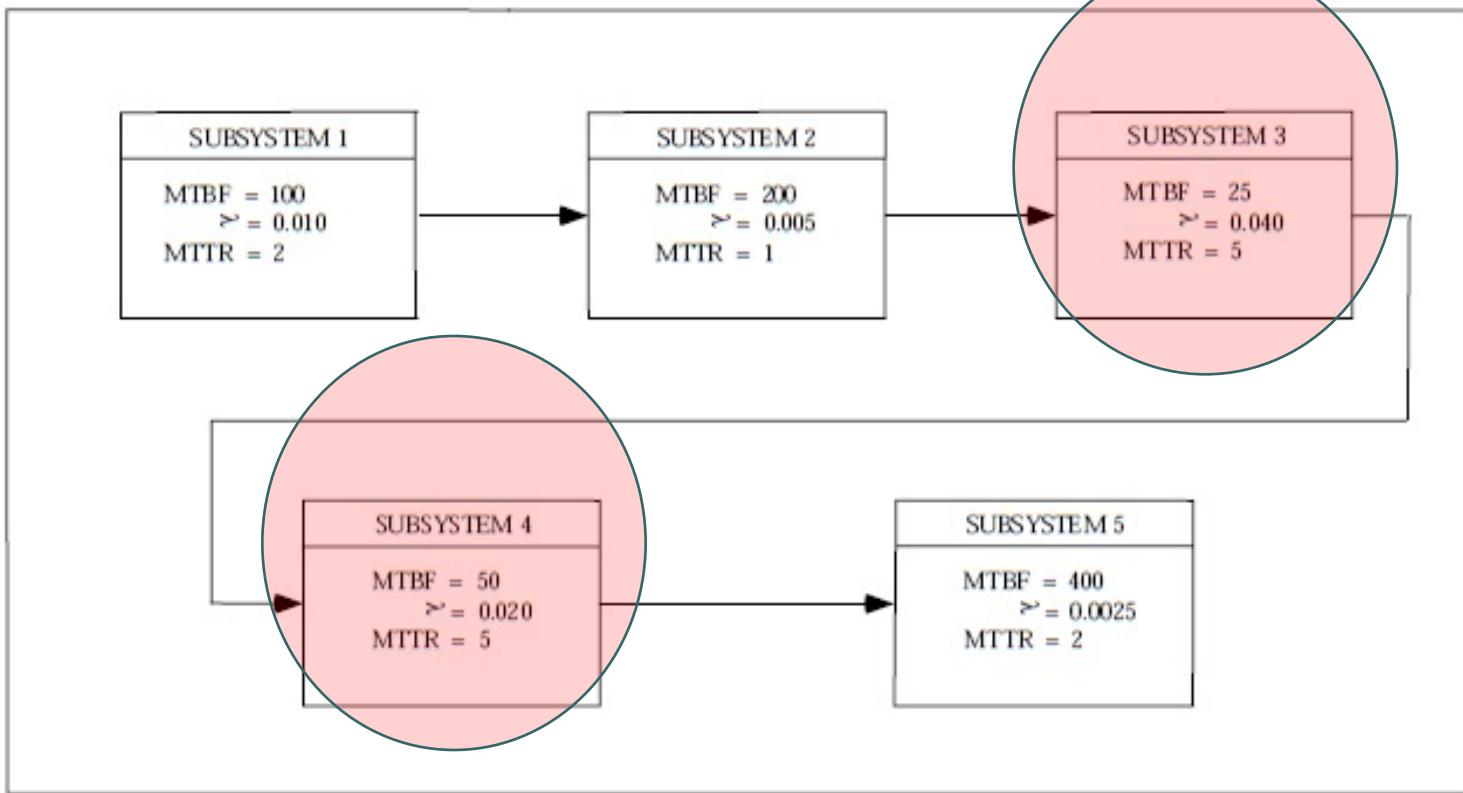
$$A_i = \frac{683,8}{683,8+9,4} = 0,986$$

# Disponibilidad

MIL HDBK 338B

$$\alpha = \text{MTTR/MTBF}$$

$$A_i = 1/(1+\alpha) = (1+\alpha)^{-1}$$



$$\text{MTBF} = (\sum \lambda_i)^{-1} = (0.0775)^{-1} = 12.9 \text{ hour}$$

$$\text{MTTR} = \sum \lambda_i (\text{MTTR})_i / \sum \lambda_i = 0.33(0.0775)^{-1} = 4.26 \text{ hr}$$

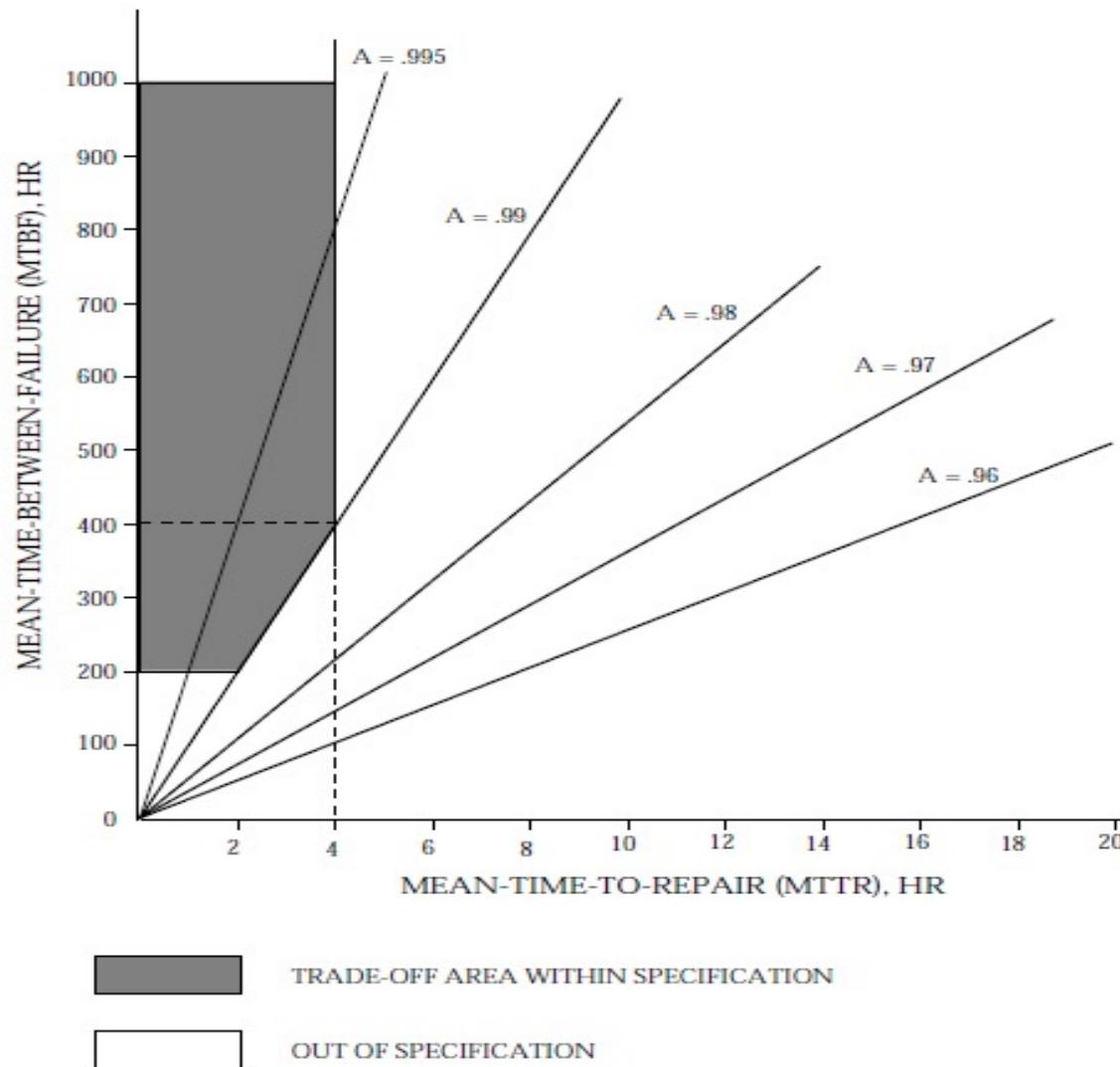
Since the maintenance time ratio equals

$$\alpha = 4.26(12.9)^{-1} = 0.33$$

$$\alpha = \sum \alpha_i = 2/100 + 1/200 + 5/25 + 5/50 + 2/400 = 0.33$$

$$A_i = [(1 + (4.26/12.9))]^{-1} = .752$$

# Disponibilidad



REQUIREMENT

$A = 99\%$

$MTBF = 200 \text{ HR MIN}$

$MTTR = 4 \text{ HR MAX}$

# Diagnosticabilidad

La diagnosticabilidad mide el conjunto de medios dispuestos en el equipo destinados al pronto reconocimiento de los elementos en falla, de modo de aislarlos y corregirlos en el menor tiempo posible. Cuando se la considera en el diseño, se habla de un **diseño orientado a la diagnosticabilidad**.

- Un equipo compuesto por  $N$  componentes dentro de los cuales se debe aislar un componente en falla, y supongamos que todos tengan igual probabilidad de falla. Si el método de prueba se basara en una comprobación secuencial, y cada comprobación insumiera un tiempo  $T_0$ , el tiempo necesario en media estaría dado por:  
$$T_c = \frac{N}{2} \cdot T_0$$
- Si se instrumenta un método mediante el cual cada prueba permite aislar la falla a la mitad de los componentes, entonces la cantidad de pruebas  $n$  quedaría reducida a:
- Por lo tanto:
- EFICIENCIA DEL METODO:

# Diagnosticabilidad

La diagnosticabilidad mide el conjunto de medios dispuestos en el equipo destinados al pronto reconocimiento de los elementos en falla, de modo de aislarlos y corregirlos en el menor tiempo posible. Cuando se la considera en el diseño, se habla de un **diseño orientado a la diagnosticabilidad**.

- Un equipo compuesto por  $N$  componentes dentro de los cuales se debe aislar un componente en falla, y supongamos que todos tengan igual probabilidad de falla. Si el método de prueba se basara en una comprobación secuencial, y cada comprobación insumiera un tiempo  $T_o$ , el tiempo necesario en media estaría dado por:  
$$Tc_1 = \frac{N}{2} \cdot T_o$$
- Si se instrumenta un método mediante el cual cada prueba permite aislar la falla a la mitad de los componentes, entonces la cantidad de pruebas  $n$  quedaría reducida a:  
$$2^n = N$$
- Por lo tanto:  
$$Tc_2 = \frac{\log(N)}{\log(2)} \cdot T_o$$
- EFICIENCIA DEL METODO:

$$\frac{Tc_1}{Tc_2} = \frac{\log(2)}{2} \cdot \frac{N}{\log(N)}$$

# Diagnosticabilidad

- Cuando los estados que puede tomar son pocos, puede ser de ayuda la incorporación de indicadores luminosos.
- Pero cuando son muchos, una de las mejores aproximaciones a este requerimiento es el BIST (*Built-in self-test*), también denominado BIT (*built-in test*).
- *El BIST incorpora capacidad de verificación en el mismo equipo*, actualmente favorecido dada la mayor incorporación de software dentro de los equipos, y la proliferación de dispositivos analógicos con interfaces de comunicación por buses.
- *Estos sistemas son además necesarios debido a que los defectos cada vez están mas ocultos (son más difíciles de detectar).*

# Capacitación y Experiencia

Se debe diferenciar entre capacitación, relacionado con un entrenamiento formal para la realización de una tarea, y nivel de experiencia vinculado con la habilidad desarrollada en el ejercicio de la misma.

Ambos factores inciden en el tiempo de ejecución de las tareas.

- Entender el funcionamiento del equipo
- Entender y manejar la documentación de mantenimiento
- Conocer cuales son las fallas mas frecuentes y aprender a resolverlas
- Saber llevar a cabo las acciones de mantenimiento preventivo
- Aprender a diagnosticar y reparar las fallas en general

Deberá apoyarse en un manual de capacitación para el mantenimiento.

# Evaluación Antropométrica de la Mantenibilidad

Algunos comportamientos típicos a tener en cuenta:

- Las personas ejecutan sus tareas asignadas mientras piensan en otras cosas.
- Tienden a usar sus manos para probar o examinar.
- Usualmente están muy impacientes para tomarse el tiempo necesario para observar las precauciones.
- Usualmente leen las instrucciones y rótulos con ligereza.
- Luego de ejecutar una tarea difícilmente realizan un chequeo para detectar errores.
- Generalmente responden de manera irracional en situaciones de emergencia.
- Son reacias a admitir equivocaciones.

# Evaluación antropométrica de la mantenibilidad

Algunos comportamientos típicos a tener en cuenta:

- Después de realizar **tareas peligrosas** por un **largo** período de **tiempo**, muchas personas comienzan a ser complacientes y menos cuidadosas.
- Las personas generalmente son **reticentes a admitir** que no ven claramente o no escuchan bien, sino que siempre será producto de una condición externa.
- Las personas a menudo **no hacen una buena estimación** subjetiva de las distancias, velocidades, iluminación o pesos.

# Modelos de Calidad del Software

- El esfuerzo de Mantenimiento de Software se podría reducir si se produce software nuevo de mejor calidad. Igualmente, también se podrán reducir los costos futuros, si el mantenimiento se realiza utilizando técnicas que mejoren alguna de sus características de calidad.
- En 1991 se aprobó el estándar ISO/IEC llamado “*ISO 9126: Software Product Evaluation: Quality Characteristics and Guidelines for their Use*”.  
El documento publicado en 1991 ha sido reelaborado en 1998 en dos estándares separados:
  - ISO/IEC 9126, llamado “*Software Quality Characteristics and Metrics*”
  - ISO/IEC 14598 llamado “*Software Product Evaluation*”.

# Modelos de Calidad del Software

- El esfuerzo de Mantenimiento de Software se podría reducir si se produce software nuevo de mejor calidad. Igualmente, también se podrán reducir los costos futuros, si el mantenimiento se realiza utilizando técnicas que mejoren alguna de sus características de calidad.
- En 1991 se aprobó el estándar ISO/IEC llamado “*ISO 9126: Software Product Evaluation: Quality Characteristics and Guidelines for their Use*”.

El documento publicado en 1991 ha sido reelaborado en 1998 en dos estándares separados:

- ISO/IEC 9126, llamado “*Software Quality Characteristics and Metrics*”
- ISO/IEC 14598 llamado “*Software Product Evaluation*”.

# ISO 9126 (1)

- El estándar ISO 9126 presenta un **modelo de calidad del software** en el que *la calidad se define como la totalidad de características relacionadas con su habilidad para satisfacer necesidades establecidas o implicadas.*
- Los **atributos de calidad** se clasifican según **seis características**, las cuales a su vez se subdividen en subcaracterísticas.
- También se describen métricas de calidad del software basadas en atributos internos y en el comportamiento externo del sistema.
- En este estándar se establece que cualquier componente de la calidad del software puede ser descripto en términos de algunos aspectos de una o más de estas seis características.

# ISO 9126 (1)

- El estándar ISO 9126 presenta un modelo de calidad del software en el que *la calidad se define como la totalidad de características relacionadas con su habilidad para satisfacer necesidades establecidas o implicadas*.
- Los **atributos de calidad** se clasifican según **seis características**, las cuales a su vez se subdividen en subcaracterísticas.
- También se describen métricas de calidad del software basadas en atributos internos y en el comportamiento externo del sistema.
- En este estándar se establece que cualquier componente de la calidad del software puede ser descripto en términos de algunos aspectos de una o más de estas seis características.

# ISO 9126 (1)

- El estándar ISO 9126 presenta un modelo de calidad del software en el que *la calidad se define como la totalidad de características relacionadas con su habilidad para satisfacer necesidades establecidas o implicadas*.
- Los atributos de calidad se clasifican según seis características, las cuales a su vez se subdividen en subcaracterísticas.
- También se describen métricas de calidad del software basadas en atributos internos y en el comportamiento externo del sistema.
- En este estándar se establece que cualquier componente de la calidad del software puede ser descripto en términos de algunos aspectos de una o más de estas seis características.

# ISO 9126 (2)



# Mantenibilidad ISO 9126

La **mantenibilidad** se define como la *capacidad de un producto software para ser modificado*. Las modificaciones pueden incluir correcciones, mejoras o adaptación del software a cambios en el entorno, en los requerimientos o en las especificaciones funcionales. Se subdivide en cinco *subcaracterísticas*:

- **Analizabilidad:** Capacidad del producto software de diagnosticar sus deficiencias o causas de fallos, o de identificar las partes que deben ser modificadas.
- **Cambiabilidad:** Capacidad del producto software de permitir implementar una modificación especificada previamente. La implementación incluye los cambios en el diseño, el código y la documentación. Si el software es modificado por el usuario final, entonces, la cambiabilidad puede afectar a la operabilidad.
- **Estabilidad:** Capacidad del producto software de minimizar los efectos inesperados de las modificaciones.
- **Facilidad de prueba:** Capacidad del producto software de permitir evaluar las partes modificadas.
- **Conformidad:** Capacidad del producto software de satisfacer los estándares o convenciones relativas con la mantenibilidad.

# Mantenibilidad ISO 9126

La **mantenibilidad** se define como la *capacidad de un producto software para ser modificado. Las modificaciones pueden incluir correcciones, mejoras o adaptación del software a cambios en el entorno, en los requerimientos o en las especificaciones funcionales.* Se subdivide en cinco *subcaracterísticas*:

- **Analizabilidad:** Capacidad del producto software de diagnosticar sus deficiencias o causas de fallos, o de identificar las partes que deben ser modificadas.
- **Cambiabilidad:** Capacidad del producto software de permitir implementar una modificación especificada previamente. La implementación incluye los cambios en el diseño, el código y la documentación. Si el software es modificado por el usuario final, entonces, la cambiabilidad puede afectar a la operabilidad.
- **Estabilidad:** Capacidad del producto software de minimizar los efectos inesperados de las modificaciones.
- **Facilidad de prueba:** Capacidad del producto software de permitir evaluar las partes modificadas.
- **Conformidad:** Capacidad del producto software de satisfacer los estándares o convenciones relativas con la mantenibilidad.

# Normas Útiles para el Mantenimiento de Software

- Para los procesos del ciclo de vida del software:
  - **ISO 12207**
  - IEEE 1074
- Para la calidad del software y sus métricas:
  - **ISO 9126**
  - IEEE 1061
- Para el mantenimiento del software:
  - IEEE 1219
  - **ISO 14764**

# Diseño para la mantenibilidad

**Los tiempos involucrados en el mantenimiento, tanto correctivo como preventivo, quedan definidos explícita o implícitamente en las primeras acciones de desarrollo.**

## Recomendaciones

Accesibilidad y modularidad

Simplicidad y normalización

Ingeniería de factores humanos

Capacidad de prueba

Previsión para el uso de recursos especiales de mantenimiento

# Diseño para la mantenibilidad

Los tiempos involucrados en el mantenimiento, tanto correctivo como preventivo, quedan definidos explícita o implícitamente en las primeras acciones de desarrollo.

## Recomendaciones

Accesibilidad y modularidad

Simplicidad y normalización

Ingeniería de factores humanos

Capacidad de prueba

Previsión para el uso de recursos especiales de mantenimiento