

CONFIABILIDAD ELECTRÓNICA y ELÉCTRICA

Introducción.

La principal diferencia entre la Confiabilidad eléctrica y mecánica radica fundamentalmente en que, en general, los sistemas electrónicos no se “desgastan” (No wear out), salvo algunas excepciones. Mientras hay algunos mecanismos “discutidos” de desgaste como ser: *electromigración*, y *corrimiento de parámetros en los componentes*, los sistemas electrónicos se comportan de manera fundamentalmente diferentes a los sistemas mecánicos. Típicamente vinculado a la discusión de la confiabilidad está el concepto de “curva bañera” (bathtub curve). En la figura 1 se muestra la curva, la cuál se puede dividir en tres partes o zonas.

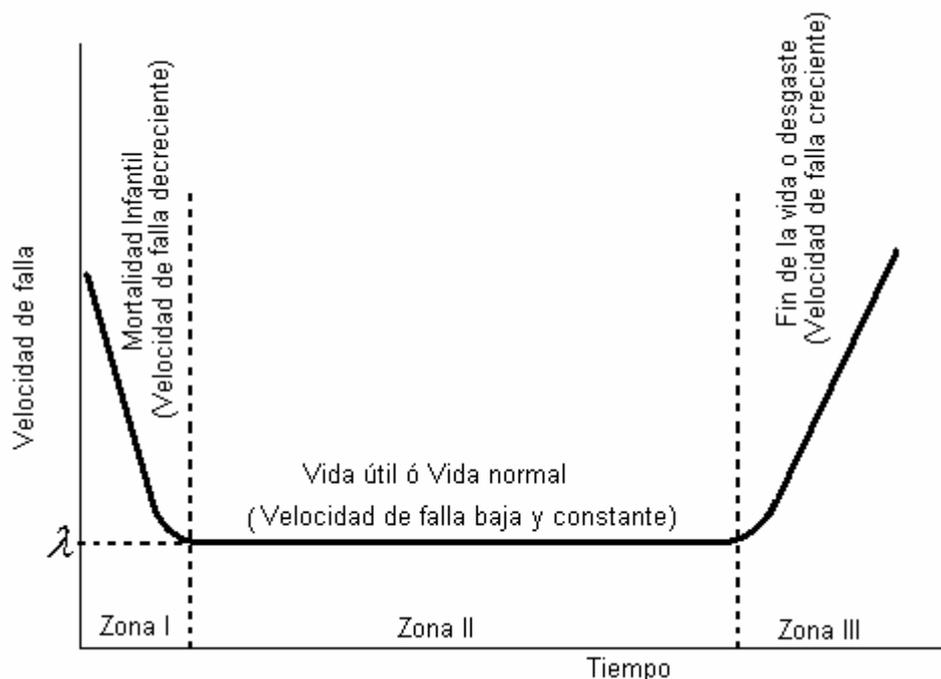


Fig. 1. Curva bañera (bathtub curve).

Zona I: (parte rápidamente decreciente de la curva), conocida como etapa de mortalidad infantil, esta caracterizada *por fallas debidas a defectos de fabricación*.

Zona II: Es la etapa de vida útil y está caracterizada por una velocidad de falla constante *debida a defectos aleatorios*.

Zona III: Conocido como periodo de desgaste y está caracterizado por una velocidad de falla creciente como resultado del *envejecimiento y deterioro de los equipos*.

Como los modernos equipos electrónicos están hechos mayormente de dispositivos semiconductores que no tienen un mecanismo de desgaste de corto plazo, la existencia de la **Zona III**, para los sistemas electrónicos es una especie de área gris. Para la mayoría de los componentes electrónicos, la **Zona III**, es relativamente plana.

Una tarea importante para los diseñadores es *saber como fallan los sistemas eléctricos*. En las secciones siguientes analizaremos las causas más comunes de falla para los sistemas electrónicos, como así también algunos métodos comunes de

protección. Posteriormente, presentaremos varias clases de modelos para predecir la confiabilidad.

Conceptos clave

Fatigas principales y Métodos de protección.

Electromigración

Como se mencionó precedentemente los sistemas eléctricos exhiben un comportamiento de desgaste y envejecimiento (wear out). La electromigración, por ejemplo, puede ser posible considerarla como un mecanismo de desgaste. A través del tiempo, las altas densidades de corriente en los conductores de película fina en los circuitos integrados pueden causar vacíos/ lagunas o montículos (pequeños), observables a escalas micrométricas.

Deriva de los parámetros en los componentes.

A través del tiempo, los componentes analógicos pueden desviarse de sus valores especificados. Esto puede ser acelerado por varios factores, como ser la temperatura. De manera que los circuitos críticos, necesitan ser diseñados con un nivel de tolerancia tal que puedan arreglárselas con la deriva de los parámetros en los componentes.

Fatigas(o tensiones) por Transitorios eléctricos.

Los modernos equipos electrónicos son propensos a dañarse por las altas corrientes debido a su naturaleza delicada y a su poca habilidad para disipar el calor. Entonces las fatigas transitorias como aquellas debidas a las descargas electrostáticas (ESD), encendido, y transitorios en las fuentes de potencia por conmutación o encendido, pueden ocasionar fallas en el sistema.

Algunos métodos de protección contra transitorios eléctricos incluyen:

- *Capacitores*: para absorber los transitorios de alta frecuencia.
- *Acopladores ópticos (opto-couplers)*: para aislar de los transitorios dañinos, las partes sensibles del sistema eléctrico.
- *Resistores*: 1) Entre las entradas y las conexiones externas para reducir los niveles de las tensiones transitorias, y 2) entre las salidas y las conexiones externas para prevenir corrientes excesivas en el caso de corto a tierra.

Calor excesivo.

Este es un problema típico en electrónica de aviación (avionics) y equipos para misiles, donde el calor excesivo puede causar el fracaso o destrucción del sistema eléctrico. Los valores de los parámetros en los componentes, normalmente varían con la temperatura, y es importante no superar el rango de temperatura dado por los fabricantes. Por encima de estas temperaturas, las partes no están garantizadas para permanecer dentro de las especificaciones. Valores típicos de este rango van desde 80°C a 150°C. De esta manera el diseño térmico se vuelve un aspecto importante en el

diseño global del sistema. Los componentes generan calor en su operación y cuando se combina con la temperatura ambiente y la radiación solar, se pueden alcanzar temperaturas excesivas.

Los métodos comunes para proveer protección térmica, incluyen:

- *Disipadores*: para componentes que generan una considerable cantidad de calor.
- *Plano de conducción térmica*: Los planos de conducción térmica dentro de las placas de circuitos impreso conducen hacia fuera el calor generado por los componentes.
- *Ventiladores*: para mejorar el flujo de aire en el recinto.
- *Líquido de enfriamiento*: para dispositivos de alta potencia que generan grandes cantidades de calor.

Interferencia electromagnética (EMI).

Los sistemas eléctricos pueden emitir radiación electromagnética que puede causar interferencia al mismo equipo o a otros sistemas. Particularmente en los sistemas digitales, un conductor actuando como antena puede captar señales electromagnéticas y alterar los datos digitales. Entonces para producir sistemas electrónicos confiables, la emisión de **EMI** debe limitarse en la misma medida que el sistema es susceptible a ella. Existen muchas fuentes de **EMI**, y es conveniente consultar la bibliografía sobre **EMI** para entender totalmente como arreglárselas con ella. Algunas de estas fuentes incluyen: motores eléctricos, emisión desde los amplificadores, descargas electrostáticas, radiación desde las bujías, radares y transformadores.

Algunos caminos de protección contra la emisión de **EMI** son:

- Supresión
- Apantallado

Algunas de las formas de limitar la susceptibilidad frente a la **EMI** son:

- Apantallado
- Filtrar las frecuencias indeseadas
- Aislamiento mediante Opto-aisladores (opto-couplers)
- Diseño cuidadoso, teniendo en cuenta el Layout, envase, etc.

Defectos mecánicos

Los defectos mecánicos son comúnmente la causa de muchas fallas de los sistemas. Considérese los cables de instalación eléctrica de un automóvil. Los cables de instalación es una colección de alambres que están conducidos a través del automóvil en forma de manguera (paquete de cables). El daño del paquete de cables es una causa común de defectos del sistema eléctrico en muchos automóviles. El daño del paquete de cables puede ocurrir por la penetración del cuerpo de tornillos, atrapado por cuerpos adyacentes, y frotamiento debido a la pérdida de las abrazaderas de fijación, como para nombrar algunas de ellas.

Los sistemas electrónicos deben diseñarse para soportar shock mecánico, vibración, humedad y otras tensiones ambientales. Como la soldadura tiene pobres propiedades para soportar fatiga, los componentes pesados deben tener un soporte extra y no solamente la conexión soldada. Más aún, los cables necesitan ser cuidadosamente

sujetos y ser robustos para evitar el desgaste debido a las partes móviles. El deterioro de los conectores es frecuentemente una causa común de falla en los sistemas eléctricos y se debe prestar mucha atención a su ubicación y montaje.

Predicción de la confiabilidad de los equipos electrónicos.

Hay una variedad de técnicas de modelado y predicción de la confiabilidad. En lugar de listarlas aquí, podemos brindar una clasificación en 5 (cinco) categorías principales:

Técnicas de Equipos similares. Para estimar el nivel de confiabilidad, el equipo en consideración se compara con un equipo similar de confiabilidad conocida.

Técnicas de complejidad similar. Se estima la confiabilidad del diseño comparando su relativa complejidad con un ítem de complejidad similar.

Predicción por técnicas de función. Se considera la correlación entre la “función” y la “confiabilidad”, para obtener la predicción de la confiabilidad de un diseño nuevo.

Técnicas del conteo de partes. Se estima la confiabilidad como una función del número de partes involucradas.

Técnicas de análisis de esfuerzo. La velocidad de falla es una función de la velocidad de falla de las partes individuales y toma en consideración: tipo de parte, nivel operacional de esfuerzo, y características de “derating” de cada parte.

Para entender estas técnicas es útil la distribución exponencial. La distribución exponencial es una de las más importantes distribuciones en los cálculos de confiabilidad. Específicamente, se utiliza mucho para la predicción de la confiabilidad de equipamiento electrónico. Esto es así, debido a que los sistemas electrónicos casi no presentan el mecanismo de desgaste. La distribución exponencial tiene una velocidad de falla constante, análoga a las fallas aleatorias de los sistemas, y que no están asociados con el desgaste, corrosión, etc. La distribución exponencial es buena para modelar:

- Ítems cuya velocidad de falla no cambia o cambia levemente con la edad del mismo.
- Equipos en los cuales la “mortalidad infantil” ha sido eliminada.

No todos los componentes tienen una distribución exponencial. Por ejemplo: los capacitores electrolíticos se rompen o deterioran con el tiempo. Entonces, no es seguro decir que los sistemas eléctricos no se desgastan.

Métrica, herramientas y técnicas disponibles.

Existe una gran cantidad de principios de diseño que se pueden utilizar para estimular la confiabilidad de sistemas. Estos pueden incluir lo siguiente:

Selección de partes, control y “derating”. Un sistema electrónico está hecho de componentes discretos, la selección y calidad de estos componentes es de importancia crucial. La elección de la parte correcta para el trabajo correcto, puede significar la diferencia entre confiabilidad y no-confiabilidad. La selección de partes incluye decisiones tales como: TTL vs. ECL, empleo de dispositivos de encapsulado plástico y montaje superficial vs. Tecnologías de agujero pasante (through hole). Además de esto, el comportamiento de las partes críticas debe cumplir con ciertas guías de la industria.

Diseño de circuitos confiables. Como regla general: *los diseños simples son los más confiables*. De esta manera, deberían realizarse esfuerzos a través de todas las etapas del diseño para conseguir “simplicidad”. La necesidad de que todas las partes sean cuestionadas y analizadas, como así también la búsqueda de la simplicidad, deberían ser utilizadas cuando estén disponibles. Esto puede ser a través de la simplificación en el diseño del circuito o simplemente utilizando pocas partes. De la misma manera, la utilización de componentes y circuitos “Standard” siempre es recomendable (Aún donde el componente puede ser tan complejo como un microprocesador). El diseño de un circuito confiable acarrea el análisis de la degradación de parámetros. Como se sabe que los parámetros de los componentes se corren de valor en el tiempo, se debe asegurar que las diferentes tolerancias no se combinen de tal manera que puedan degradar la funcionalidad del sistema.

Redundancia. El empleo de componentes múltiples con la misma función, puede ser siempre una herramienta útil si se utiliza adecuadamente. Existen una gran variedad de técnicas de redundancia.

Diseñando para el medio ambiente. Dados los esfuerzos ambientales mencionados en una sección precedente, se puede mejorar la confiabilidad de un sistema eléctrico mediante un cuidadoso detalle de todas las distinciones sutiles del ambiente. El ambiente puede ser muy severo y el sistema que se está diseñando puede ser que tenga que funcionar en presencia de:

- Temperaturas extremas.
- Humedad.
- Niebla salina.
- Polvo
- Arena
- Grava
- Vibración y Shock
- EMI

Debido a esto la confiabilidad no puede postergarse para “más adelante”. y debe considerarse como una meta desde el comienzo del proyecto.

Consideraciones y definiciones.

Definiciones.

Para comunicarse efectivamente en cualquier campo, es importante conocer los términos asociados con dicho campo. Esto es especialmente cierto en confiabilidad, donde gente diferente utilizan los términos en forma similar, pero con rumbos ligeramente diferentes.

Defecto. Ocurre un defecto cuando el servicio prestado por el sistema fracasa en cumplir sus especificaciones; causado por un error.

Falla. Una falla es un estado incorrecto del sistema, en el hardware o software, resultante del defecto en: componentes del sistema, errores de diseño, interferencia ambiental o errores de operador.

Error. Un error es la manifestación de falla del sistema. Por ejemplo: un operador ingresa el número incorrecto de cuenta a ser cancelada en la computadora de la compañía de energía (falla). El sistema corta la energía en el nodo incorrecto (error).

Permanente. La falla o defecto permanente es aquel que es estable y continuo. Las fallas permanentes en el hardware requieren la reparación o cambio de algún componente. Un ejemplo de defecto permanente podría ser un **Chip VLSI** con un defecto de fabricación, que ocasiona que un pin de entrada esté siempre "high".

Intermitente. Una falla intermitente es aquella que solo se manifiesta ocasionalmente, debido a un hardware inestable o a ciertos estados del sistema. Por ejemplo , muchos microprocesadores no ejecutan correctamente los datos de errores de transporte para ciertas secuencias de instrucciones (inyección de una falla en los datos). Cuando esto se descubre, los diseñadores agregan códigos a los compiladores para evitar la generación de esas secuencias específicas.

Transitoria. Una falla transitoria es aquella que resulta de una condición temporaria del medio ambiente. Por ejemplo un pico de tensión puede causar que un sensor reporte un valor incorrecto por unos pocos milisegundos antes de reportar correctamente.

Considérese una computadora controlando una planta de potencia, en la cuál el sistema es responsable de monitorear varias temperaturas de la planta, presiones y otras variables físicas. El sensor que mide la velocidad de la turbina principal se rompe y reporta que la turbina no está girando. *El defecto del sensor inyecta una falla dato incorrecto en el sistema.* Esta falla ocasiona que el sistema envíe más vapor que el requerido (error) a la turbina, tendiendo a ocasionar una sobre-velocidad en la turbina, con el resultado de sacada de servicio de la turbina para prevenir el daño de la misma. El sistema deja de generar energía (falla del sistema). a partir de aquí otros sistemas que reciben energía desde el sistema comienzan a tener fallas, en la forma de energía inadecuada, los que a su vez fallan, causando como resultado de esto otras fallas.

Etapas del desarrollo y fallas.

Las fallas pueden inyectarse en cualquier etapa del diseño y proceso de fabricación. La figura 2 muestra varias etapas de un **ciclo simplificado de desarrollo**, con indicación de los tipos de fallas típicas que se inyectan durante cada etapa, y las técnicas efectivas de detección del error (reacuérdesse que los errores son manifestaciones de las fallas).

<u>ETAPA</u>	<u>FUENTE DE ERROR</u>	<u>DETECCIÓN DEL ERROR</u>
Especificación Y diseño	Diseño del algoritmo Especificaciones formales	Simulación Pruebas de consistencia
Prototipo	Diseño del algoritmo Cableado y ensamble Temporizado Defecto de componente	Respuesta a estímulos Pruebas
Fabricación	Cableado y ensamble Defecto de componente	Prueba del sistema Diagnósticos
Instalación	Ensamble Defecto de componente	Prueba del sistema Diagnósticos
Operación En campo	Defecto de componente Errores del operador Factores Ambientales	Diagnósticos

Fig. 2. Etapas del desarrollo y fallas.

Manejo de fallas

A pesar del deseo de mantener todos los “bugs” (microbios, cucarachas) fuera del sistema, antes que el mismo se coloque en el campo, la historia demuestra que tal meta no es alcanzable. Es inevitable que ciertos factores ambientales no hayan sido considerados, o que ciertos errores potenciales del usuario sean completamente inesperados. Aún en el hipotético caso que el sistema haya sido perfectamente implementado, aparecerán fallas en el sistema debido a situaciones fuera del control de los proyectistas.

Un sistema confiable debe ser capaz de manejar fallas inesperadas y satisfacer las especificaciones en esta situación. Se han identificado 4 (cuatro) grupos principales que aproximadamente clasifican las técnicas para construir la confiabilidad dentro del sistema. Estas son:

Prevención de la falla.

Las técnicas de prevención de fallas pretenden mantener las fallas fuera del sistema en la etapa del diseño.

Detección de falla.

Estas técnicas pretenden detectar las fallas en un sistema en operación. Una vez detectada la falla, se aplican otras técnicas para corregir la falla, o al menos minimizar su impacto sobre el servicio prestado por el sistema. Tales técnicas incluyen: detección

de códigos de error, auto chequeo /lógica de autoprotección, temporizadores vigías, y otras.

Redundancia encubierta.

Esta técnica protege al sistema para que no sea afectado por los errores, ya sea mediante la corrección de errores o compensándolos de alguna forma. Estas técnicas incluyen: códigos correctores de errores, lógica entrelazada, diversidad algorítmica.

Redundancia dinámica.

Estas técnicas intentan utilizar los recursos existentes en el sistema, para trabajar alrededor de la falla que cae bajo esta clasificación. Esto incluye un amplia colección de técnicas, incluyendo: reprocesado, chequeo puntual, reconfiguración y otras.

Etapas de respuesta de un sistema a defectos.

Una vez que la falla ha sido introducida dentro del sistema, el mismo irá a través de distintas etapas, tantas como 8 (ocho) para responder a la ocurrencia de un defecto. Mientras el sistema no necesita, o es capaz de usar las 8, cualquier diseño confiable utilizará varias técnicas coordinadas. Estas etapas son:

Contención de falla

El propósito de esta etapa es limitar la diseminación de los efectos de una falla desde un área del sistema hacia otra área. Esto se logra, típicamente, mediante el uso amplio de la detección de falla(temprana y frecuente), como ser: protocolos de múltiple demanda/confirmación, y realizando pruebas consistentes entre módulos.

Detección de falla.

Esta es la etapa en la cuál el sistema reconoce que algo inesperado ha ocurrido. Las estrategias de detección son abiertas en dos categorías principales, detección en línea (online) y detección fuera de línea (offline). Un sistema que soporta la detección en línea es capaz de realizar trabajo útil mientras la detección está en progreso. Las estrategias de detección fuera de línea, impide que el dispositivo suministre cualquier servicio durante la detección.

Diagnóstico.

Si durante la fase de detección no se ha producido información como ser naturaleza y ubicación de la falla, los mecanismos de diagnóstico deben determinar dicha información. Una vez que la naturaleza y ubicación de la falla han sido determinadas, el sistema puede comenzar a recuperarse.

Reconfiguración.

Cuando el componente fallado ha sido identificado, un sistema confiable puede reconfigurarse a sí mismo para aislar el componente del resto del sistema. Esto debe acompañarse mediante el reemplazo del componente, haciéndolo fuera de línea y usando un sistema redundante. Alternativamente, el sistema lo puede salir de servicio y continuar la operación con una capacidad disminuida. Esto se conoce como "degradación elegante".

Recuperación.

En esta etapa el sistema intenta eliminar el efecto de la falla. Una pocas técnicas básicas para utilizar en esta etapa son: ocultar la falla, reprocesamiento, y reducción a su nivel original.

Recomenzar.

Cuando el sistema elimina el efecto de la falla, intenta recuperarse a sí mismo y retoma la operación normal. Si el sistema ha sido totalmente exitoso en la detección y contención de la falla antes que se produzca algún daño, estará habilitado para continuar sin pérdida de ningún estado del procesamiento. Esto se conoce como "recomenzar caliente". En un "recomenzar tibio", solamente unos pocos procesamientos experimentan pérdidas de estados. En un "recomenzar frío" el sistema completo pierde los estados, y es recargado completamente.

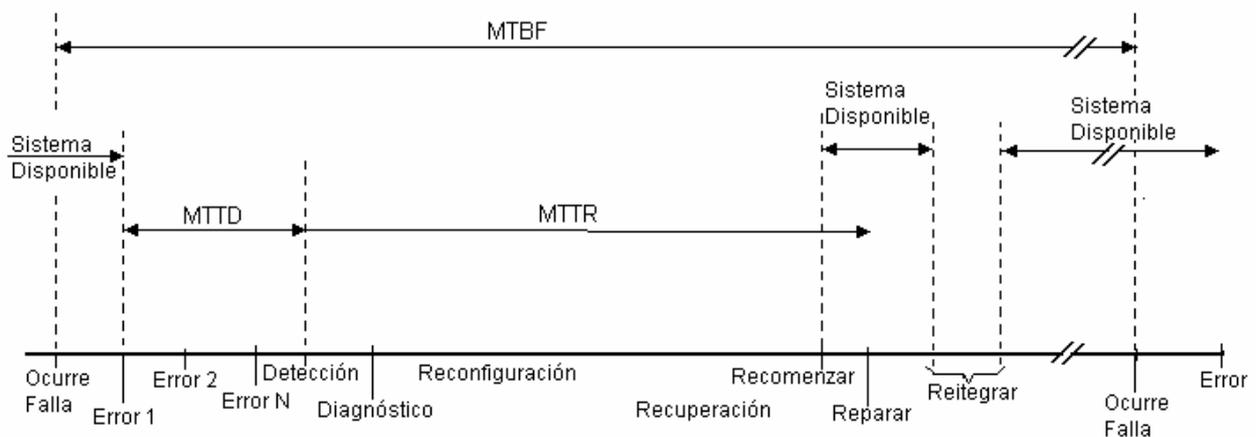
Reparación.

Durante esta etapa, cualquier componente identificado como en falla es reemplazado. Como con la detección esto puede ser "en línea" o "fura de línea".

Reintegración.

La fase de reintegración incluye colocar el componente reemplazado nuevamente en servicio dentro del sistema. Si el sistema ha continuado en operación en modo degradado, debe ser reconfigurado para usar nuevamente el componente entregado al servicio.

En la figura 3 se muestra un escenario de detección en línea y reparación fuera de línea.



MTBF: Tiempo medio a la falla
MTTD: Tiempo medio para detectar
MTTR: Tiempo medio para reparar

Fig.3. Escenario para detección en línea y reparación fuera de línea.

Modelos de Confiabilidad.

Introducción.

Cuando los fabricantes sostienen que sus productos son **muy confiables**, quieren significar esencialmente que: *los mismos son capaces de funcionar como se espera por un largo periodo de tiempo, cuando se los usa cumpliendo las especificaciones del fabricante.* Con el objeto de evaluar y mejorar la confiabilidad de un ítem, se necesita capacidad para medirla. Por consiguiente se requiere una definición formal.

Cuando un ítem deja de funcionar satisfactoriamente se dice que ha tenido una "falla". El tiempo transcurrido para fallar o tiempo de vida de un ítem, está íntimamente ligado a su confiabilidad, y ésta es una característica que puede variar de ítem a ítem, no obstante la suposición que los mismos son idénticos. Por ejemplo: supóngase tener 100 lámparas nuevas e idénticas que se colocan en un circuito de prueba, en las mismas condiciones y se encienden simultáneamente, observándose cuando dejan de funcionar. Es intuitivo darse cuenta que no podrá esperarse, de ninguna manera, que las lámparas se quemen todas al mismo tiempo. El tiempo de falla diferirá. Más aún, hay cierto comportamiento aleatorio en los tiempos de falla, de forma tal que su tiempo de vida es una variable aleatoria, cuyo comportamiento puede ser modelado por una distribución de probabilidad. Esta es la base de la **teoría de la confiabilidad**.

La teoría (avalada por sus modelos) y análisis de la misma permitirá responder a preguntas como:

- ¿Cuál es la probabilidad de que una unidad fallará antes de un tiempo dado?
- ¿Qué porcentaje de ítems durará más de cierto tiempo?
- ¿cuál es el tiempo de vida que se espera para un componente o sistema?

Antes de responder a preguntas como las precedentes, deberemos definir ciertos conceptos fundamentales.

CONCEPTOS FUNDAMENTALES ASOCIDOS CON LA CONFIABILIDAD

Algunas funciones importantes.

En el análisis de los datos de confiabilidad, es muy importante el Tiempo de vida o tiempo para la falla de la unidad. Esta característica llamada tiempo de vida, es una variable aleatoria. Como resultado de esto, tendrá una función de densidad de probabilidad (**pdf**) asociada a él.

Hay dos enfoques básicos para determinar la **pdf** asociada con un conjunto de datos de tiempo de falla. A saber:

- Representar gráficamente los tiempos de vida para determinar el tipo "Standard" de **pdf**: exponencial, normal, Weibull, Lognormal, etc.

- Si los datos no siguen una **pdf** Standard , se puede aplicar el método llamado **aproximación paramétrica** , donde la función **pdf** se determina directamente de los datos, o el tipo de $f(t)$ se deduce de la forma del histograma.

En cada caso, una vez determinada la **pdf** , la **función de distribución acumulativa cdf** , llamada $F(t)$, se puede determinar sin grandes problemas.

Definiendo:

$$F(t) = P (T \leq t) \quad (1)$$

Donde: $F(t)$ significa : la probabilidad que la unidad falle después de cierto tiempo t .

La misma está relacionada con la **pdf** mediante:

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt \quad (2)$$

También se puede escribir que la **pdf** es:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \quad (3)$$

En la figura 4 se muestra gráficamente la relación (2).

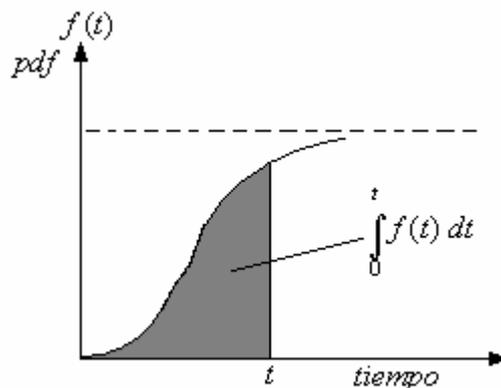


Fig. 4. Relación entre pdf y cdf.

Una vez conocidas las funciones $f(t)$ [pdf] y $F(t)$ [cdf] para una distribución particular, se pueden determinar otras características del modelo , entre ellas, 3 (tres) funciones empleadas muy comúnmente cuando se trata con datos de confiabilidad:

- Función confiabilidad.
- Función Riesgo.
- MTBF (tiempo medio entre fallas).

Función Confiabilidad.

$F(t)$ [cdf], da la probabilidad de que la unidad pueda fallar después de cierto tiempo t . Es de mucha importancia en los trabajos sobre confiabilidad, la probabilidad de que una unidad sobreviva hasta el tiempo t . Esto se conoce como la función confiabilidad y se escribe como **$R(t)$** , conocida también como función supervivencia. Sobre dicha base se puede escribir:

$$\begin{aligned} R(t) &= P(T > t) \\ &= 1 - P(T < t) \end{aligned}$$

$$R(t) = 1 - F(t) \quad (4)$$

La confiabilidad es igual a 1 menos la probabilidad de falla. Las funciones se muestran en la figura 5.

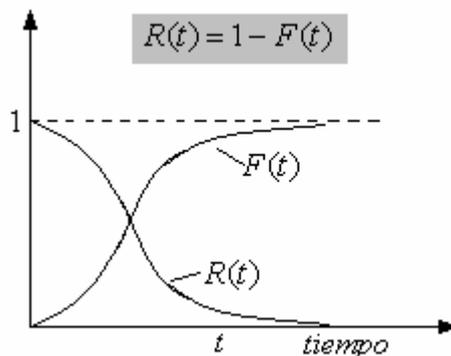


Fig. 5. Confiabilidad (probabilidad de supervivencia) y probabilidad de falla.

Función riesgo.

Otra cantidad muy importante en los estudios y cálculos de confiabilidad es la velocidad de falla de las unidades; esta se determina por la función llamada riesgo y se escribe $h(t)$, y se define como:

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (5)$$

$h(t)$: **es la función riesgo o función velocidad instantánea de falla.** Indica “la tendencia o inclinación a la falla” o “riesgo” para la unidad, luego de transcurrido el tiempo t . Sin embargo, no es una probabilidad (es decir puede tomar valores mayores a uno).

A partir del gráfico de $h(t)$, se puede obtener una representación útil del comportamiento de la unidad. Veamos tres ejemplos prácticos, bastante comunes. En la figura 6 se muestran los tres casos mencionados.

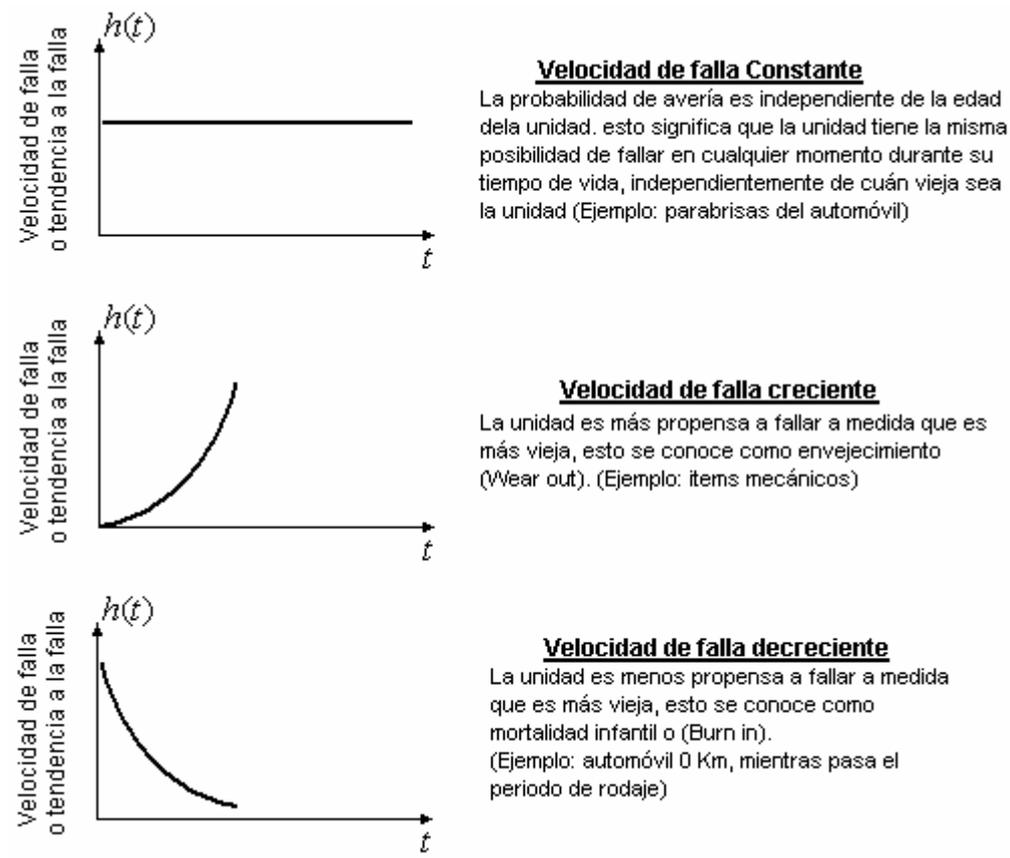


Fig. 6. Ejemplos de diferentes velocidades de falla.

En la práctica la función riesgo de una unidad o de un sistema, se asume que cambia en función del tiempo, como se indica en la figura 7.

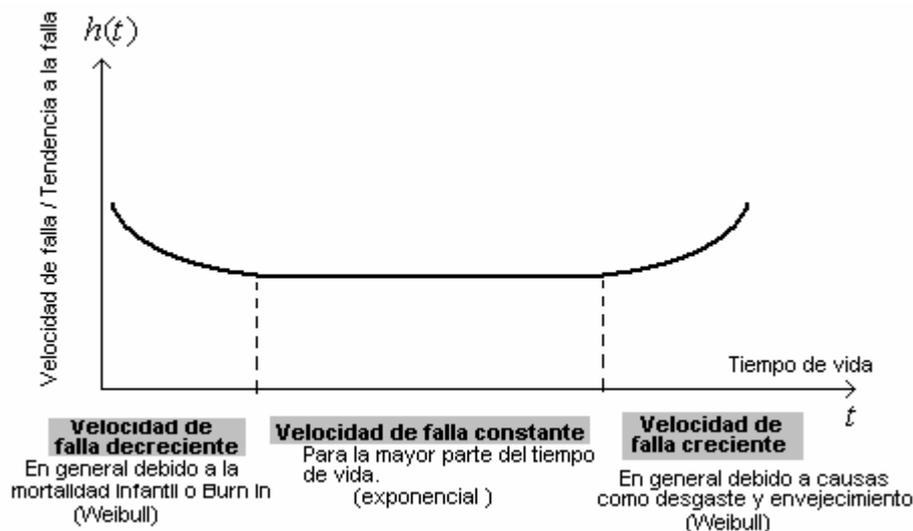


Fig. 7. Curva bañera (bathtub curve).

Para los componentes y equipos electrónicos la zona de velocidad de falla creciente es más suave ya que en la mayoría de ellos el fenómeno de wear out se ve muy reducido.

Función acumulativa de riesgo.

La **función acumulativa de riesgo**, es el área bajo la curva de velocidad de falla , es decir la integral de :

$$H(t) = \int_0^t h(t) dt \quad (6)$$

Teniendo en cuenta las relaciones (4), (5) y la (6) ,se puede escribir:

$$\begin{aligned} h(t) &= \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{dF(t)/dt}{R(t)} = \frac{dH(t)}{dt} \\ R(t) &= \frac{f(t)}{h(t)} = \frac{dF(t)/dt}{dH(t)/dt} = \frac{-dR/dt}{dH(t)/dt} = -\frac{dR}{dH} \end{aligned} \quad (7)$$

De la expresión (7) se obtiene:

$$-dH(t) = \frac{dR(t)}{R(t)} \quad (8)$$

Integrando la ecuación (8) se obtiene:

$$H(t) = -\ln R(t) \rightarrow R(t) = e^{-H(t)} \quad (9)$$

Sobre la base de la ecuación (9) se puede concluir que:

- Si la función H(t) es ascendente en el tiempo y con una pendiente creciente , indica una velocidad creciente a medida que los componentes envejecen (wear-out).
- Una función H(t) descendente en el tiempo, indica una velocidad de falla decreciente (Burn-in o mortalidad infantil).

Tiempo Medio entre fallas (MTBF)

El **tiempo medio entre fallas (MTBF)** es un concepto utilizado muy frecuentemente en los trabajos sobre confiabilidad electrónica y eléctrica (también mecánica). Se define como el "tiempo de vida promedio" o esperado de un ítem. Así, según la definición de **MTBF**, se obtiene:

$$MTBF = \int_0^{\infty} t f(t) dt \quad (10)$$

Alternativamente se puede emplear la relación, para determinar el MTBF, en función de la confiabilidad:

$$MTBF = \int_0^{\infty} R(t) dt = \int_0^{\infty} [1 - F(t)] dt \quad (11)$$

Resumen de las fórmulas generales de Confiabilidad

- $F(t) = \int_0^t f(t) dt$
- $R(t) = 1 - F(t)$
- $f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt}$
- $h(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$
- $R(t) = e^{-H(t)}$
- $H(t) = -\ln R(t)$
- $MTBF = \int_0^{\infty} t f(t) dt = \int_0^{\infty} R(t) dt$

Tiempos de vida según una distribución exponencial

La **pdf** exponencial, es un modelo muy útil para el tiempo entre fallas, en situaciones donde se espera que las fallas cumplan con:

- Fallas aleatorias.
- Velocidad de falla constante (pasó la mortalidad infantil)

La distribución exponencial de densidad de probabilidad de falla (pdf), está dada por la expresión general:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}, \quad \text{para } t > 0 \quad (12)$$

Funciones asociadas a $f(t)$ (Exponencial)

- 1) Función de distribución acumulativa de falla.

$$\begin{aligned} F(t) &= P(T < t) \\ &= \int_0^t f(t) dt = \int_0^t \lambda e^{-\lambda t} dt \\ &= \lambda \left[\frac{e^{-\lambda t}}{-\lambda} \right]_0^t = \frac{\lambda}{-\lambda} [e^{-\lambda t} - e^0] = -1 [e^{-\lambda t} - 1] \end{aligned}$$

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (13)$$

- 2) Función Confiabilidad o supervivencia.

La confiabilidad es:

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

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (14)$$

- 3) Función riesgo.

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

$$h(t) = \lambda, \text{ Constante} \quad (15)$$

4) Tiempo medio de vida (MTBF)

$$MTBF = \int_0^{\infty} R(t) dt = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \left[\frac{e^{-\lambda t}}{-\lambda} \right]_0^{\infty}$$

$$MTBF = \frac{1}{\lambda} \quad (17)$$

5) Función de riesgo acumulativa.

$$H(t) = \int_0^t h(t) dt = \int_0^t \lambda dt = \lambda t$$

$$H(t) = \lambda t, \text{ función lineal} \quad (18)$$

RESÚMEN

Para un ítem o sistema cuyo tiempo de vida sigue a una distribución exponencial

- $f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$
- $F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$
- $R(t) = e^{-\lambda t}$
- $h(t) = \lambda$
- $H(t) = \lambda t$
- $MTBF = \frac{1}{\lambda}$

Tiempos de vida que siguen una distribución de Weibull.

Los componentes electrónicos y eléctricos (como así también los mecánicos) presentan los fenómenos de “mortalidad infantil”, desgaste y envejecimiento. Estas zonas de la “curva bañera” corresponden a una distribución de Weibull con adecuado juego de los parámetros.

La función de distribución de Weibull es la indicada a continuación:

$$f(t) = \beta \alpha^{-\beta} \cdot t^{(\beta-1)} \cdot e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta} \quad (19)$$

Como se puede ver en la expresión (19) hay dos parámetros, de importancia fundamental: α y β .

α : parámetro de escala, refleja el tamaño de las unidades en las cuales se mide la variable aleatoria t (tiempo para la falla), meses, años etc.

β : parámetro de forma, es causa de la variación de forma en la función de densidad de probabilidad de falla (distribución). Cambiando el valor de β se pueden generar muchos grupos de curvas con el fin de modelar distribuciones reales de tiempos de falla.

En las figuras 8 y 9 se muestran gráficos donde se puede observar los efectos de los parámetros α y β sobre la forma y escala de la distribución de Weibull.

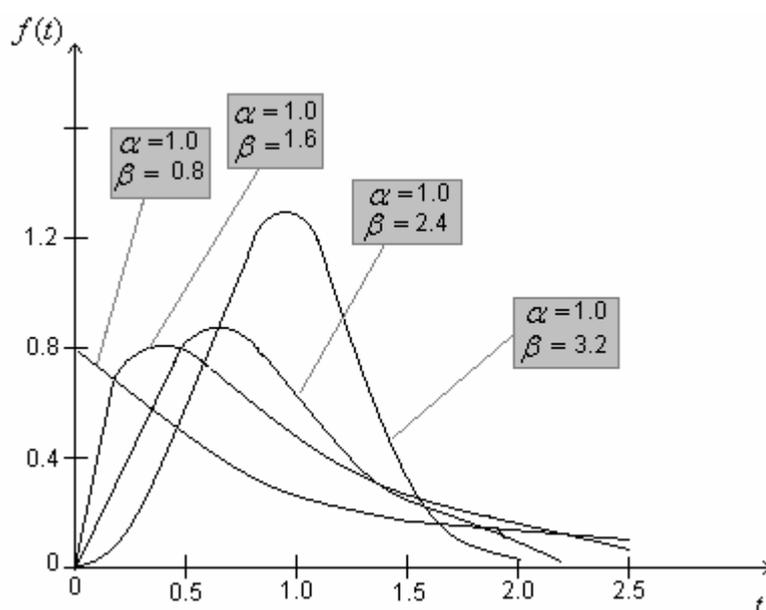


Fig.8. Efecto de diferentes parámetros de forma β .

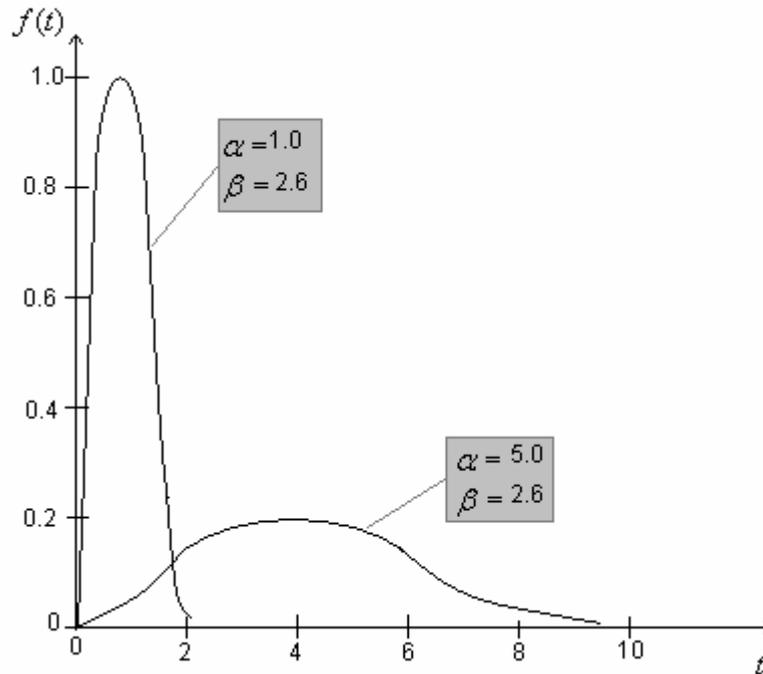


Fig.9. Efecto de diferentes parámetros de escala α .

Caso especial.

$\beta = 1$ La distribución de Weibull se reduce a la distribución exponencial:
 $f(t) = \alpha e^{-\alpha t}$, donde $\alpha = 1/\alpha$ con velocidad de falla α
 (o tiempo medio entre falla $1/\alpha$).

Funciones asociadas a la distribución de Weibull.

Para la distribución de Weibull:

$$f(t) = \beta \alpha^{-\beta} \cdot t^{(\beta-1)} \cdot e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta} \quad (20)$$

Puede demostrarse fácilmente que la función acumulativa de falla (área bajo la curva $f(t)$) es:

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt = 1 - e^{-(t/\alpha)^\beta}$$

$$F(t) = 1 - e^{-(t/\alpha)^\beta} \quad (21)$$

Sabiendo por la expresión (4) que la confiabilidad es: $R(t) = 1 - F(t)$, de la (21) y la (4), se tiene:

$$R(t) = e^{-(t/\alpha)^\beta} \quad (22)$$

De acuerdo a la relación (5) la función riesgo es: $h(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$, luego reemplazando la (20) y la (22) en la (5), se obtiene:

$$\frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\beta \alpha^{-\beta} \left[t^{(\beta-1)} e^{-(t/\alpha)^\beta} \right]}{e^{-(t/\alpha)^\beta}} = \beta \alpha^{-\beta} \cdot t^{(\beta-1)}$$

$$h(t) = \beta \alpha^{-\beta} \cdot t^{(\beta-1)} \quad (23)$$

La función de riesgo acumulada (área bajo la curva $h(t)$) se obtiene integrando la ecuación (23) o bien empleando la expresión (9):

$$H(t) = -\ln R(t) = -\ln \left[e^{-(t/\alpha)^\beta} \right]$$

$$H(t) = \left[\frac{t}{\alpha} \right]^\beta \quad (24)$$

El tiempo medio entre fallas (MTBF) se obtiene, empleando la expresión (11), es decir:

$MTBF = \int_0^{\infty} R(t) dt = \int_0^{\infty} [1 - F(t)] dt$, empleando para la confiabilidad la relación (22), se obtiene:

$$MTBF = \int_0^{\infty} R(t) dt = \int_0^{\infty} e^{-(t/\alpha)^\beta} dt$$

$$MTBF = \alpha \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \quad (25)$$

Donde $\Gamma(x)$ indica la *Función Gama*. Dicha función está tabulada en la bibliografía de probabilidades y estadística o bien se puede obtener en Internet. Esta nos asistirá para calcular el MTBF, según una distribución de Weibull.

Algunas funciones de riesgo, según una distribución de Weibull.

La función riesgo está dada por la relación (23), que por comodidad transcribimos a continuación: $h(t) = \beta \alpha^{-\beta} \cdot t^{(\beta-1)}$. Esta relación da varias formas de curvas de riesgo, dependiendo del parámetro β , como se muestra a continuación:

- a. $\beta < 1$. En la figura 10 se muestra la forma típica de la curva de riesgo o velocidad instantánea de falla. En la misma se puede apreciar que, cuanto mayor es la edad del ítem, la probabilidad de falla disminuye. Esto se conoce como envejecimiento negativo.

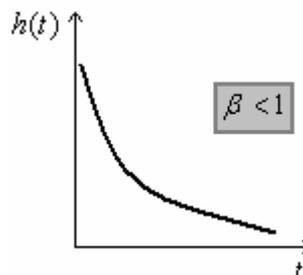


Fig.10. Envejecimiento negativo.

- b. $\beta = 1$. En la figura 11 se muestra la forma típica de la curva de riesgo o velocidad instantánea de falla. En la misma se puede apreciar que, cuanto

mayor es la edad del ítem, la probabilidad de falla no se ve afectada, es decir la velocidad de falla es constante. Esto se reconoce diciendo que el sistema no tiene memoria.

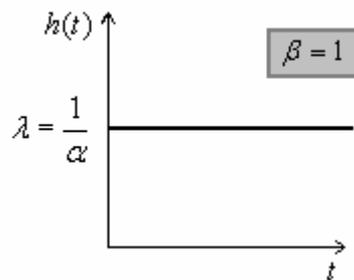


Fig. 11. Ítem sin memoria

- c. $1 < \beta < 2$ En la figura 12 se muestra la forma típica de la curva de riesgo o velocidad instantánea de falla. En la misma se puede apreciar que, cuanto mayor es la edad del ítem, mayor es la probabilidad de falla, pero la tendencia es hacia la disminución. Esto se reconoce como envejecimiento positivo.

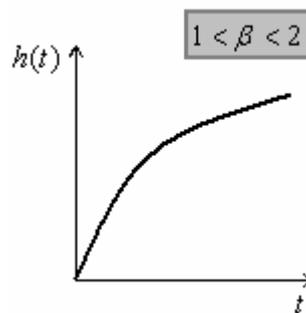


Fig.12. Envejecimiento positivo.

- d. $\beta = 2$ En la figura 13 se muestra la forma típica de la curva de riesgo o velocidad instantánea de falla. En la misma se puede apreciar que, cuanto mayor es la edad del ítem, mayor es la probabilidad de falla, pero la función riesgo es lineal. En este caso el tiempo de vida sigue una distribución de Rayleigh.

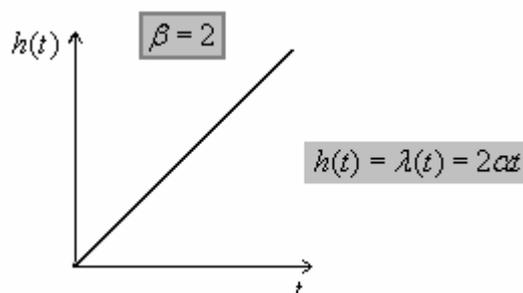


Fig.13. Tiempo de vida con distribución de Lord Rayleigh.

- e. $\beta > 2$ En la figura 14 se muestra la forma típica de la curva de riesgo o velocidad instantánea de falla. En la misma se puede apreciar que, cuanto mayor es la edad del ítem, mayor es la probabilidad de falla.

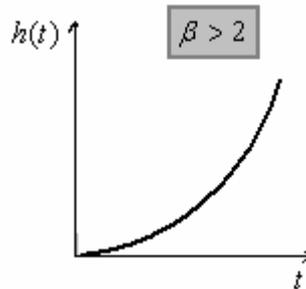


Fig. 14. Probabilidad de falla creciente. Envejecimiento positivo.

- f. $\beta = 3.4$ En la figura 15 se muestra la forma típica de la curva de riesgo o velocidad instantánea de falla. En la misma se puede apreciar que, cuanto mayor es la edad del ítem, mayor es la probabilidad de falla. Pero en este caso el tiempo de vida sigue una distribución normal.

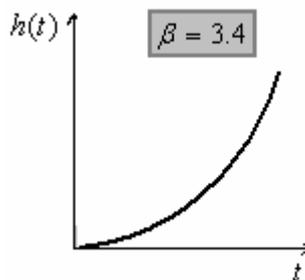


Fig.15. Tiempo de vida según una distribución normal.

RESUMEN

Funciones asociadas a una distribución de Weibull.

- $F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta}$
- $R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta}$
- $h(t) = \beta \alpha^{-\beta} t^{(\beta-1)}$
- $H(t) = \left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta$
- $MTBF = \alpha \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)$

CURVA BAÑERA (Bathtub curve)

De acuerdo a lo visto precedentemente, la curva bañera indicada en la figura 7, se puede representar más cuantitativamente como indica la figura 16, con la definición del parámetro de forma β .

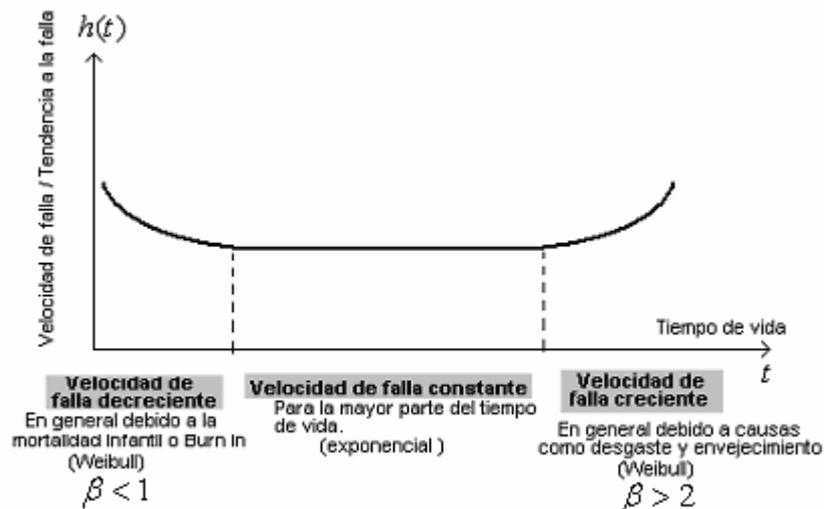


Fig. 16. Curva bañera para Ítems de Electrónica, Eléctrica y Mecánica.

Determinación experimental de los parámetros de una distribución de Weibull.

El procedimiento de ajuste de un conjunto de mediciones experimentales a una curva de distribución como la de Weibull se mostrará mediante un ejemplo práctico. La determinación de la función de distribución, permite realizar predicciones y responder preguntas de interés relacionadas con los datos.

Ejemplo: Un relé, es considerado una pieza crítica en la operación de cierto equipo de comunicaciones. Dieciséis (16) de estos relés han sido ensayados en pruebas de vida y se han obtenido las siguientes actuaciones hasta la falla, (ver cuadro de datos):

Falla i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Actuaciones $t_i \cdot 10^5$	3.8	6.6	8.2	9.5	11.0	11.9	14.7	17.1	19.2	21.9	23.5	24.5	27.9	29.9	33.0	37.2

El N° de actuaciones es por 10^5

Las actuaciones se expresan en $10^5 = 100000$.

Los datos presentados sugieren que el tiempo de vida de este relé sigue una *distribución de Weibull*.

Si es así, se pide:

1. Estimar los parámetros de Weibull α y β .
2. Estimar el tiempo de vida estimado para este relé.
3. Hallar la distribución del tiempo de vida y la velocidad de falla ¿Qué sugieren estos gráficos?
4. Obtener la función confiabilidad y calcular la probabilidad de que uno de estos relés permanezca funcionando luego de un millón de operaciones (10^6 operaciones).

Solución.

Método 1. Consiste en utilizar el software MINITAB, mediante el cuál se pueden estimar los parámetros del modelo de Weibull, y además obtener todas las curvas de interés.

Método 2. Si no se dispone del software MINITAB, se pueden estimar los parámetros del modelo de Weibull, haciendo una aproximación logarítmica como se indica a continuación.

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta}$$

$$\frac{1}{R(t)} = e^{\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta}$$

$$\ln\left[\frac{1}{R(t)}\right] = \left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta$$

$$\ln\left[\ln\frac{1}{R(t)}\right] = \beta \ln t - \beta \ln \alpha$$

$$\ln\left[\ln\frac{1}{1-F(t)}\right] = \beta \ln t - \beta \ln \alpha$$
(26)

Las ecuaciones (26) corresponden a una recta en papel doble logarítmico, de manera que esto representa un método para determinar los parámetros de la distribución de Weibull. Para estimar gráficamente los parámetros α y β , conviene proceder de la siguiente manera:

- a) Los "n" registros de los tiempos de falla se ordenan de menor a mayor (como están en la tabla de datos del relé) y se les asigna un número de orden i de 1 a "n".

b) Se calcula para cada falla la posición F_i de la siguiente manera:

$$F_i = \frac{i - 0.5}{n} \quad (27)$$

Donde F_i representa el porcentaje de fallas que ha tenido lugar antes del tiempo de falla correspondiente al orden i .

c) Se construye la gráfica de la ecuación (26), tomando como abscisas:

$$x_i = \ln t_i \quad (28)$$

Y como ordenadas:

$$y_i = \ln \left[\ln \frac{1}{1 - F(t)} \right] \quad (29)$$

Con lo cual la ecuación se transforma en una recta:

$$y_i = mx_i + b \quad (30)$$

Donde:

$$m = \beta, \quad b = -\beta \ln \alpha \quad (31)$$

d) Se determina la regresión lineal de la nube de puntos $P(x_i, y_i)$, con lo cual la pendiente de la recta es m y la ordenada al origen es b .

1) Con cualquiera de los métodos se determinan los parámetros de la distribución de Weibull. En este caso se ha utilizado el método 1, y los resultados han sido:

$$\begin{aligned} \beta &= 2.03936 \\ \alpha &= 21.19591 \end{aligned} \quad (\text{Nótese que la unidad de los datos es } 10^5)$$

Si se hubiese utilizado el método 2, lo más probable es que los parámetros se determinen con un decimal.

Sobre la base de los valores hallados la función de distribución de Weibull para los tiempos de vida del relé, es:

$$f(t) = (0.004)t^{1.04} e^{-\left(\frac{t}{21.19}\right)^{2.04}} \quad (32)$$

2) El tiempo medio entre fallas es:

$$MTBF = \alpha \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) = (21.19) \Gamma\left(1 + \frac{1}{2.04}\right) =$$

$$MTBF = 21.19(0.886) = 18.77 \times 10^5 \text{ actuaciones}$$

3) En la figura (17) se muestra la curva de riesgo, correspondiente a la ecuación (33), considerando la escala de tiempo en 10^5 operaciones:

$$h(t) = \beta \alpha^{-\beta} t^{(\beta-1)}$$

$$h(t) = 0.004t^{(1.04)} \quad (33)$$

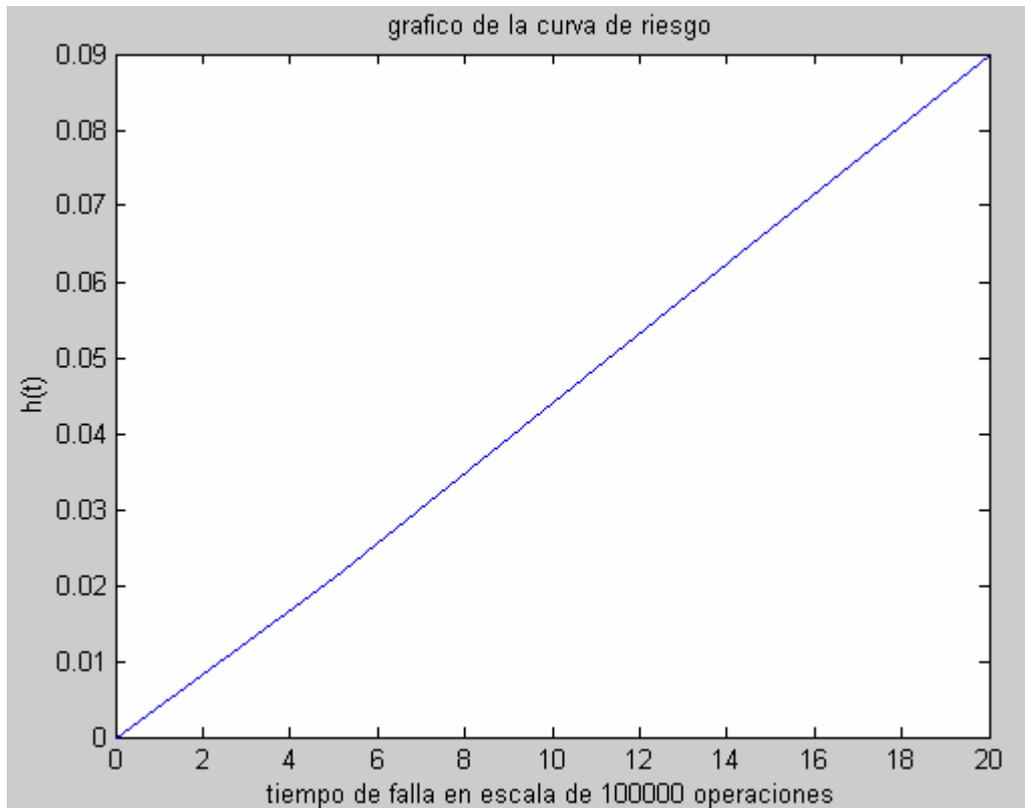


Fig. 17. Gráfico de la curva de riesgo $h(t)$.

De la figura 17 se puede ver que $h(t)$ se incrementa con el tiempo, de manera que el relé se envejece con la edad. Esto constituye envejecimiento positivo. La forma de la curva de riesgo, obtenida, sugiere que $\beta > 2$, por comparación con la figura 14.

4) La confiabilidad según la distribución de Weibull es:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta}$$

Para este caso del relé se tiene:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{21.19}\right)^{2.04}}$$

Para calcular la confiabilidad para 1 millón de operaciones, tendremos que emplear $t=10$ en la escala de tiempo (10^5 operaciones).

Luego:

$$R(10) = e^{-\left(\frac{10}{21.19}\right)^{2.04}} = 0.806$$

Es decir: Se tiene una chance del **80.6%** de que el relé permanezca en operación después de 1 millón de operaciones, basados en la muestra de datos dada en el ejemplo.

CONFIABILIDAD DE SISTEMAS

Un sistema se constituye mediante el arreglo (agrupación, interconexión) de componentes o subsistemas. De tal manera que la confiabilidad del sistema dependerá de la confiabilidad de sus componentes y de la forma que están interconectados los mismos. Veremos, básicamente las configuraciones:

- Configuración serie.
- Configuración paralelo.
- Configuración serie-paralelo.
- Redundancia.

Configuración serie

Las características más importantes de la configuración serie son:

- Los componentes se arreglan lógicamente en una “cadena”
- Se visualiza como una extensión con lámparas conectadas en serie.
- Al fallar una sola de las lámparas, la extensión no da luz (falla del sistema).
- La falla de cada componente es un evento.
- La falla del sistema es un encadenamiento de los eventos.

En la figura 18, se muestra un arreglo en serie.

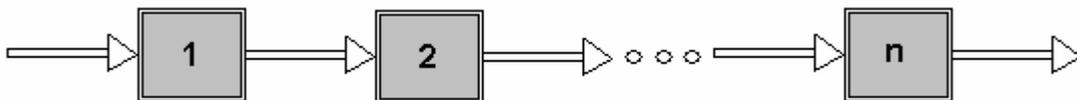


Fig. 18. Configuración serie.

La confiabilidad del sistema está dada por:

$$R_s = \prod_{i=1}^n R_i \quad (34)$$

Es decir: “La confiabilidad del sistema serie es igual a la productoria de las confiabilidades de los componentes”.

Ejemplo.

Considérese el caso de tres componentes en serie, con confiabilidades:

$$R_1 = 0.9950, \quad R_2 = 0.9870, \quad R_3 = 0.9730$$

La confiabilidad del sistema es:

$$R_s = R_1 \cdot R_2 \cdot R_3$$

$$R_s = 0.9950 \times 0.9870 \times 0.9730$$

$$R_s = 0.955549245$$

$$R_s = 95.55\%$$

Conclusión: La cadena no puede ser más fuerte que el más débil de sus eslabones. En la figura 19 se muestra la idea de la cadena y su eslabón más débil.

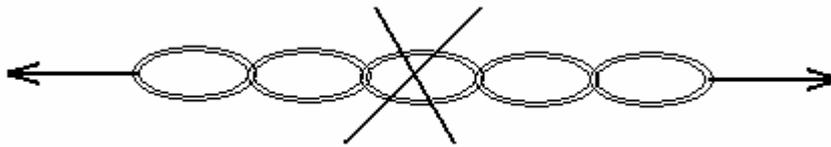


Fig. 19. Concepto de cadena para la configuración serie.

Para mejorar la confiabilidad de un sistema cuya configuración es serie, hay que mejorar la confiabilidad del componente más débil de la cadena. (Esta es la mejora más importante que se puede obtener de dicho sistema)

En la figura 20, se muestra la confiabilidad de un sistema en serie en relación a la confiabilidad del componente y para diferentes números de componentes.

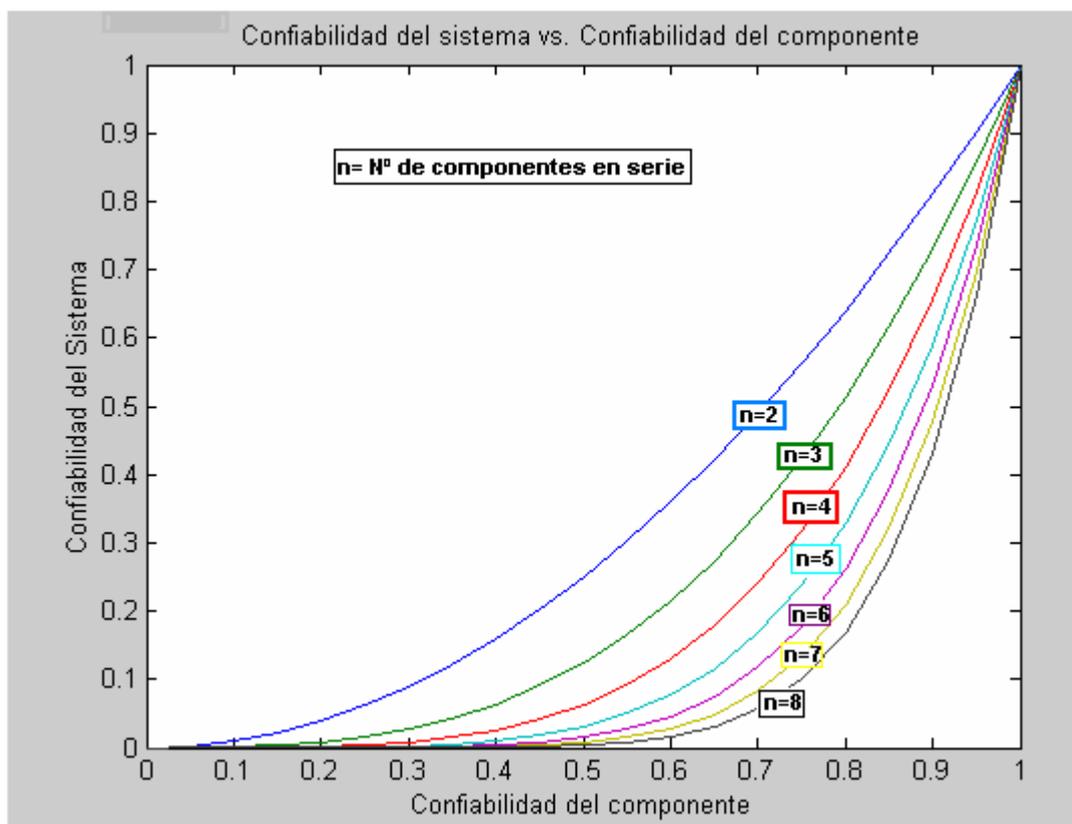


Fig. 20. Confiabilidad del sistema serie Vs. confiabilidad del componente

Como se puede ver en la figura 20 , a medida que aumenta el número de componentes en serie, disminuye la confiabilidad del sistema, para una dada confiabilidad del componente.

Configuración Paralelo

Las características más importantes de la configuración paralelo son:

- Los componentes se arreglan lógicamente en una red en paralelo.
- Se visualiza como una extensión con lámparas conectadas en paralelo.
- Al fallar todas las lámparas, la extensión no da luz (falla del sistema).

En la figura 21, se muestra un arreglo en paralelo.

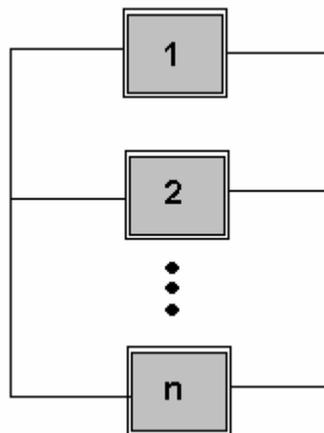


Fig.21. Configuración paralelo

La confiabilidad del sistema paralelo está dada por:

$$\begin{aligned} R_s &= 1 - F_s = 1 - (F_1 \cdot F_2 \cdots F_n) \\ &= 1 - [(1 - R_1)(1 - R_2) \cdots (1 - R_n)] \end{aligned}$$

$$R_s = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i) \quad (35)$$

Ejemplo.

Considérese el caso de tres componentes en paralelo, con confiabilidades:

$$R_1 = 0.9950, \quad R_2 = 0.9870, \quad R_3 = 0.9730$$

La confiabilidad del sistema es:

$$R_s = 1 - [(1 - R_1)(1 - R_2)(1 - R_3)]$$

$$R_s = 1 - [(1 - 0.9950)(1 - 0.9870)(1 - 0.9730)]$$

$$R_s = 0.9999982$$

$$R_s = 99.9998\%$$

Conclusión: La confiabilidad del sistema paralelo es mayor que la confiabilidad del componente de mayor confiabilidad. *El efecto de mejora más importante de un sistema paralelo, se obtiene al mejorar la confiabilidad del componente más fuerte del arreglo.*

En la figura 22 se muestra la confiabilidad de un sistema paralelo en función de la confiabilidad del componente, y para diferente número de componentes.

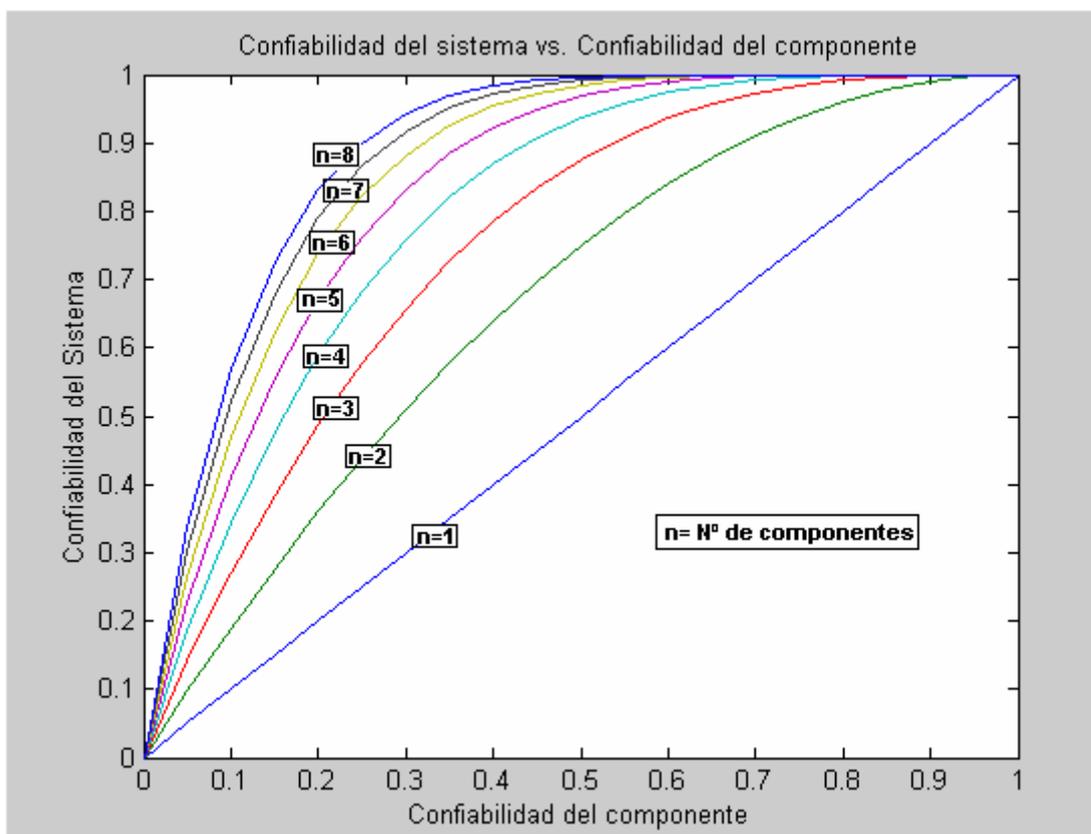


Fig.22. Confiabilidad del sistema paralelo vs. confiabilidad del componente

Como puede verse en la figura 22, a medida que aumenta en número de componentes en una configuración paralelo, aumenta la confiabilidad del sistema.

Sistemas Serie-Paralelo Combinados.

Una combinación posible de este tipo puede representarse como se indica en la figura 23.

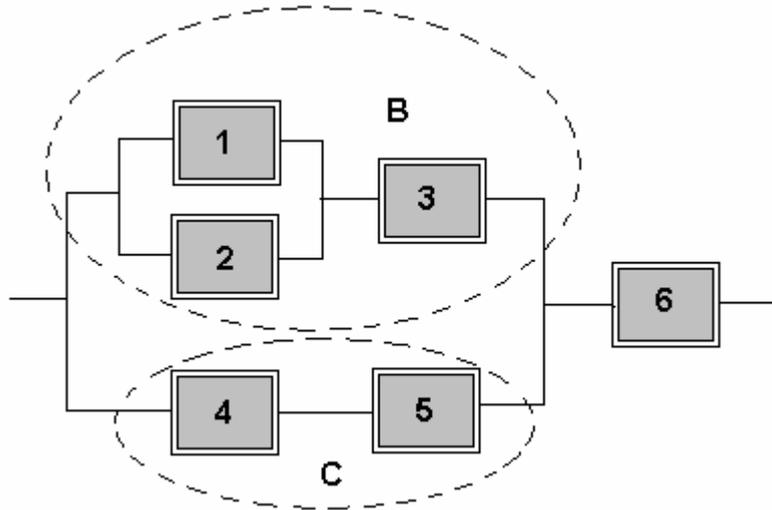


Fig.23. Sistema combinado Serie-Paralelo.

La confiabilidad del sistema será:

$$R_s = [1 - (1 - R_B)(1 - R_C)] \cdot R_6$$

donde:

$$R_A = [1 - (1 - R_1)(1 - R_2)]$$

$$R_B = R_A R_3$$

$$R_C = R_4 \cdot R_5$$

Si: $R_1 = R_2 = 0.9$; $R_3 = R_6 = 0.98$ y $R_4 = R_5 = 0.99$

La confiabilidad del sistema es:

$$R_s = [1 - (1 - 0.9702)(1 - 0.9801)] \cdot 0.98 = 0.9794$$

$$R_s = 97.94\%$$

Configuración (arreglo) paralelo k de N .

Supóngase el caso de 4(cuatro) turbinas (equipos), dispuestos en un arreglo paralelo de tal manera que $k = 2$ y $N = 4$. En la figura 24 se muestra tal configuración.

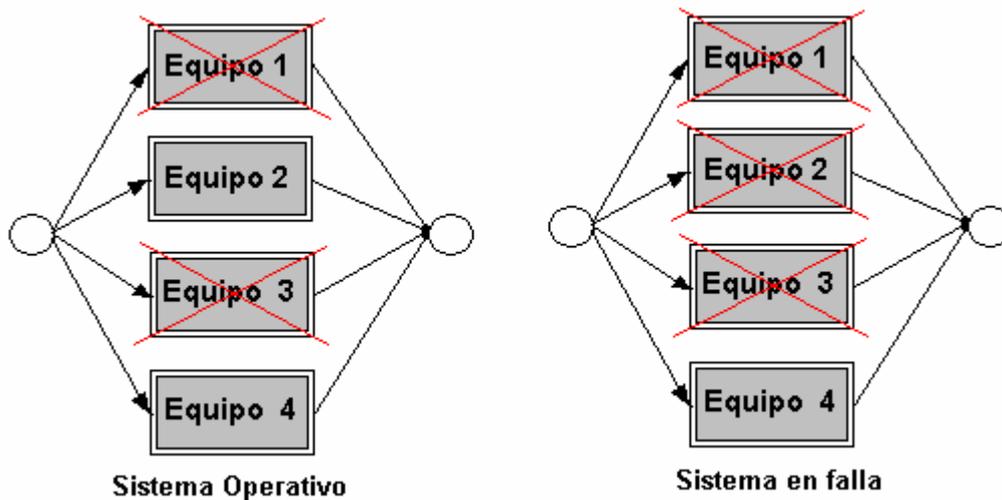


Fig. 24. Arreglo Paralelo 2 de 4.

Este tipo de arreglo para el caso del ejemplo significa **que si fallan 2 o menos turbinas en el sistema, el mismo seguirá operando tal y como fue concebido su intención de Diseño.**

Si falla una tercera turbina el sistema falla.

La confiabilidad de un sistema paralelo con arreglo k de N , está dada por:

$$R_s(k, n, R) = \sum_{r=k}^n \binom{n}{r} R^r (1-R)^{n-r} \quad (36)$$

Donde:

$$\binom{n}{r} = \frac{n!}{r!(n-r)!}$$

Ejemplo.

Efecto del número de elementos fallados en un arreglo k de N . En la figura 25 se muestra la curva de confiabilidad en función de k (k fallados de n , para $n=6$).

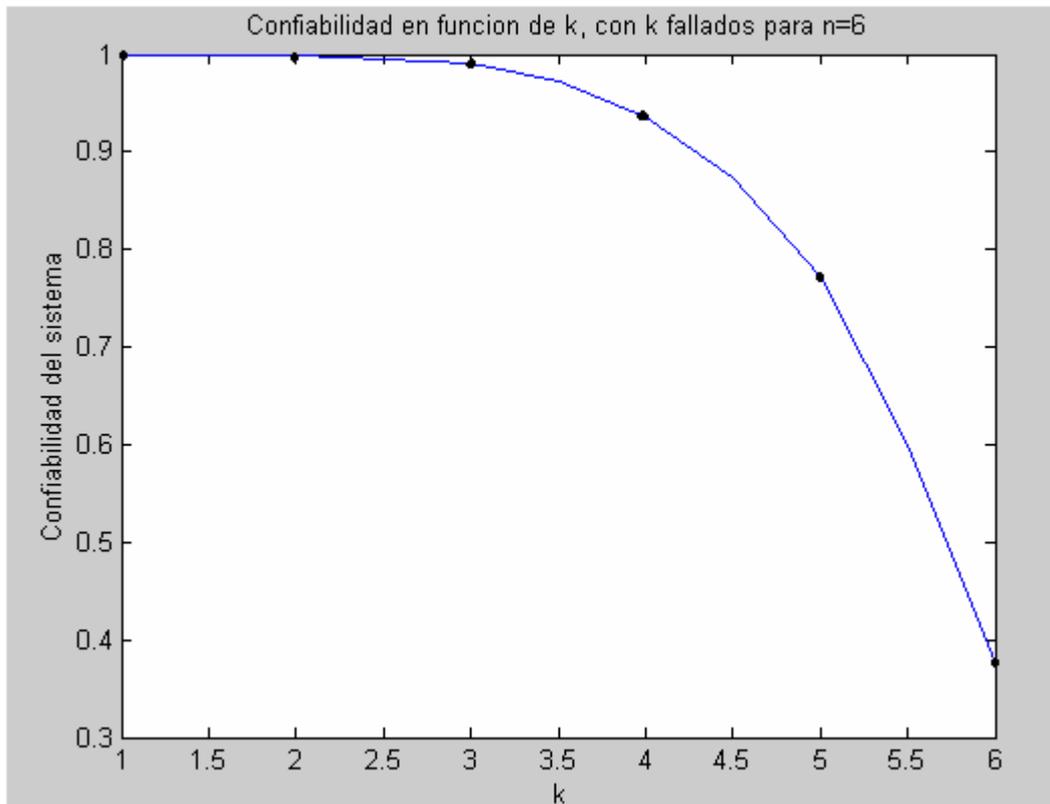


Fig. 25. Confiabilidad vs. K, para k fallados de n, con n=6

Redundancia de Alto- Nivel (de falla) versus Bajo-Nivel (de falla).

Considérese las combinaciones mostradas en la figura 26.

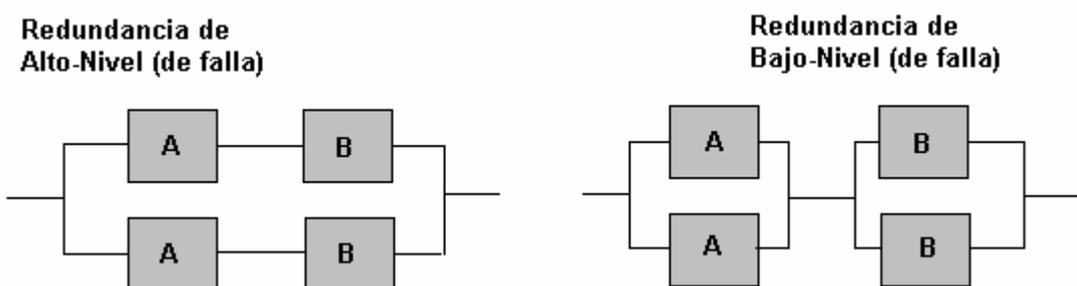


Fig. 26. Redundancia de Alto-Nivel vs. Bajo-Nivel

Las confiabilidades son:

$$R_{alto} = 1 - (1 - R^2)^2$$

$$= 2R^2 - R^4$$

$$R_{bajo} = [1 - (1 - R)^2]^2$$

$$= (2R - R^2)^2$$

La diferencia entre las confiabilidades es:

$$R_{bajo} - R_{alto} = 2R^2(R - 1)^2 \geq 0$$

Ejemplo:

Una radio consiste de tres elementos principales: la fuente de alimentación, el receptor y un amplificador, con Confiabilidad de 0.8, 0.9 y 0.85 respectivamente. Calcular la confiabilidad del sistema para redundancia de alto-nivel y bajo-nivel para sistemas con dos elementos en paralelo

$$R_{alto} = 1 - [1 - (.08)(0.9)(0.85)]^2 = 0.849$$

$$R_{bajo} = [1 - (1 - 0.8)^2][1 - (1 - 0.9)^2][1 - (1 - 0.85)^2] = 0.929$$