

01171
2ej. 1

ANALISIS DE CONFIABILIDAD Y DISPONIBILIDAD
DE EQUIPOS EN PLANTAS TERMoeLECTRICAS.

JOSE GERARDO TORRES TOLEDANO

TESIS

Presentada a la División de Estudios de
Posgrado de la
FACULTAD DE INGENIERIA
de la
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
como requisito para obtener
el grado de
MAESTRO EN INGENIERIA
(INVESTIGACION DE OPERACIONES)

CIUDAD UNIVERSITARIA A 17 DE NOVIEMBRE DE 1989

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

INDICE

| CONTENIDO | PAGINA |
|---|--------|
| RESUMEN. | |
| INTRODUCCION. | 1 |
| 1. DESCRIPCION DEL SISTEMA PROPUESTO Y SU PROBLEMÁTICA. | 13 |
| 2. EVALUACION DE LA CONFIABILIDAD DE SISTEMAS. | 20 |
| 2.1 SISTEMAS EN SERIE. | 20 |
| 2.2 SISTEMAS EN PARALELO. | 24 |
| 2.3 SISTEMAS CON REDUNDANCIA INACTIVA. | 27 |
| 3. CONFIABILIDAD DEL SISTEMA PROPUESTO. | 31 |
| 3.1 ANALISIS DE UN SOLO COMPONENTE. | 32 |
| 3.2 ANALISIS ESTADISTICO DE LA TASA DE FALLAS. | 36 |
| 3.3 ANALISIS DE SUBSISTEMAS CON MANTENIMIENTO. | 44 |
| 4. DISPONIBILIDAD DEL SISTEMA PROPUESTO. | 54 |
| 4.1 DISPONIBILIDAD DE UNA SOLA UNIDAD CON REPARACION. | 54 |
| 4.2 DISPONIBILIDAD DEL SISTEMA. | 58 |
| 5. RESULTADOS DE UN CASO DE APLICACION. | 66 |
| 5.1 CALCULO DE LAS TASAS DE FALLA Y REPARACION. | 66 |
| 5.2 CONFIABILIDAD Y DISPONIBILIDAD DE COMPONENTES. | 66 |
| 5.3 CONFIABILIDAD Y DISPONIBILIDAD DE SUBSISTEMAS. | 67 |
| 5.4 ANALISIS DEL SISTEMA COMPLETO. | 67 |
| CONCLUSIONES. | 75 |
| REFERENCIAS. | 78 |
| APENDICES. | 81 |
| A FUNDAMENTOS DE LA TEORIA DE CONFIABILIDAD. | |
| B MANTENIBILIDAD Y DISPONIBILIDAD. | |
| C PROGRAMAS DE BASES DE DATOS. | |

RESUMEN

En este trabajo se establece una metodología de cálculo de la confiabilidad y disponibilidad de equipos en Plantas Termoeléctricas, se toma como caso de aplicación los equipos principales que constituyen las Unidades de Generación con capacidad mayores o iguales a 150 MW.

A pesar de que la confiabilidad es una de las técnicas que mejoran la productividad de sistemas industriales, actualmente su aplicación en México es incipiente, una de las aportaciones es que el ejemplo aquí resuelto ilustra la manera de aplicarse estas técnicas en cualquier planta; respecto al cálculo de la disponibilidad en estado estable del sistema se consideran las tasas de falla y reparación de los equipos que lo integran.

Se presentan los fundamentos de la teoría de confiabilidad para modelar la vida prematura, vida útil y de desgaste de cualquier sistema aplicando las distribuciones de probabilidad Weibull y Exponencial. Los procedimientos de análisis emplean el enfoque Markoviano, con distribución exponencial, para valorar la confiabilidad y disponibilidad de sistemas. Las ventajas de utilizar esta metodología son: (a) permite cuantificar en forma realista las metas de mejoramiento de un sistema. (b) se pueden detectar los componentes críticos para tomar medidas preventivas y correctivas. (c) ayuda en la gestión de la producción y mantenimiento, principalmente en políticas de reemplazo y suministro de refacciones.

INTRODUCCION

El uso de energéticos tiene un efecto preponderante en el desarrollo económico de un país porque impulsa a todos los sectores productivos. En México el gobierno federal regula la explotación de los principales recursos energéticos que son: hidrocarburos, minerales y la generación, transmisión y distribución de energía eléctrica. Respecto al consumo de dichos energéticos, la tendencia mundial es no depender de los hidrocarburos, a pesar de la abundancia en reservas éstas son finitas, lo que ha motivado a que se tomen medidas para ahorrar y racionalizar su consumo; en este proceso México se encuentra defasado respecto a los países desarrollados, por una parte se debe diversificar y por otra aumentar el ahorro y la productividad en las instalaciones actuales. Como apoyo a este proceso se establece este estudio en donde se aplica técnicas de confiabilidad y disponibilidad para el mejoramiento en la operación y mantenimiento de las unidades de generación del Sector Eléctrico Nacional (SEN).

El SEN está organizado por Regiones de Generación y Transmisión, Areas de Control y Divisiones de Distribución de Energía Eléctrica; Las Regiones de Generación están clasificadas de acuerdo a la fuente de energía en:

Regiones de Generación Termoeléctrica:

- | | |
|---------------------|---|
| (1) Pacífico Norte. | (4) Central. |
| (2) Centro Norte . | (5) Golfo. |
| (3) Noreste. | (6) Divisiones: peninsular y Baja California. |

Regiones de Generación Hidroeléctrica:

- | | |
|----------------------|-----------------|
| (1) Yaqui-Mayo. | (4) Papaloapan. |
| (2) Balsas-Santiago. | (5) Grijalva. |
| (3) Ixtapantongo. | |

En las Regiones de Generación Termoeléctrica se encuentran localizadas diferentes tipos de Plantas dependiendo de la tecnología utilizada, a continuación se describe brevemente cada una de ellas.

CENTRALES TERMOELECTRICAS CONVENCIONALES. También son conocidas como Plantas de vapor, pueden utilizar combustóleo y/o gas natural, en México se utiliza básicamente combustóleo. El poder calorífico del combustible es transformado en energía térmica para el agua a la fase vapor en el generador de vapor (caldera). Este vapor sobrecalentado se conduce a la turbina, donde transforma su energía térmica en energía mecánica, que es transmitida al generador para producir energía eléctrica.

CENTRALES DE CICLO COMBINADO. Consta de una o más turbinas impulsadas por gases, producto de la combustión en una cámara externa, en la que por una parte se inyecta aire por medio de un compresor movido por la turbina y por la otra, el combustible que puede ser gas natural, aceite diesel o inclusive petróleo crudo.

Un caso es el Tula, Hgo. en donde las máquinas pueden quemar gas natural o aceite diesel. Una vez que los gases han trabajado y producido energía eléctrica, pasan a través

de un recuperador de calor, en donde se produce vapor que alimenta a una turbina convencional de vapor, con lo que se obtiene una generación adicional aumentando la eficiencia de la unidad. El conjunto de turbinas de gas y la turbina de vapor forman el llamado ciclo combinado, y su capacidad total es la suma de las generaciones de cada una de las turbinas de gas y de la turbina de vapor.

En este tipo de unidades se pueden variar el número de unidades de turbogas por unidad de vapor, desde uno a uno hasta cuatro a uno, por lo que no existe un arreglo único.

UNIDADES DE TURBOGAS. Pueden utilizar gas o diesel, su funcionamiento consiste en el aprovechamiento en una turbina de gas, como se describió en en las centrales de ciclo combinado, de la energía mecánica resultante de la expansión de los gases producidos por la combustión realizada en una cámara por aire a alta presión y combustible. Esta turbina acoplada al rotor del generador es la que hace que se produzca la energía eléctrica.

CENTRALES CARBOELECTRICAS. La única diferencia importante con las centrales convencionales es la utilización del carbón como energético primario, por este hecho se requiere de un precipitador de cenizas, generalmente electrostático. en casos donde el carbón contenga alto contenido de azufre se instalan además, sistemas de desulfurización; uno de los problemas es el manejo de carbón y los residuos de la combustión.

CENTRALES GEOTERMoeLECTRICAS. El proceso es el mismo que en la termoeléctricas convencionales, aquí las funciones del generador de vapor las realiza el yacimiento productor de vapor geotérmico. El vapor se obtiene de un separador que recibe una mezcla de agua-vapor del subsuelo, o solo vapor en los yacimientos sobrecalentados.

UNIDADES DIESEL. Estas unidades operan bajo el principio de los motores de combustión interna, aprovechando la expansión de los gases de combustión para obtener energía mecánica, la cual se transforma en energía eléctrica mediante un generador.

CENTRALES NUCLEoeLECTRICAS. La diferencia con las termoeléctricas y las carboeléctricas es que no consume combustibles fósiles, sino que aprovecha el calor que se obtiene al fisurar átomos del isótopo U_{235} del uranio, en el interior de reactores.

Todos los reactores nucleares tienen tres elementos en común que son: El combustible (que en los reactores convencionales puede ser U_{235} o plutonio); el moderador, es un material que reduce la energía de los neutrones de alta velocidad emitidos durante la fisión del U_{235} , incrementando así la eficiencia con que puede inducir nuevas fisiones (es común el uso del grafito o del agua como moderadores); y el refrigerante, siendo los más comunes el agua y el gas.

En base a la combinación de los elementos mencionados existen diferentes tipos de reactores:

a) PWR (Reactor de agua ligera a presión).

- b) BWR (Reactor de agua ligera hirviente).
- c) PHWR (Reactor de agua pesada a presión).
- d) GMR (Reactor moderado por grafito).

Una particularidad de la energía eléctrica es que se da en forma instantánea ya que no es factible almacenarla; se debe producir en el momento en que se demanda con nivel de confianza aceptable, esto obliga a tener unidades de rápida sincronización con la red para abastecer los picos en la demanda de energía. Las Plantas de arranque rápido son: turbogas, ciclo combinado e hidroeléctricas. Las Plantas de carga base son: de vapor, carboeléctricas y en un futuro las nucleoeeléctricas.

Las Plantas Termoeléctricas convencionales, han tenido una participación predominante en la generación de energía eléctrica en todo el Sector Eléctrico Nacional; el escenario oficial muestra que en el futuro continuará esta contribución:

| TIPO DE PLANTA. | AÑO 1986[5] | | AÑO 2000[16] | |
|-----------------------------|-------------|-------|--------------|-------|
| | (MW) | (%) | (MW) | (%) |
| HIDROELECTRICAS. | 6532 | 30.7 | 15000 | 28.3 |
| TEMOELECTRICAS DE VAPOR. | 9949 | 46.8 | 18500 | 34.9 |
| RESTO. | 4785 | 22.5 | 19500 | 36.8 |
| TOTAL | 21266 | 100.0 | 53500 | 100.0 |

En la tabla anterior en el "resto" se incluyen las Plantas Termoeléctricas de: Ciclo Combinado, Turbogas, a

base de carbón y Geotérmicas; posteriormente se espera tener Plantas de tipo: Nucleoeléctricas, Duales (Carbón-Combustóleo) y de Cogeneración.

Las Centrales Termoeléctricas (CTE's) están constituidas por Unidades generadoras de capacidades diferentes, desde 7 hasta 300 MW, las más representativas son las agrupadas entre 150 y 300 MW que son el 75 % de las convencionales y representa el 35 % de la capacidad real total instalada en 1986 (21,266 MW).

La importancia de este estudio radica en que la estimación de la pérdida económica es cuantiosa, en 1986 se dejaron de generar $6,106 \times 10^6$ KW-H atribuible a fallas de equipos en 11 CTE's con capacidades ≥ 150 MW que operan como carga base [6]. Si se considera únicamente los gastos por reemplazo de energía [4], operando Unidades de Ciclo Combinado, siendo estas de las más eficientes, los costos ascienden a $37,674 \times 10^6$ pesos de 1986. También se debe tomar en cuenta que los gastos de energéticos constituyen el 50 % de los gastos totales de explotación, de acuerdo a estadísticas oficiales de Comisión Federal de Electricidad.

El propósito de este trabajo es establecer un metodología de análisis de la Confiabilidad y Disponibilidad, tanto de los equipos principales en servicio como de una Unidad de generación completa.

Es cierto que no todas las fallas de una planta en operación son debidas a los equipos, en el caso de las CTE's existen problemas de suministro debido a factores humanos y

fallas en la transmisión ó distribución de energía eléctrica, pero para ponderar la contribución de los equipos, veamos lo que nos muestra las estadísticas en Planta Nucleares; D. L. Gano [14] clasifica las causas de falla en tres macro-áreas, que son:

| | |
|------------------------------|------|
| I) ERRORES DE PERSONAL | 37 % |
| II) FALLAS EN PROCEDIMIENTOS | 15 % |
| III) FALLAS EN EQUIPOS | 48 % |

Así que los equipos representan cerca del 50 % de las causas de falla en las Plantas Nucleares, estos datos pueden considerarse representativos, ya que en este tipo de industrias se lleva un control riguroso del comportamiento de los equipos.

En la actualidad ha aumentado el interés por tópicos relacionados con la efectividad de sistemas como son: Confiabilidad, Disponibilidad, Mantenibilidad, Seguridad y Calidad, existen muchas razones por ese interés algunas son:

2.1 EL consumidor es cada vez más selectivo en la adquisición de artículos, algunas compañías han iniciado campañas publicitarias en base a la confiabilidad de sus productos para aumentar sus ventas.

2.2 En el futuro inmediato, debido a la competencia, las empresas que permanecerán en el mercado serán aquellas que sean capaces de conocer y controlar la confiabilidad de sus productos.

2.3 El constante aumento en la competencia de algunos productos exige tener una confiabilidad mayor en sus componentes.

2.4 En algunos contratos ya se empieza a incluir en sus especificaciones cláusulas relacionadas con parámetros de Confiabilidad y Mantenibilidad.

2.5 Debido a los accidentes industriales, sobre todo en Plantas de productos químicos, se le ha puesto mayor atención a los sistemas de protección mediante los Análisis Probabilísticos de Seguridad y Confiabilidad.

Por otra parte, dependiendo de la naturaleza del componente o sistema y más aún de la etapa de su vida en que se encuentre, serán las consideraciones a tomar en cuenta para analizar su Confiabilidad. De manera general el ciclo de vida de un sistema está dividido en cuatro etapas [19]:

- A. DEFINICION Y DISEÑO CONCEPTUAL.
- B. DISEÑO DETALLADO Y DESARROLLO.
- C. MANUFACTURA Y/O CONSTRUCCION.
- D. OPERACION.

En la literatura abundan los tratamientos matemáticos de confiabilidad de sistemas o componentes individuales en su etapa de diseño y manufactura , esto concierne a las pruebas de vida de productos terminados. Sin embargo, respecto al análisis de componentes en servicio las fuentes

de información son más escasas, dos de las áreas de ingeniería que mayor impulso le han dado a esta disciplina son: la Aeroespacial y la Nuclear; en la Plantas Nucleoeléctricas se han venido desarrollando técnicas muy especializadas para garantizar los niveles de seguridad deseados. La tendencia actual sobre ésta disciplina es implantar en los diversos sectores industriales, las metodologías de Confiabilidad ya desarrolladas con el propósito de aumentar su productividad.

En la industria nacional el interés por estas técnicas es incipiente, pero en algunos sectores estratégicos como es el caso de la generación de energía eléctrica últimamente se le ha dado importancia al control de los índices de disponibilidad en sus Centrales pero no se ha trabajado con confiabilidad de equipos. Respecto a la disponibilidad se cuantifica para una capacidad efectiva y en un período determinado mediante el porcentaje relativo de energía disponible independientemente de que esta sea o no demandada es decir:

$$D = \frac{HP - (HFSF + HFSMF + HFSMP + HEFSD)}{HP} \times 100$$

Donde: HFSF = FUERA DE SERVICIO (F/S) POR FALLA.

HFSMF = F/S POR MANTENIMIENTO FORZADO.

HFSMP = F/S POR MANTENIMIENTO PROGRAMADO.

HEFSD = TIEMPO EQUIVALENTE F/S POR DECREMENTO.

HP = PERIODO; todos los valores en Horas.

También se definen otros conceptos de indisponibilidad,

siempre teniendo como base la expresión anterior, las más comunes son: Indisponibilidad por falla o salidas forzadas, indisponibilidad por decremento, indisponibilidad por mantenimiento programado o indisponibilidad por causas ajenas.

El trabajo presente está formado por cinco capítulos y tres apéndices:

En el primer capítulo se describe una planta termoeléctrica y su correspondiente representación en un diagrama de bloques para su análisis de confiabilidad y disponibilidad.

En el capítulo dos se proponen las expresiones para evaluar la confiabilidad de sistemas "puros", que son los arreglos fundamentales con los que se forma un sistema más complejo.

Los procedimientos de análisis de confiabilidad y disponibilidad se desarrollan en los capítulos tres y cuatro, se emplean cadenas de Markov y se argumenta el uso de la distribución exponencial, también se estima estadísticamente la tasa de fallas de los equipos.

En el capítulo 5 se muestran los resultados que ilustran la aplicación del método de análisis.

En las conclusiones se establecen los pasos de la metodología; en el apéndice A se presentan los fundamentos de la teoría de confiabilidad, el concepto de la tasa de fallas y su importancia, también las relaciones entre las

funciones de confiabilidad y las distribuciones Weibull y Exponencial; en el apéndice B se dan los conceptos sobre mantenibilidad y disponibilidad; por último en el apéndice C se describen brevemente las bases de datos de confiabilidad.

Algunos organismos de investigación y desarrollo de tecnología, como es el caso de ARINC Research Corporation [20], han definido conceptos sobre la Efectividad de Sistemas en donde se le ha dado una mayor importancia a la Ingeniería de Confiabilidad, en la figura 1 se puede ver como está relacionada la Confiabilidad, Mantenibilidad y Disponibilidad con la efectividad (productividad) del sistema.

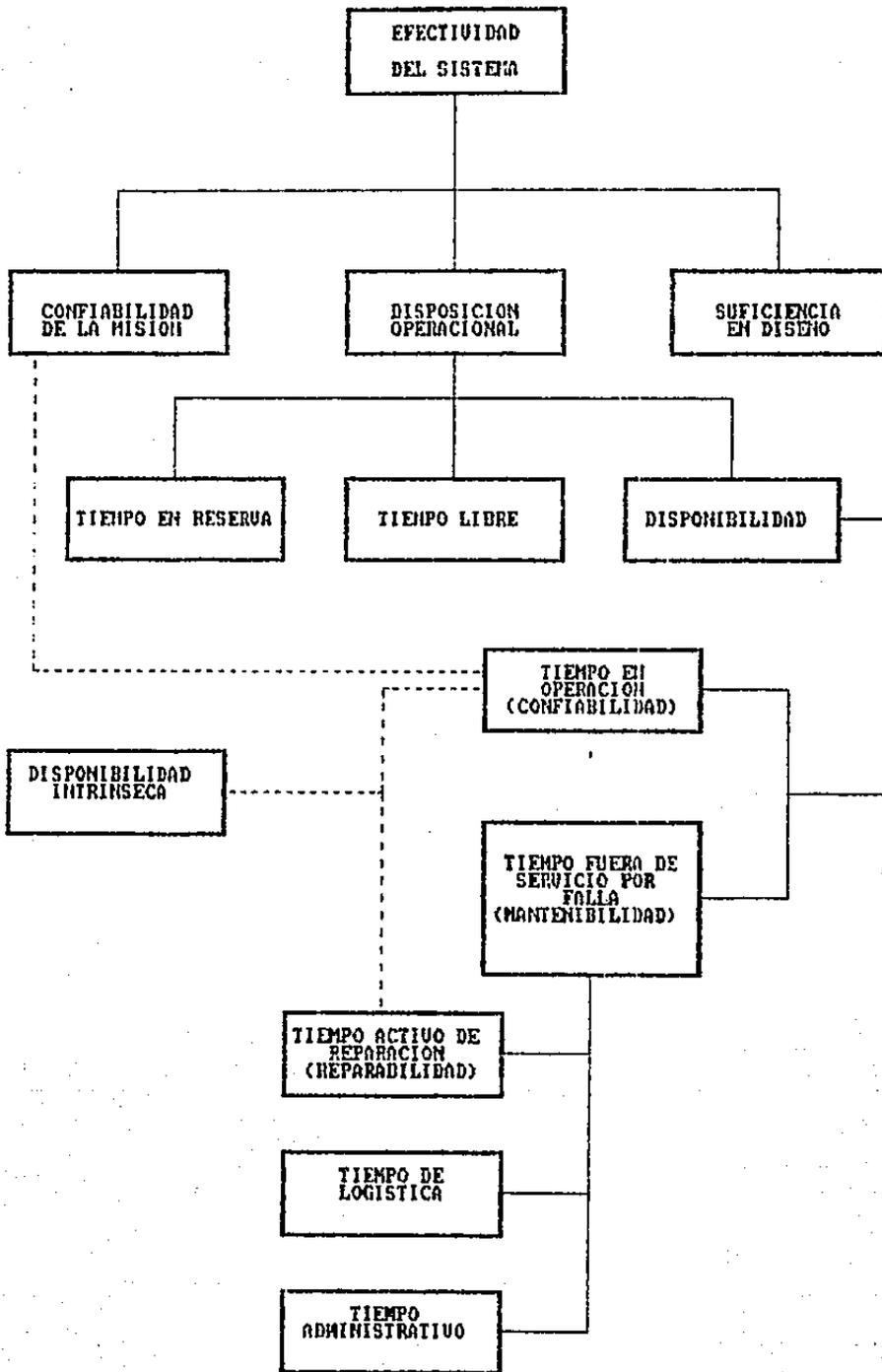


FIGURA 1 Conceptos sobre efectividad de un sistema.

CAPITULO 1

DESCRIPCION DEL SISTEMA PROPUESTO Y SU PROBLEMATICA

En este capítulo se especifica el caso de aplicación, tomando los equipos más representativos de las Unidades Generadoras ≥ 150 MW, es un caso ilustrativo para mostrar los datos mínimos requeridos para desarrollar procedimientos sobre estudios de Confiabilidad y Disponibilidad; se proporcionan datos históricos de la disponibilidad de equipos de acuerdo al concepto que aplica la Comisión Federal de Electricidad, con el propósito de mostrar cuales son los aspectos que afectan la producción de energía.

En resumen podemos decir que una Planta Termoeléctrica de vapor es una Planta destinada a generar electricidad y que comprende de tres componentes principales: Un generador de vapor (caldera), una turbina de vapor y un generador de corriente alterna.

En el generador de vapor, la energía potencial contenida en el combustible se transforma en energía calorífica para calentar y convertir el agua en vapor.

El vapor se conduce a la turbina y la energía calorífica se convierte en energía cinética o de movimiento en las toberas para luego convertirse en energía mecánica al hacer girar el rotor.

Al efectuar esto, la energía calorífica del vapor va disminuyendo y el trabajo realizado queda determinado por la diferencia de calor que tenía al entrar y al salir de la turbina.

Ahora al girar el rotor de la turbina, la energía mecánica del eje está en condiciones de generar electricidad.

Las partes principales del generador eléctrico son: el rotor, el estator y el excitador. El rotor del generador se halla acoplado al eje de la turbina y gira, en casi todas las Plantas a 3600 RPM. El excitador, que es un generador de corriente continua, se encuentra acoplado al eje del rotor también gira a 3600 RPM y produce electricidad para el rotor. Rodeando el rotor, pero sin tocarlo, se encuentra el estator del generador, es una pieza estacionaria que lleva un arrollamiento formado por bobinas.

Líneas de fuerza magnéticas radian del rotor electromagnetizado que son cortadas por el arrollamiento del estator. Esto produce un alto voltaje que se induce en el arrollamiento del estator, este voltaje se conduce por cables a los transformadores, para después, una vez elevado, conducirlo mediante las líneas de transmisión a los centros de consumo.

En la figura 1.1 se muestra el diagrama del sistema en donde se muestra el proceso del vapor principal que forma un sistema en serie que está constituido por dos tipos de subsistemas que son:

- a. Equipos individuales, considerados como subsistemas de un solo componente.
- b. Subsistemas formados por componentes individuales, el arreglo que se estudia es con equipos en reserva,

que es uno de los casos más comunes en las industrias.

LISTA DE COMPONENTES QUE INTEGRAN EL SISTEMA

1. Condensador.
2. A/B Bombas de condensado.
3. Calentadores de baja presión, se incluye el desgasificador.
4. A/B Bombas de agua de alimentación.
5. Calentadores de alta presión.
6. Precalentadores de aire regenerativo.
7. Generador de vapor.
 - 7.a. Economizador.
 - 7.b. Tubos de agua.
 - 7.c. Tubos pendientes (Platen walls).
 - 7.d. Recalentador.
 - 7.e. Sobrecalentador .
 - 7.f. Válvulas y otros.
8. Turbina de vapor.
9. Generador eléctrico.
10. Otros.

TURBINA

| DESCRIPCION | GENERAL | ESPECIFICAS |
|--------------|-----------------------|-----------------------|
| 1. CARBON | AT CARBON ANTRACITICO | AT CARBON ANTRACITICO |
| 2. COQUE | AT COQUE METALURGICO | AT COQUE METALURGICO |
| 3. GASES | AT GASES DE ESCORIA | AT GASES DE ESCORIA |
| 4. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 5. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 6. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 7. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 8. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 9. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 10. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 11. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 12. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 13. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 14. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 15. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 16. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 17. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 18. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 19. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 20. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 21. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 22. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 23. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 24. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 25. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 26. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 27. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 28. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 29. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 30. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 31. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 32. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 33. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 34. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 35. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 36. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 37. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 38. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 39. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 40. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 41. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 42. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 43. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 44. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 45. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 46. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 47. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 48. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 49. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 50. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 51. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 52. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 53. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 54. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 55. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 56. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 57. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 58. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 59. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 60. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 61. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 62. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 63. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 64. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 65. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 66. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 67. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 68. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 69. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 70. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 71. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 72. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 73. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 74. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 75. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 76. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 77. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 78. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 79. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 80. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 81. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 82. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 83. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 84. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 85. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 86. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 87. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 88. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 89. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 90. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 91. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 92. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 93. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 94. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 95. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 96. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 97. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 98. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 99. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |
| 100. ESCORIA | AT ESCORIA | AT ESCORIA |

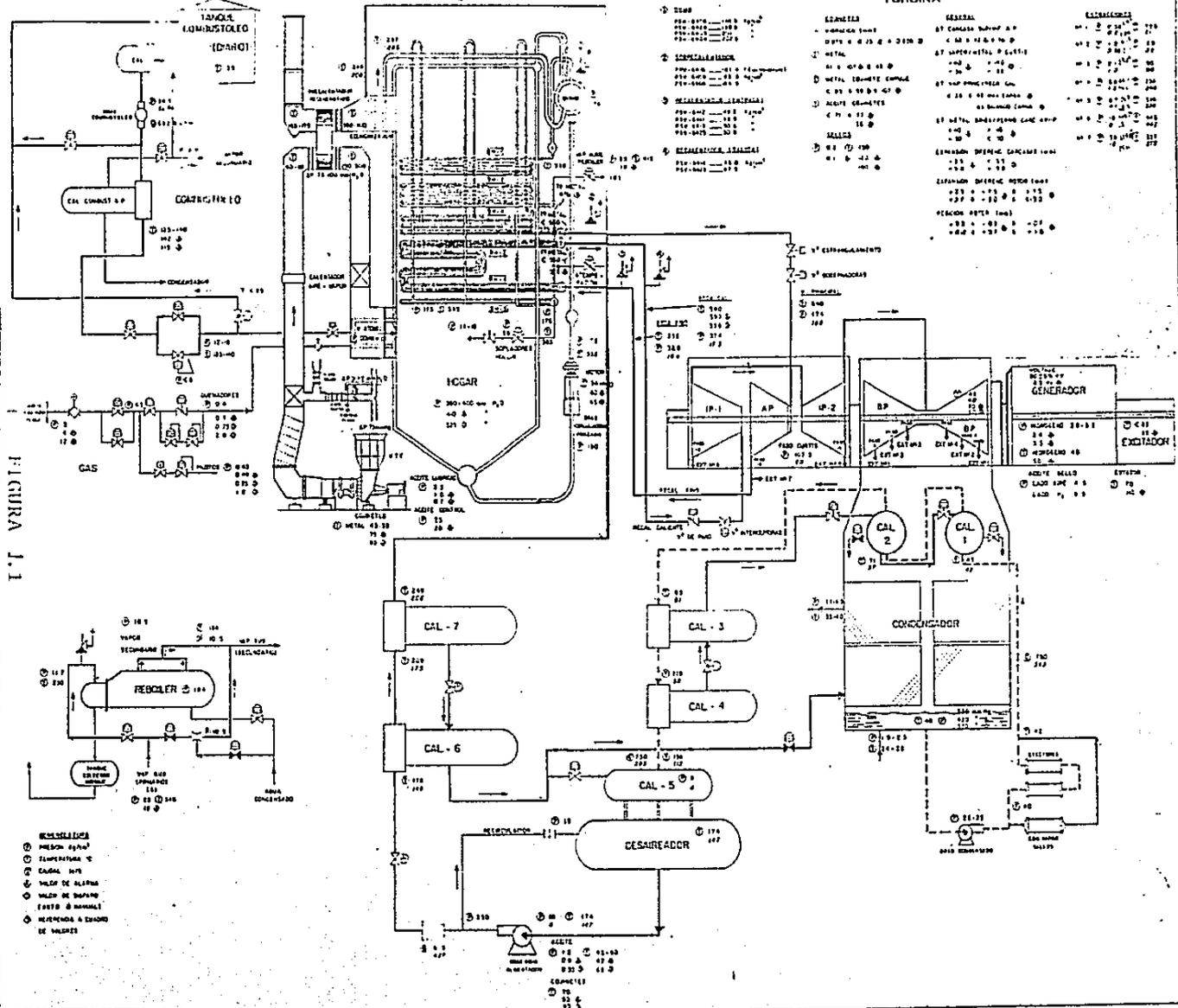


FIGURA 1.1

(O) PRESION (kg/cm²)
 (T) TEMPERATURA (°C)
 (C) Caudal (m³/h)
 (V) VALVE DE ALFAR
 (D) VALVE DE BOMBA
 (E) FORTO DE MARCHA
 (S) MANTENIMIENTO A ESTADO DE VALVULA

En la figura 1.2 se muestra el diagrama de bloques de confiabilidad del sistema propuesto para su análisis; el sistema en general es un arreglo en serie, integrado por componentes y subsistemas, uno de ellos también en serie que constituyen los componentes principales del generador de vapor (caldera), los otros dos subsistemas restantes son arreglos con redundancia en reserva formado por las bombas de condensado y de agua de alimentación.

Los índices de disponibilidad registrados para unidades termoeléctricas mayores a 75 MW de 1982 a 1984, indican un promedio anual del orden de 65 %, este valor se considera bajo al compararlo con el 80 % ó mayor al obtenido en plantas similares en E.E.U.U. En la tabla siguiente se muestran los equipos que contribuyen con mayor indisponibilidad en la unidad durante 1982-1984.

| EQUIPOS | 150-150 (MW) | 300 (MW) |
|---------------------------------------|--------------|----------|
| | (%) | (%) |
| Generador de vapor | 14.39 | 28.83 |
| Bombas de agua de alimentación. | 9.85 | 8.72 |
| Turbogenerador. | ----- | 8.72 |
| Precalentador de aire. | 8.33 | 8.47 |
| Tiros y recirculadores. | 6.83 | 6.38 |
| Tableros y protecciones. | 10.87 | 8.35 |
| Condensador. | 4.54 | 4.29 |
| Calentadores agua de alimentación. | 12.37 | 0.37 |
| Bombas de circulación forzada. | 11.36 | 1.22 |
| Errores de operación y mantenimiento. | 5.30 | 5.27 |
| Otros. | 16.16 | 19.38 |
| Total: | 100.00 | 100.00 |

Puede observarse que en las calderas (generador de vapor) se concentra aproximadamente un 15 % y un 29 % de la indisponibilidad total para ambos tamaños de central. Dentro de Otros se consideran fallas como: filtro Taprogge, control de quemadores, transformador principal, disturbio de

sistema, control de agua de alimentación ventiladores de torre de enfriamiento y transformadores auxiliares; estas fallas ocasionaron del 16 % al 19 % de la indisponibilidad de la unidad.

Considerando los datos anteriores se deben realizar estudios tendientes a disminuir y prevenir las fallas en subsistemas con mayor impacto en la disponibilidad.

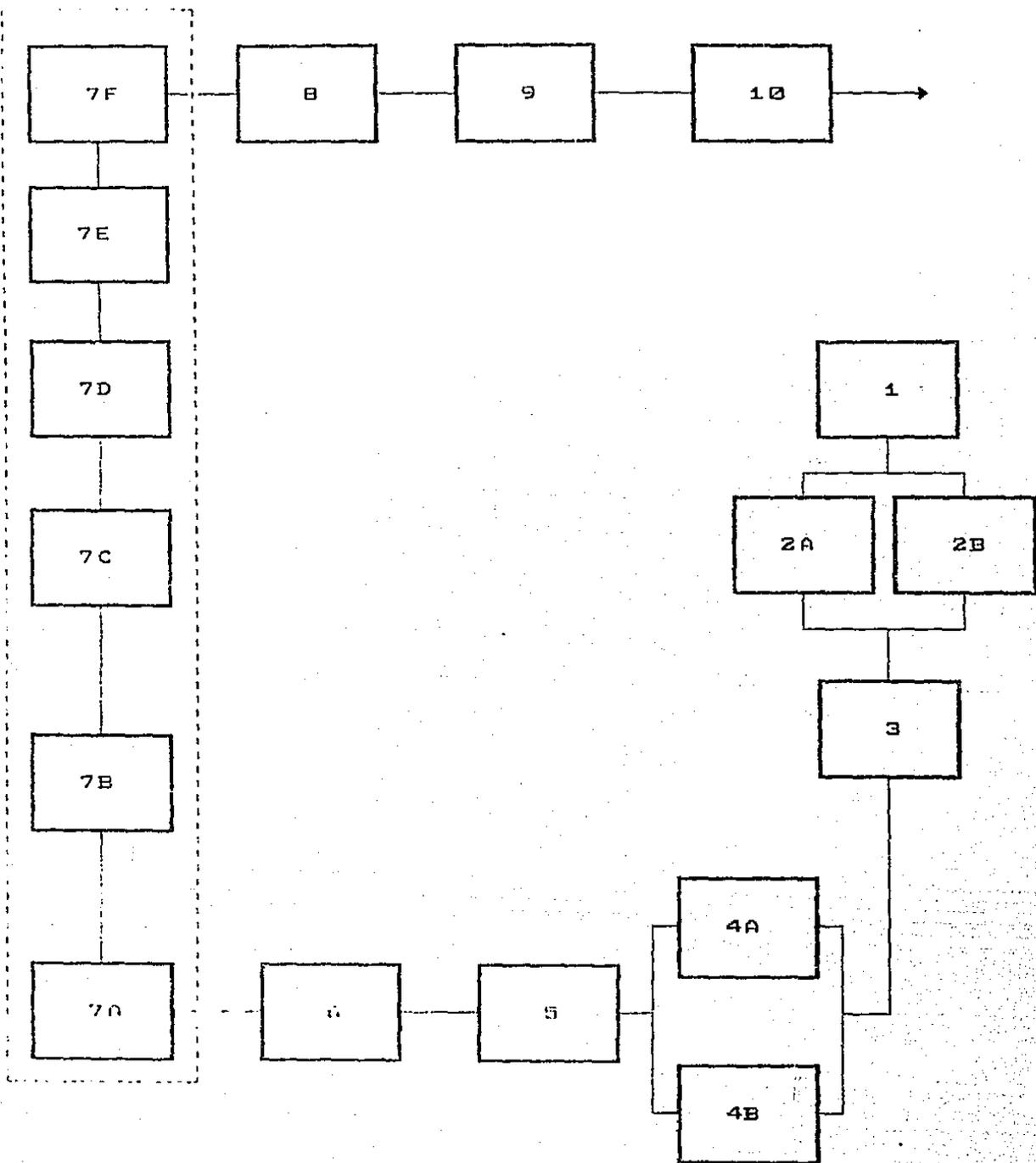


FIGURA 1.1 Diagrama de bloques que muestra el arreglo del sistema.

CAPITULO 2

EVALUACION DE LA CONFIABILIDAD DE SISTEMAS.

En este capítulo se describe las expresiones matemáticas para calcular la confiabilidad de los arreglos típicos que pueden constituir un sistema complejo, estos son: en serie, paralelo y con redundancia inactiva, también se desarrollan las expresiones específicas para los sistemas con componentes con distribución de falla exponencial.

2.1 CONFIABILIDAD DE SISTEMAS EN SERIE.

Se dice que un sistema tiene unidades en serie cuando la falla de cualquiera de ellas provoca la falla de todo el sistema. El diagrama de bloques de confiabilidad se muestra en la figura 2.1

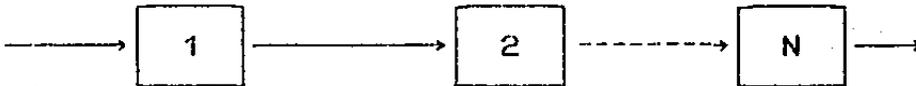


Figura 2.1 Diagrama de bloques de un sistema en serie.

La confiabilidad de este sistema es la probabilidad de que la unidad 1 tenga éxito, la unidad 2 no falle, etc. y que la unidad N no falle; si se acepta independencia estocástica para el funcionamiento de los componentes, entonces:

$$R_{SS} = R_1 \cdot R_2 \cdot \dots \cdot R_N = \prod_{i=1}^N R_i \quad (2.1)$$

$$\text{y} \quad Q_{SS} = 1 - R_{SS} \quad (2.2)$$

Para sistemas con componentes idénticos:

$$R_{SS} = R_i^n = (1 - Q_i)^n \quad (2.3)$$

$$Q_{SS} = 1 - R_i^n = 1 - (1 - Q_i)^n \quad (2.4)$$

Una forma aproximada de evaluar R_{SS} es:

$$R_{SS} = (1 - Q_i)^n = 1 + n \cdot (-Q_i)^1 + \frac{n(n-1)}{2} \cdot (-Q_i)^2 + \dots + (-Q_i)^n \quad (2.5)$$

$$\cong 1 - n \cdot Q_i$$

ya que Q_i suele ser muy pequeño.

Componentes con distribución exponencial

Muchos sistemas complejos o con servicio periódico tienen componentes con distribuciones de fallas de tipo exponencial, consecuentemente la tasa de falla es constante, λ_i , entonces la confiabilidad, R_i , de cada unidad está dada por:

$$R_i = e^{-\int_0^t \lambda_i(t) dt} = e^{-\lambda_i \int_0^t dt} = e^{-\lambda_i t} \quad (2.6)$$

donde λ_i es la tasa de falla correspondiente a la unidad i y t es el tiempo de la misión.

La confiabilidad del sistema R_{SS} , está dado por:

$$R_{SS} = e^{-\lambda_1 t} \cdot e^{-\lambda_2 t} \dots \dots e^{-\lambda_N t} = e^{-\left(\sum_{i=1}^N \lambda_i\right) t} \quad (2.7)$$

Donde $\sum_{i=1}^N \lambda_i$ es la tasa de falla del sistema, entonces

$$\lambda_{SS} = \sum_{i=1}^N \lambda_i \quad (2.8)$$

El tiempo medio entre fallas del sistema está dado por:

$$MTBF_{SS} = \int_0^{\infty} t f_{SS}(t) dt \quad (2.9)$$

donde $f_{SS}(t)$ es la f.d.p. de falla del sistema y existe desde 0 hasta ∞ , ó por:

$$MTBF_{SS} = \int_0^{\infty} R_{SS}(t) dt = \int_0^{\infty} e^{-\lambda_{SS} t} dt \quad (2.10)$$

$$\text{ó} \quad MTBF_{SS} = \frac{1}{\lambda_{SS}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^N \lambda_i} \quad (2.11)$$

OBSERVACIONES SOBRE LOS SISTEMAS EN SERIE.

Dado que $0 \leq R_i \leq 1$ entonces:

a. La confiabilidad del sistema será siempre menor a la del componente menos confiable, es decir:

$$R_{SS} \leq \text{Mín} \{R_i\}, \forall_i$$

b. La confiabilidad del sistema decrece rápidamente, conforme se aumenta el número de componentes.

c. En un sistema en serie todos los componentes son importantes; se dice que tiene redundancia nula.

d. La R_{SS} se puede mejorar reduciendo el número de componentes, desde luego que por diseño se exige un número definido de unidades.

f). La ganancia marginal en la confiabilidad del sistema se hace más pequeña conforme se incrementan las R_i .

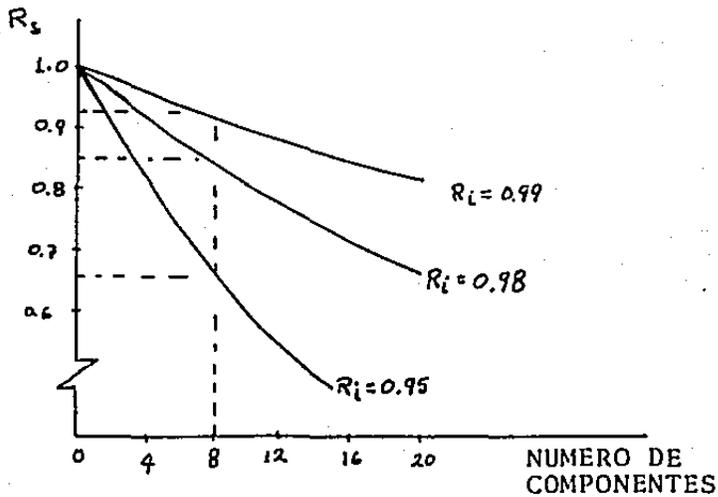


FIGURA 2.2 GRAFICA DE GANANCIA MARGINAL EN LA CONFIABILIDAD DE UN SISTEMA EN SERIE.

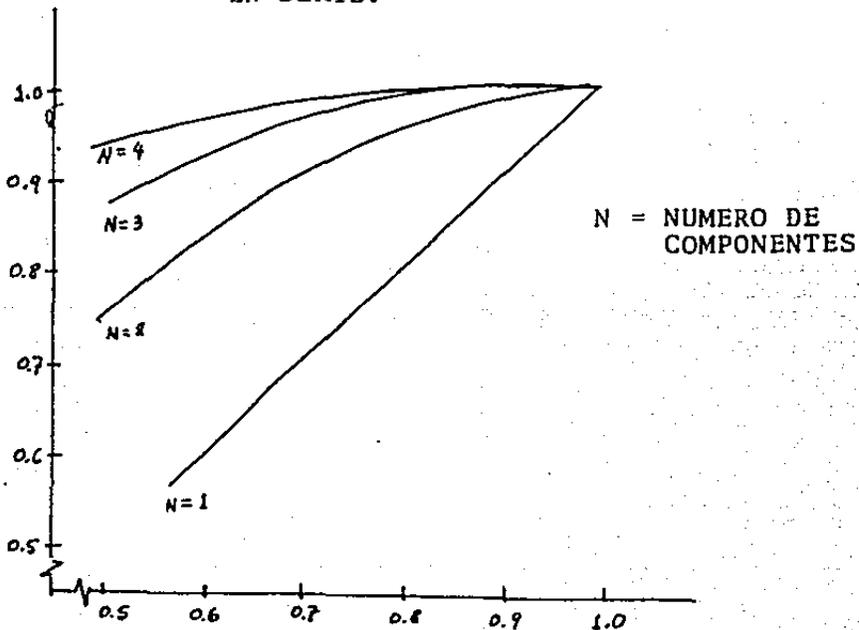


FIGURA 2.4 GANANCIA MARGINAL DE UN SISTEMA EN PARALELO.

2.2 CONFIABILIDAD DE SISTEMAS EN PARALELO.

Se dice que un sistema tiene unidades relacionadas en cuanto a su confiabilidad en paralelo, cuando solamente la falla de cualquiera de las unidades provoca la falla del sistema. Un sistema en paralelo se muestra en el diagrama de bloques de confiabilidad siguiente:

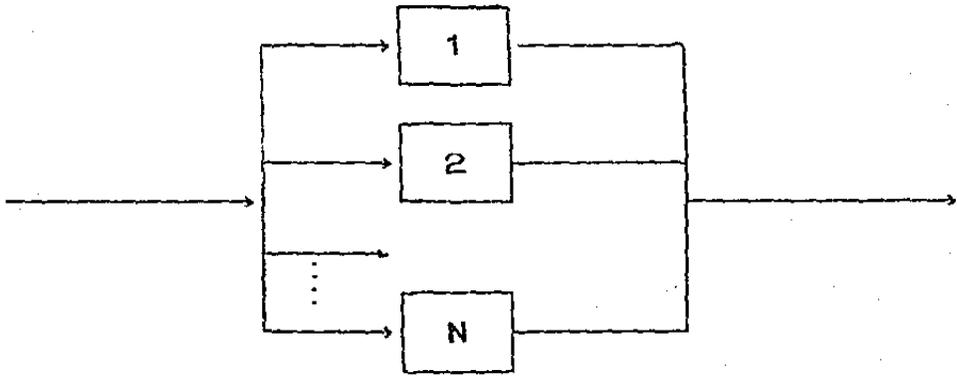


Figura 2.3 Diagrama de bloques de un sistema en paralelo.

Para este caso es más simple evaluar la inconfiabilidad del sistema, Q_{SP} , que es la probabilidad de que todas las unidades fallen, es decir, la unidad 1 falla y la unidad N falla, así que la confiabilidad del sistema se obtiene de:

$$R_{SP} = 1 - Q_{SP} \quad (2.12)$$

Matemáticamente y al suponer independencia estocástica:

$$Q_{SP} = Q_1 \cdot Q_2 \cdot \dots \cdot Q_N = \prod_{i=1}^N Q_i \quad (2.13)$$

$$R_{SP} = 1 - Q_{SP} = 1 - Q_1 \cdot Q_2 \cdot \dots \cdot Q_N \quad (2.14)$$

$$R_{SP} = 1 - \prod_{i=1}^N Q_i = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - R_i) \quad (2.15)$$

En palabras la confiabilidad de un sistema en paralelo es el complemento a la unidad del producto de las inconfiabilidades de todas las unidades en el sistema.

En el caso particular de contar con componentes idénticos en el sistema, se tiene:

$$Q_{SP} = \prod_{i=1}^N Q_i = Q^N \quad (2.16)$$

$$R_{SP} = 1 - Q_{SP} = 1 - Q^N \quad (2.17)$$

Componentes con distribución exponencial

Si las unidades tienen tasa de falla constantes; entonces la confiabilidad del sistema está dado por:

$$R_{SP} = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - e^{-\lambda_i t}) \quad (2.18)$$

y la tasa de falla del sistema por:

$$\lambda_{SP}(t) = \frac{f_{SP}(t)}{R_{SP}(t)} \quad (2.19)$$

para este caso:

$$f_{SP}(t) = - \frac{d}{dt} [R_{SP}(t)] \quad (2.20)$$

$f_{SP}(t)$ para N unidades es muy complejo, entonces la escribiremos únicamente para 2 unidades con el propósito de ilustrar el procedimiento:

$$R_{SP}(t) = 1 - \left[1 - e^{-\lambda_1 t} \right] \cdot \left[1 - e^{-\lambda_2 t} \right] \quad (2.21)$$

$$R_{SP} = e^{-\lambda_1 t} + e^{-\lambda_2 t} - e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t} \quad (2.22)$$

$$f_{SP}(t) = \frac{d}{dt} \left[e^{-\lambda_1 t} + e^{-\lambda_2 t} - e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t} \right] \quad (2.23)$$

$$= \lambda_1 e^{-\lambda_1 t} + \lambda_2 e^{-\lambda_2 t} - (\lambda_1 + \lambda_2) \cdot e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t} \quad (2.24)$$

Continuando con el sistema de 2 unidades en paralelo:

$$\lambda_{SP}(t) = \frac{f_{SP}(t)}{R_{SP}(t)} = \frac{\lambda_1 e^{-\lambda_1 t} + \lambda_2 e^{-\lambda_2 t} - (\lambda_1 + \lambda_2) \cdot e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t}}{e^{-\lambda_1 t} + e^{-\lambda_2 t} - e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t}} \quad (2.25)$$

Obsérvese que la tasa de falla del sistema en paralelo, $\lambda_{SP}(t)$, depende del tiempo, a pesar de tener individualmente tasas de falla constante para cada unidad.

El tiempo medio entre fallas del sistema está dado por:

$$MTBF_{SP} = \int_0^{\infty} R_{SP}(t) dt \quad (2.26)$$

para el caso específico de dos unidades:

$$MTBF_{SP} = \int_0^{\infty} \left[e^{-\lambda_1 t} + e^{-\lambda_2 t} - e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t} \right] dt \quad (2.27)$$

$$= \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} + \frac{1}{(\lambda_1 + \lambda_2)} \quad (2.28)$$

Se debe observar que:

$$\lambda \approx \frac{1}{MTBF_{SP}}$$

OBSERVACIONES SOBRE LOS SISTEMAS EN PARALELO.

Puesto que $0 \leq Q_i \leq 1$, existe dualidad respecto a los sistemas en serie, entonces:

a. Al aumentar el número de componentes la

confiabilidad del sistema aumenta.

b. La confiabilidad del sistema será siempre mayor o igual a la del componente con confiabilidad más alta

$$R_{SP} \geq \text{Máx} \{R_i\}, \forall i$$

c. En un sistema en paralelo ningún componente es preponderante. Se dice que los sistemas en paralelo tiene redundancia total.

d. La confiabilidad del sistema se puede mejorar aumentando el número de componentes, no se debe perder de vista que puede ser técnica ó económicamente infactible.

e. La ganancia marginal en R_{SP} se hace más pequeña conforme se incrementa R_i .

2.3 CONFIABILIDAD DE SISTEMAS CON REDUNDANCIA INACTIVA

Un sistema se dice que tiene confiabilidad con redundancia inactiva cuando una o más de sus unidades están en reserva hasta que son puestas en operación por medio de una señal, contrariamente a un sistema en paralelo donde todas las unidades operan simultáneamente. Un sistema de dos unidades con arreglo redundancia inactiva tiene éxito cuando la unidad que está funcionando no falla, o cuando la unidad ha fallado antes de que termine la misión y tanto la señal como el arranque de la otra unidad no falla por el resto del tiempo de la misión. La figura 2.5 muestra el arreglo.

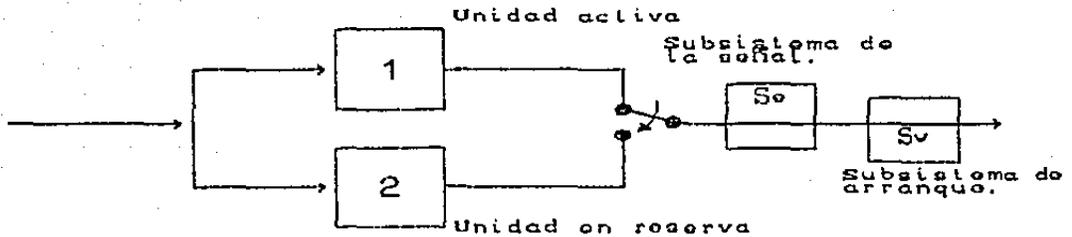


Figura 2.5 Sistema de dos unidades con redundancia inactiva.

La confiabilidad de este sistema es la probabilidad de que la unidad 1 funcione durante todo el tiempo T, o que la unidad 1 falle en algún tiempo t antes que T y que: tanto el sensor como el arrancador no falle en t, que la unidad en reserva no falle durante el tiempo que estuvo inactiva y funcione durante el resto de la misión. Matemáticamente la confiabilidad del sistema es:

$$R_{sn}(t) = R_1(t) + \int_{t_1=0}^t f_1(t_1) dt_1 \cdot R_{s0}(t_1) \cdot R_{sv}(1c) \cdot R_{2q}(t_1) \cdot R_2(t-t_1) \quad (2.30)$$

Componentes con distribución exponencial

Si todas las unidades tienen tasas de falla constantes y la unidad 1 tiene una tasa de falla activa λ_1 y también para el subsistema tanto del arranque como del sensor tienen λ_{sv} y λ_{s0} respectivamente, la unidad 2 tiene una tasa de falla en modo inactivo λ_{2q} y en funcionamiento λ_{2o} entonces, si se opera un ciclo:

$$R_{sn}(t) = e^{-\lambda t} + \int_{t_1=0}^t \lambda_1 e^{-\lambda_1 t_1} \cdot e^{-\lambda_{s0} t_1} \cdot e^{-\lambda_{sv} t_1} \cdot e^{-\lambda_{2q} t_1} \cdot e^{-\lambda_{2o} (t-t_1)} dt_1 \quad (2.31)$$

$$R_{SB}(t) = e^{-\lambda_1 t + \lambda_1 e^{-\lambda_{av}} \cdot e^{-\lambda_{2o} t}} \int_{t=0}^t e^{-\left[\lambda_1 + \lambda_{se} + \lambda_{av} + \lambda_{2q} - \lambda_{2o}\right] t_1} dt_1 \quad (2.32)$$

$$R_{SB}(t) = e^{-\lambda_1 t + \frac{\lambda_1 e^{-\lambda_{av}} \cdot e^{-\lambda_{2o} t}}{\lambda_1 + \lambda_{se} + \lambda_{2q} - \lambda_{2o}}} \left[1 - e^{-\left[\lambda_1 + \lambda_{se} + \lambda_{2q} - \lambda_{2o}\right] t} \right] \quad (2.33)$$

En el caso especial de que $\lambda_{av} = \lambda_{se} = \lambda_{2q} = \lambda_{2o}$, $\lambda_{12} = \lambda_2$

$$R_{SB}(t) = e^{-\lambda_1 t + \frac{\lambda_1 e^{-\lambda_2 t}}{\lambda_1 - \lambda_2}} \left[1 - e^{-\left[\lambda_1 - \lambda_2\right] t} \right] \quad (2.34)$$

$$R_{SB}(t) = e^{-\lambda_1 t + \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2}} \left[e^{-\lambda_2 t} - e^{-\lambda_1 t} \right] \quad (2.35)$$

Si las unidades son iguales $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_p$ que es uno de los casos más comunes en la realidad.

$$R_{SB}(t) = e^{-\lambda t} + \lambda t \cdot e^{-\lambda t} \quad (2.36)$$

$$= e^{-\lambda t} \cdot (1 + \lambda t) \quad (2.37)$$

Esta es la confiabilidad de un sistema con una unidad funcionando y una unidad en reserva, ambas unidades tienen la misma tasa de falla y con subsistemas de señal y arranque con una confiabilidad de 100 %.

En el caso particular de que se tengan n componentes idénticos en un sistema donde solo un componente está en reserva, la confiabilidad está dada por:

$$R_{SB}(t) = e^{-\lambda t} \left[1 + \lambda t + \frac{(\lambda t)^2}{2!} + \dots + \frac{(\lambda t)^{n-1}}{(n-1)!} \right] \quad (2.38)$$

$$= P[N_f \leq n-1] \quad (2.39)$$

y el tiempo medio entre fallas por:

$$MTBF_{sb} = \frac{n}{\lambda}$$

(2.40)

CAPITULO 3

ANALISIS DE LA CONFIABILIDAD DEL SISTEMA PROPUESTO.

La experiencia muestra que las fallas de equipos en operación siguen una f.d.p. de falla tipo Exponencial.

Las razones principales que hacen válida este supuesto son:

- a. La mayoría de los componentes están sujetos a mantenimiento periódicamente, esto implica que tengan un comportamiento estable debido a su renovación y consecuentemente que su tasa de falla sea constante.
- b. Cuando se tiene sistemas complejos la tasa de falla es aproximadamente constante, en nuestro caso los equipos considerados como unidad están formados por gran cantidad de partes ó elementos que llegan a ser unidades complejas, por ejemplo un equipo usual son las bombas de agua de alimentación.
- c. En la mayoría de las Plantas existe una etapa llamada " puesta en servicio ", en donde se realizan calibraciones y pruebas de aceptación de los equipos, de tal manera que podemos considerar este periodo como el de "purgado" o edad prematura y el sistema inicia su etapa que hemos venido considerando como la vida útil.

Apoyándonos bajo los argumentos anteriormente señalados calcularemos la confiabilidad del sistema.

El desarrollo del procedimiento está dividido de acuerdo a la clasificación descrita anteriormente, es decir se analizará primero un solo componente y después los arreglos con más de un componente.

3.1 ANÁLISIS DE UN SOLO COMPONENTE.

Los procedimientos de análisis dependen principalmente de la información con que se cuenta, de hecho es uno de los problemas con los que se enfrenta una persona, sobre todo en nuestro país, es la falta de documentación sobre los registros o datos en general relacionados con la disponibilidad y confiabilidad de equipos, en otros países existen Sistemas de Datos muy completos y en ocasiones tan específicos como en el sector eléctrico [9]. Ante esta situación se tomarán algunos datos típicos reportados en la literatura para fines de análisis.

De acuerdo a la información los métodos de análisis son:

- Utilización de datos de campo.
- Usando gráficas de papel de probabilidad para estimar los parámetros de la distribución de fallas.

EMPLEANDO DATOS DE CAMPO.

Este procedimiento se emplea cuando se tienen muchos datos, es muy aplicable en pruebas de vida , cuando se someten a prueba varios especímenes. Entonces con el número de fallas agrupadas en intervalos de tiempo se encuentran l

y λ , como se describió en el apéndice A sobre la estimación de la tasa de falla.

Construyendo el histograma y la curva de la tasa de fallas, se puede ver de acuerdo a la tendencia en cual etapa de vida, zona de falla, se encuentra el equipo y en su caso constatar que la tasa de fallas es constante.

Un criterio que se puede aplicar para decidir si es o no constante es calcular el promedio y compararlo con los límites superior e inferior, estos valores deben estar entre $\pm 5\%$, de ésta forma se acepta o no que el equipo se encuentre en su zona de vida útil.

USO DE PAPELES DE PROBABILIDAD.

Para modelar la zona de vida útil necesitamos que la tasa de fallas sea constante y esta condición está representada por la f.d.p. de fallas tipo Exponencial.

La distribución de un sólo parámetro está dada por:

$$f(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda t} ; f(t) \geq 0, \lambda > 0, t \geq 0 \quad (3.1)$$

Donde: λ = Tasa de falla casual fr/Hr, fr/ciclo, fr/milla, etc.

t = Tiempo hasta la falla Hr, ciclo, millas.

e = 2.718281828

Para definir la función anterior solo se requiere del parámetro λ , que puede ser evaluado por alguno de los métodos siguientes:

Estimación del parámetro, λ , aplicando el procedimiento de datos agrupados.

Se encuentra λ estimada para cada grupo de de datos:

$$\hat{\lambda}(t_i) = \frac{N_r(\Delta t_i)}{N_s \cdot \Delta t_i} \quad (3.2)$$

Si los datos son exponencialmente distribuidos entonces los valores de $\hat{\lambda}(t_i)$ para todos los grupos deben ser cercanos entre si; consecuentemente promediando estos valores se tendrá un buen estimado del valor real de λ

$$\hat{\lambda} = \frac{\sum_{i=1}^K \hat{\lambda}(t_i)}{K} \quad (3.3)$$

Donde K= número de clases en datos agrupados.

Conociendo λ se pueden establecer todas las funciones relacionadas con la confiabilidad.

$$\lambda(t) = \lambda = \text{constante.}$$

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (3.4)$$

Para este caso la función de confiabilidad condicional:

$$R(t, t_1) = \frac{R(t, t_1)}{R(t)} = \frac{e^{-\lambda(t+t_1)}}{e^{-\lambda t}} = e^{-\lambda t} \quad (3.5)$$

Estimación del parámetro λ , usando papeles de probabilidad.

Aplicando logaritmos a ambos lados a la función exponencial de la confiabilidad, tenemos:

$$\ln R(t) = -\lambda t \quad (3.6)$$

Grafique on escala aritmética $R(t)$ contra t , ó si se tiene papel semi-logarítmico grafique $R(t)$ en la ordenada y t en la abscisa por último ajuste los puntos a una línea recta.

Para encontrar el parámetro λ , se tienen dos maneras:

- i) Entre a la gráfica $R(t) = 36.8 \%$, dirijase hacia la línea recta ajustada con los datos graficados, entonces bajando verticalmente lea el valor t correspondiente.

El valor encontrado es \hat{m} y $\hat{\lambda} = \frac{1}{\hat{m}}$

Lo anterior es porque si $t = m$

$$R = e^{-\hat{m}/\hat{m}} = e^{-1} = 36.8 \%$$

- ii) Determine la pendiente de la línea recta ajustada. El valor absoluto de ésta pendiente es $\hat{\lambda}$ de la ecuación (3.6).

Nótese que para encontrar λ , se requiere conocer $R(t)$, que su mejor estimación es $R(t)$ obtenida de:

$$R(t) = 1 - Q(t) = M.R.$$

Donde:

$Q(t)$ = Estimación de la confiabilidad.

M.R. = Rangos medianos (Median Rank).

$$M.R. = \frac{i - 0.3}{n + 0.4}$$

El criterio de rangos medianos (M.R.) proporciona la mejor estimación de $Q(t)$ con un nivel de confianza de 50 %.

Para datos no agrupados grafique el M.R. de cada tiempo hasta la falla. Para datos agrupados grafique M.R. de cada clase, en base al número acumulativo de fallas que hayan ocurrido hasta la terminación del intervalo, contra el punto medio de cada intervalo de clase. Para este caso si se hace

una prueba de bondad de ajuste Kolmogorov-Smirnov y los valores observados son comparados visualmente con los esperados de $Q(t)$, entonces se recomienda que los valores de cada clase se grafiquen contra el límite superior de la clase correspondiente.

Si casualmente se presenta el caso donde todas las unidades se apegan a la distribución exponencial y todas son registradas hasta la falla, y también el tiempo de misión es menor que las horas acumuladas de todas las unidades registradas, entonces una mejor estimación de la confiabilidad es:

$$R(t) = \left[1 - \frac{t}{T_a} \right]^{N-1} \quad (3.7)$$

t = tiempo de la misión, Hr..

T_a = Horas de operación acumuladas durante la prueba, Hr.

N = Número de unidades en la prueba, y todas las N unidades son probadas hasta la falla.

3.2 ANALISIS ESTADISTICO DE LA TASA DE FALLA DE EQUIPOS.

La validez de los resultados cuantitativos pueden, en la práctica, estar limitados por la calidad y cantidad de datos. Sin embargo cuando se hacen análisis de sensibilidad o comparaciones, situaciones comunes en Ingeniería, los resultados son útiles y no dependen de que tan extensos sean los datos.

Una de las etapas más importantes en el desarrollo de un análisis de confiabilidad de sistemas es la estimación de la tasa de falla; el método ideal para obtener información de la tasa de falla es dejar que los componentes hablen "por si mismos". Si muchos componentes son operados durante un período de tiempo suficientemente largo, y los registros son adecuados considerando su experiencia en operación, ésta información proporcionará una estimación exacta del comportamiento esperado de las fallas de dichos componentes. Esto parece simple pero es lo ideal.

En realidad al tratar de cuantificar la confiabilidad uno se encuentra con que se usan componentes diferentes en sus condiciones de operación y métodos de registro de datos también diferentes; pero estas complicaciones no deben oponerse a la obtención de resultados.

La estimación de la tasa de falla requiere de la aplicación del juicio ingenieril tanto teórico como un conocimiento práctico de las técnicas involucradas. El aspecto teórico en la determinación de la tasa de falla exige conocimientos sobre probabilidad y estadística; la parte práctica requiere de conocer el origen de los datos respecto a la confiabilidad y disponibilidad, también tener bases sobre los mecanismos de fallas en los componentes.

En el caso que nos concierne, la información de campo es el registro del tiempo de operación y número de fallas en los equipos. Hasta el momento hemos venido manejando la tasa de falla constante dados los argumentos anteriores, pero

en caso de requerirse la verificación de los supuestos anteriores a un caso particular, se pueden realizar pruebas de bondad de ajuste ya conocidas como son: chi-cuadrada, Kolmogorov-Smirnov.

Para el caso de la f.d.p. de falla tipo exponencial en componentes reparables, el estimador de máxima verosimilitud de λ [2], denotado por $\hat{\lambda}$ está dado por:

$$\hat{\lambda} = \frac{n}{T_i} \quad (3.8)$$

$$T_i = \sum_{i=1}^n t_i \quad (3.9)$$

Donde:

T = Tiempo hasta la n -ésima falla.

t_i = Tiempo entre fallas, es decir:

t_1 = tiempo hasta la primer falla.

t_2 = tiempo entre la primera y segunda falla.

⋮

t_n = tiempo entre la $(n-1)$ -ésima y la n -ésima falla.

n = El número de fallas.

En muchas ocasiones lo que se conoce es el número de veces en que falló el componente y el tiempo total de operación acumulado T . Así que la estimación de λ es:

$\hat{\lambda}$ = número de fallas/tiempo total de operación.

$$\hat{\lambda} = \frac{n}{T} \quad (3.10)$$

$\hat{\lambda}$ y $\hat{\lambda}^*$ son iguales, sí y solo sí la n -ésima falla ocurre exactamente en el tiempo T^* . Esto es $\hat{\lambda}^*$ es siempre menor que o igual a $\hat{\lambda}$. Considérese la figura 3.1

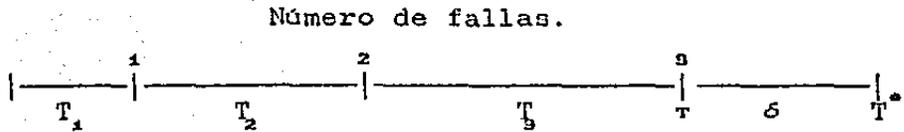


Figura 3.1 Tiempos de falla.

Este es un ejemplo de un proceso que ha fallado tres veces en el periodo de tiempo T^* , pero el tiempo T no es igual a T^* . entonces $T^* = T + \delta$.

El intervalo de confianza de λ , a un nivel $1-\alpha$, está dado por:

$$\frac{\chi_{\alpha/2; 2n}^2}{2T^*} \leq \lambda \leq \frac{\chi_{1-\alpha/2; 2n}^2}{2T^*} \quad (3.11)$$

Donde $\chi_{\alpha/2; 2n}^2$ es un $\alpha/2$ percentil de la distribución chi-cuadrada con $2n$ grados de libertad, y α , significancia, es la probabilidad de que una muestra dará un intervalo de confianza que no incluye a λ .

Cuando se cuenta con T^* es como si se realizara una prueba terminada por tiempo y sus límites de confianza solamente en forma aproximada se pueden determinar por:

$$\frac{\chi_{\alpha/2; 2n}^2}{2T^*} \leq \lambda \leq \frac{\chi_{1-\alpha/2; 2n+2}^2}{2T^*} \quad (3.12)$$

Este resultado es interesante ya que un límite superior de λ pueda ser calculado aunque no hayan ocurrido fallas en un sistema.

$$\lambda \leq \frac{\chi_{1-\alpha; 2n}^2}{2T^*} \quad (3.13)$$

A lo que se le llama intervalo de un solo lado.

Para aclarar lo anterior considérese el ejemplo

siguiente: se tiene un motor eléctrico que está sujeto a mantenimiento, así que no existen efectos de desgaste y por lo tanto es válido considerar una tasa de fallas constante.

Si al final de 10000 Hr han ocurrido 2 fallas, entonces:

$$\hat{\lambda}^* = \frac{2}{10000} = 2.0 \times 10^{-4} \quad (3.14)$$

Sin embargo, la segunda falla ocurrió en 8320 Hr, esto es:

$$\hat{\lambda}^* = \frac{2}{8320} = 2.4 \times 10^{-4} \quad (3.15)$$

Usando las tablas de la distribución Chi-cuadrada encontramos los valores de los percentiles 0.025 y 0.975 con 4 grados de libertad: 0.484 y 11.1; para 6 grados de libertad: 1.24 y 14.4

Entonces el intervalo de confianza de λ usando $\hat{\lambda}^*$ es:

$$\frac{0.484}{20000} \leq \lambda \leq \frac{14.4}{20000} \quad (3.16)$$

y el intervalo de confianza de λ usando $\hat{\lambda}$ es

$$\frac{0.484}{2(8320)} \leq \lambda \leq \frac{11.1}{2(8320)} \quad (3.17)$$

$$\text{o} \quad 2.9 \times 10^{-5} \leq \lambda \leq 6.7 \times 10^{-4}$$

Si no se observaron fallas en las primeras 10 000 Hr. el límite superior con 95 % de confianza será:

$$\lambda \leq \frac{5.99}{20\ 000}$$

$$\lambda \leq 2.99 \times 10^{-4} \quad (3.18)$$

Donde 5.99 es el 0.95 percentil de la distribución Chi-cuadrada con 2 grados de libertad. El resultado anterior es muy útil porque permite una cota superior en la tasa de falla cuando no se ha observado ninguna de ellas.

Por otra parte se pueden establecer los límites de confianza

como se muestra en la figura 3.6. Separando los límites inferior, λ_L , y superior λ_U , de la ecuación (3.12), escribimos:

$$\hat{\lambda}_L^* = \frac{\chi_{\alpha/2; 2n}^2}{2T^*} \quad (3.19)$$

$$\hat{\lambda}_U^* = \frac{\chi_{1-\alpha/2; 2n+2}^2}{2T^*} \quad (3.20)$$

Substituyendo T^* de ec. (3.10) en (3.19 y 3.20), tenemos:

$$\lambda_L^* = \frac{\chi_{\alpha/2; 2n}^2}{2n} \cdot (\hat{\lambda}) \quad (3.21)$$

$$\lambda_U^* = \frac{\chi_{1-\alpha/2; 2n+2}^2}{2n} \cdot (\hat{\lambda}) \quad (3.22)$$

La desviación del nivel de confianza inferior de $\hat{\lambda}^*$ en porcentaje de $\hat{\lambda}$ es:

$$\%Dev_L = 100 \cdot \left\{ 1 - \frac{\lambda_L^*}{\hat{\lambda}} \right\} \quad (3.23)$$

Similarmente, la desviación del nivel de confianza superior de λ en porcentaje de λ :

$$\%Dev_U = 100 \cdot \left\{ \frac{\lambda_U^*}{\hat{\lambda}} - 1 \right\} \quad (3.24)$$

Con las ecuaciones 3.19-3.24 se puede obtener la figura 3.2.

Con las curvas mostradas se evita la búsqueda en tablas de $\chi_{\alpha;n}^2$; λ_L^* y λ_U^* son graficadas en términos de la desviación de $\hat{\lambda}$ como función del número de fallas observadas.

En situaciones reales a menudo las fallas registradas para muchos equipos son tan pocas como para hacer una estimación de la tasa de falla suficientemente exacta. En la literatura [17] se aplicó el criterio de tener de 8 a 10 fallas registradas para lograr una exactitud "buena" en la estimación de las tasas de falla de los equipos. En los casos en que no se cumpla este requisito, lo que se sugiere es hacer una combinación de categorías de equipos, desde luego siempre que sea razonable desde el punto de vista ingenieril, hasta conseguir un mínimo de 10 fallas en cada tipo de equipo.

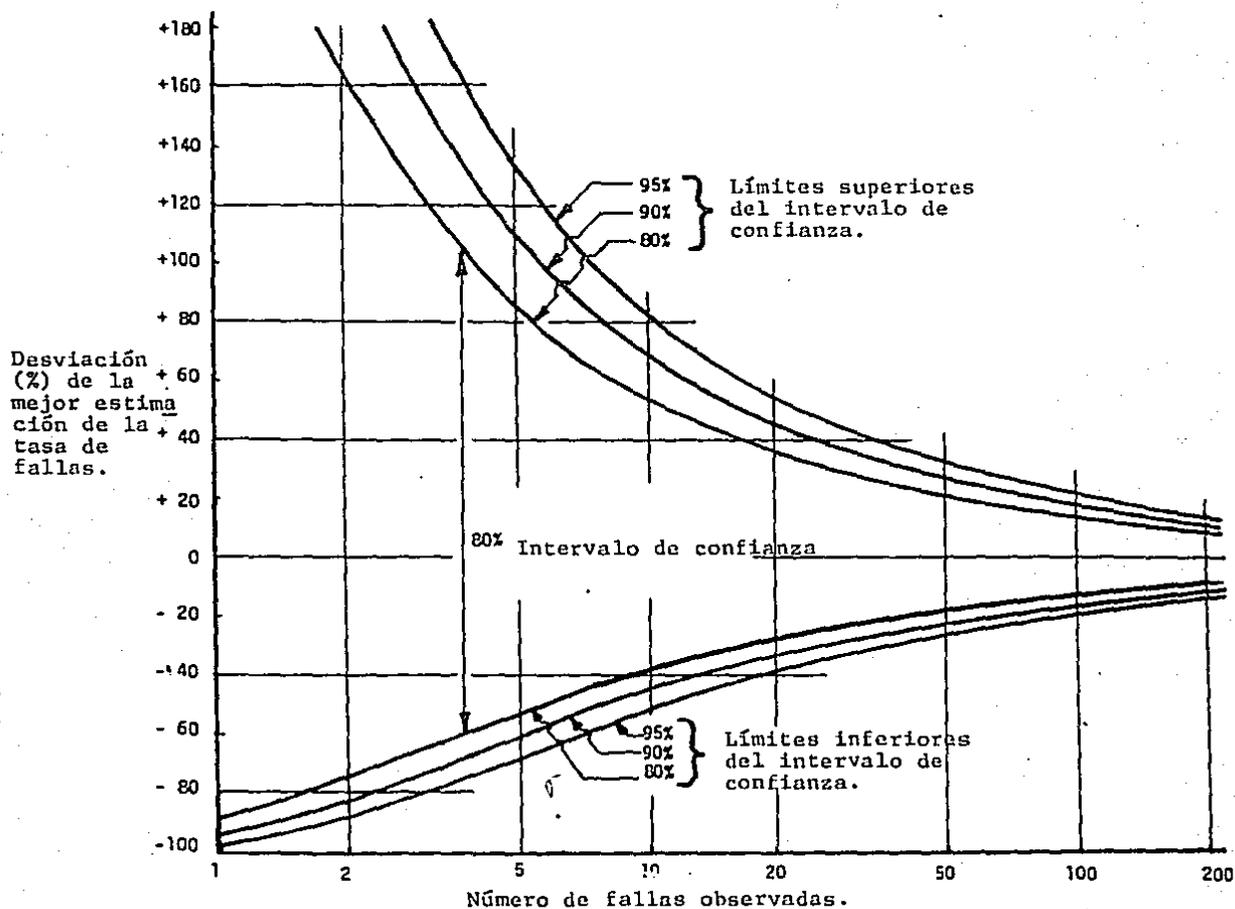


FIGURA 3.2 LÍMITES DE CONFIANZA DE LA TASA DE FALLA. [17]

3.3 ANALISIS DE SUBSISTEMAS CON MANTENIMIENTO.

Un sistema con mantenimiento ó reparación es un sistema de unidades en el que se permite efectuar reparaciones durante la misión cuando el sistema aún no ha fallado.

Para sistemas con componente único no tiene sentido hablar de un sistema con mantenimiento, puesto que si falla el componente, falla el sistema y consecuentemente la misión ha terminado. Un sistema con dos ó más unidades en redundancia se acepta la reparación hasta que al menos una de las dos unidades sobreviva hasta el fin de la misión. La reparación es realizada sobre las unidades que han fallado durante la misión.

En un sistema de N unidades, N+1 estados son posibles:

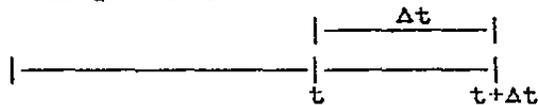
| ESTADO | DESCRIPCION |
|--------|---|
| N | Todas las unidades son operables y están operación. |
| N - 1 | N - 1 unidades son operables y están en operación, una unidad ha fallado y está en reparación. |
| N - 2 | N - 2 unidades son operables y están en operación, 2 unidades han fallado y están en reparación; una a la vez (reparación única), o más de una unidad, están en reparación al mismo tiempo (reparaciones múltiples) |

1 Solamente una unidad es operable y está en operación y el resto está en reparación múltiple o única.

0 Todas las unidades han fallado, o el sistema falló, ninguna sobrevive y el sistema no puede reestablecerse porque la misión ha terminado.

En nuestro caso particular se tratarán los componentes con tasa de falla λ y μ reparación constantes, los argumentos fueron dados al principio de este capítulo.

Entonces la probabilidad de falla en el período Δt para una unidad es: $P[t, \Delta t+t] = \lambda \cdot \Delta t$, dado que estuvo operando en el tiempo t en que inició el período:



La probabilidad de que una o más fallen en $(t, t+\Delta t)$ es:

$$\begin{aligned}
 &P[1 \text{ fallo}] + P[2 \text{ fallos}] + \dots + P[n \text{ fallos}] = \\
 &= \lambda \Delta t + (\lambda \Delta t)^2 + \dots + (\lambda \Delta t)^N \quad (3.25)
 \end{aligned}$$

Si Δt es pequeña, la potencia de Δt es pequeña, entonces, se hacen más despreciables, y la probabilidad de que una o más fallen en $(t, t+\Delta t)$ es:

$$\lambda \cdot \Delta t \quad (3.26)$$

Se asume que el proceso de reparación será exponencial tal que la mayoría de las fallas pueden ser reparadas en corto tiempo, mientras aquellos componentes que fallan con poca frecuencia toman un tiempo de reparación mayor.

Entonces la tasa de reparación es constante. La probabilidad de terminar la reparación en el intervalo $(t, t+\Delta t)$ dado que no fué terminado en el tiempo t es:

$$\mu \cdot \Delta t \quad (3.27)$$

y la probabilidad de completar una ó más reparaciones en $(t, t+\Delta t)$ es también $\mu \cdot \Delta t$.

Para encontrar la confiabilidad de tales sistemas asumimos que el sistema arranca siempre en el estado N y que las probabilidades de transición desde un estado al siguiente son independientes del estado en que se encuentra el sistema, también se supone que la operación es continua como realmente sucede. Si la operación no es continua las expresiones de la confiabilidad se mantienen siempre y cuando el estado del sistema na haya cambiado durante los períodos cuando el sistema no está operable.

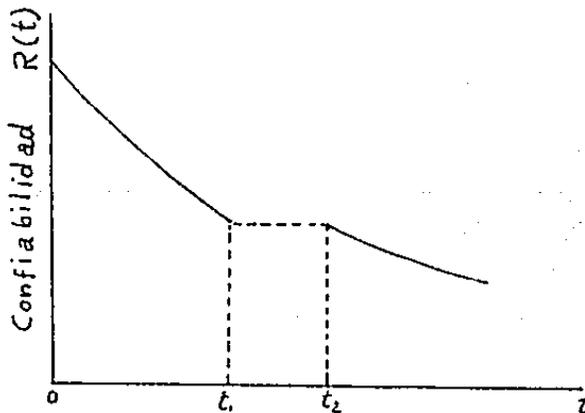


Figura 3.3 Gráfica de la confiabilidad contra el tiempo de misión, para el caso de operación discontinua.

PROCEDIMIENTO GENERAL DE CALCULO.

a. Identifique todos los estados posibles del sistema reparable como los estados 0, 1, 2, etc., anteriormente descritos.

b. Escriba con palabras la probabilidad de existencia de cada estado en el tiempo $(t+\Delta t)$ ó $P_i(t+\Delta t)$.

Considere solamente los estados inmediatamente antes y después pero no los más lejanos, porque estos estados posteriormente introducen términos diferenciales de orden superior.

A este enfoque se le llama Proceso Markoviano, que asume que los estados futuros del sistema depende de su estado presente y no de su historia pasada. Note que la suma de las probabilidades de cualquier estado posible deben sumar la unidad ó

$$\sum_{i=0}^N P_i(t) = 1 \quad (3.28)$$

Donde $P_i(t)$ = Probabilidad de estar en el estado i en el tiempo t .

N = El número máximo de estados.

Lo anterior se debe a que se tienen todos los estados posibles y forman un conjunto completo de elementos mutuamente excluyentes.

c. Escriba las probabilidades del paso anterior matemáticamente en términos diferenciales:

La probabilidad de falla en Δt es $\lambda \cdot \Delta t$

porque : $P(\text{falla en } \Delta t) = \frac{N_i(\Delta t)}{N} = \frac{\lambda \cdot \Delta t \cdot N_u}{N} = \lambda \cdot \Delta t$

y la probabilidad de que no falle es: $(1 - \Delta t)$

Similarmente la probabilidad de terminar un mantenimiento y/o una reparación en Δt es:

$$\mu \cdot \Delta t \quad (3.29)$$

y de no terminar:

$$(1 - \mu \cdot \Delta t) \quad (3.30)$$

- d. Las ecuaciones deducidas en el paso anterior, arréguelas en forma de una ecuación diferencial.
- e. Resuelva para $P_0(t)$ usando las transformadas de Laplace de cada ecuación diferencial obtenida en el paso d.
- f. Entonces:

$$R_{\lambda, \mu}(t) = 1 - P_0(t) \quad (3.31)$$

Donde: $R_{\lambda, \mu}(t)$ = Es la confiabilidad de un sistema sujeto a reparación con una tasa de falla λ en fallas/Hr y una tasa de reparación μ en reparaciones/Hr. ..

$P_0(t)$ = La probabilidad de que el sistema falle en t .

APLICACION AL ARREGLO DE LAS BOMBAS.

Uno de los arreglos comunmente encontrados en instalaciones industriales es el siguiente:

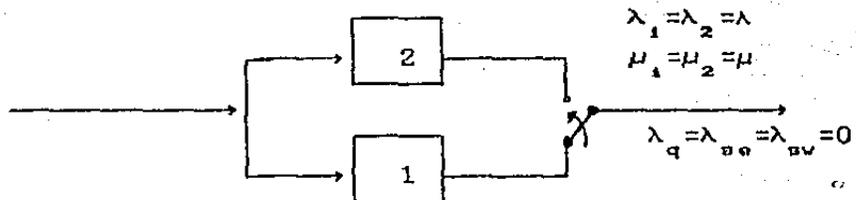


Figura 3.4 Diagrama de bloques de un sistema con reparaciones correctivas con una unidad activa (1) y la otra en reserva (2).

Originalmente ambas unidades son operables, una unidad está en operación y la otra unidad está en reserva inactiva. La unidad activa opera hasta la falla, en ese momento la otra unidad es arrancada e inicia su operación, mientras la reparación empieza en la unidad que falló. Cuando la unidad que falló es reparada, inicia su estado en reserva inactiva. Si una falla ocurre cuando no existe reserva inactiva, ambas unidades están en estado de falla y consecuentemente el sistema ha fallado. En esta solución se asume que la señal del sensor y el arranque son perfectos. En cualquier momento el sistema está en uno de los estados siguientes:

| ESTADO | DESCRIPCION |
|--------|---|
| 2 | Ambas unidades son operables y una está en operación. |
| 1 | Una unidad está en operación y la otra unidad está fuera de servicio por falla y se está reparando. |
| 0 | Ambas unidades se encuentran fuera de servicio y por lo tanto el sistema ha fallado. |

La cadena de Markov para el sistema se muestra en la figura 3.5.

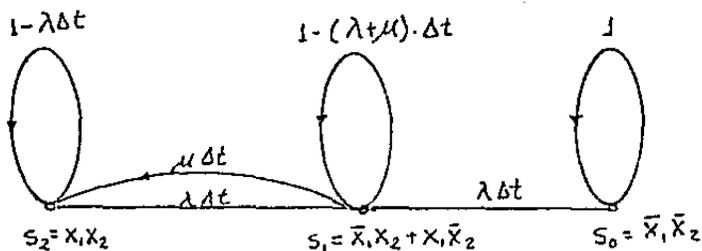


Figura 3.5 Gráfica de Markov para unidades iguales, una activa y una en reserva con reparaciones.

El procedimiento consiste en los pasos siguientes:

1. Los círculos pequeños son llamados nodos.
2. Cada nodo representa un estado del sistema.
3. Los ciclos en cada nodo (estado) son llamados ciclos propios, indicando en ellos la probabilidad de permanecer en el estado designado por el nodo en Δt ó en $t + \Delta t$.
4. Cada nodo está designado por el estado que representa por ejemplo: $X_1 \bar{X}_2$ es decir, la unidad 1 tiene éxito y la unidad 2 falla.
5. Los nodos están conectados por líneas rectas y curvas a las que se les llama ramas; las líneas rectas indican las transiciones por falla y las curvas reparaciones.
6. En cada rama se escribe la probabilidad de transición correspondiente.

7. El coeficiente de cada probabilidad de transición se le llama coeficiente de transición.

La matriz de transición correspondiente al sistema es:

$$P = \begin{matrix} & \begin{matrix} \text{Estado} \\ \text{1} \\ \text{2} \end{matrix} & \begin{matrix} \text{Estado} \\ \text{1} \\ \text{2} \end{matrix} & \begin{matrix} \text{Estado} \\ \text{0} \\ \text{1} \end{matrix} & \\ \begin{matrix} \text{Estado} \\ \text{1} \\ \text{2} \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1-\lambda & \lambda & 0 \\ \mu & 1-(\lambda+\mu) & \lambda \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & \begin{matrix} 2 \\ 1 \\ 0 \end{matrix} & \begin{matrix} 2 \\ 1 \\ 0 \end{matrix} & \begin{matrix} 2 \\ 1 \\ 0 \end{matrix} \\ \text{Estados en } (t+\Delta t) & & & & \end{matrix}$$

Figura 3.6 Matriz de estados de transición de la confiabilidad de una unidad activa y una en reserva con reparaciones.

Una vez construida la gráfica de Markov indicando las probabilidades en cada rama. Siga las reglas que a continuación se enlistan para obtener la confiabilidad del sistema.

- A. Asegúrese de que la suma de las probabilidades de transición de todas las ramas que salen de cada nodo sea igual a 1.
- B. La probabilidad de estar en cualquier nodo en $t + \Delta t$ es la suma de todas las ramas que llegan al nodo. Todos los otros nodos son considerados como fuente de probabilidad y todas las probabilidades de transición como ganancias de transmisión.
- C. Un algoritmo para escribir las ecuaciones diferenciales para cada estado del sistema es el siguiente.
 - C.1 Igualar la derivada de la probabilidad de cualquier nodo con la suma de las transmisiones

que llegan al nodo.

C.2 Los factores de ganancias unitarias de los ciclos propios deben ser igualados a cero.

C.3 Los factores Δt son descartados de las ganancias de las ramas.

Usando estas reglas y el diagrama de Markov podemos escribir las ecuaciones diferenciales directamente como sigue:

$$P_2'(t) = -\lambda P_2(t) + \mu P_1(t) \quad (3.32)$$

$$P_1'(t) = \lambda P_2(t) - (\lambda + \mu) P_1(t) \quad (3.33)$$

$$P_0'(t) = -\lambda P_1(t) \quad (3.34)$$

También: $P_2(0) = 1$; $P_1(0) = P_0(0) = 0$

La confiabilidad del sistema de ejemplo se puede obtener de:

$$R(t) = 1 - P_0(t) \quad (3.35)$$

Entonces debemos encontrar $P_0(t)$, que puede ser por integración de la ecuación:

$$P_0'(t) = \lambda P_1(t) \quad (3.36)$$

una vez que se encuentre $P_1(t)$, para ello usaremos las transformadas de Laplace que convierte las ecuaciones diferenciales en no-diferenciales que pueden ser resueltas más fácilmente.

Sus transformadas de Laplace son:

$$(s + \lambda) P_2(s) - \mu P_1(s) = 1 \quad (3.37)$$

$$\lambda P_2(s) - (s + \lambda + \mu) P_1(s) = 0 \quad (3.38)$$

$$-\lambda P_1(s) + s P_0(s) = 0 \quad (3.39)$$

Resolviendo ecuaciones (3.37) y (3.38) simultáneamente :

$$P_1(s) = \frac{\begin{vmatrix} s+\lambda & 1 \\ \lambda & 0 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} s+\lambda & -\mu \\ \lambda & -(s+\lambda+\mu) \end{vmatrix}} \quad (3.40)$$

$$P_1(s) = \frac{\lambda}{s^2 + (2\lambda + \mu)s + \lambda^2} \quad (3.41)$$

$$P_1(s) = \frac{\lambda}{s_1 - s_2} \left[\frac{1}{s - s_1} - \frac{1}{s - s_2} \right] \quad (3.42)$$

Por expansión de fracciones parciales, donde

$$s_1 = -\frac{1}{2} \left[(2\lambda + \mu) - (\mu^2 + 4\lambda \cdot \mu)^{1/2} \right] \quad (3.43)$$

$$s_2 = -\frac{1}{2} \left[(2\lambda + \mu) + (\mu^2 + 4\lambda \cdot \mu)^{1/2} \right] \quad (3.44)$$

Obteniendo la inversa de la transformada de Laplace.

$$P_1(t) = \frac{\lambda}{s_1 - s_2} \left[e^{s_1 t} - e^{s_2 t} \right] \quad (3.45)$$

$$P_0'(t) = \lambda P_1(t)$$

$$P_0'(t) = \frac{\lambda^2}{s_1 - s_2} \left[e^{s_1 t} - e^{s_2 t} \right] \quad (3.46)$$

$$P_0(t) = 1 + \frac{s_2 e^{s_1 t} - s_1 e^{s_2 t}}{(s_1 - s_2)} \quad (3.47)$$

Entonces: $R(t) = 1 - P_0(t)$

y finalmente:

$$R(t) = \frac{s_1 e^{s_2 t} - s_2 e^{s_1 t}}{s_1 - s_2} \quad (3.48)$$

CAPITULO 4

DISPONIBILIDAD DEL SISTEMA PROPUESTO

En este capítulo se explica como calcular la disponibilidad de unidades y sistemas a los que se les da mantenimiento; se tratan con tres conceptos de disponibilidad que son: disponibilidad instantánea, disponibilidad en la misión y la disponibilidad en estado estable.

4.1 DISPONIBILIDAD DE UNA SOLA UNIDAD CON REPARACION.

Disponibilidad instantánea.

Se calcula la disponibilidad de una sola unidad con reparación, dada una λ y una μ en el tiempo t desde el inicio de su operación, ver figura 4.1.

El componente puede estar en dos estados:

Estado 1: La unidad está operando y por lo tanto disponible.

Estado 0: La unidad ha fallado y está en reparación.

En la figura 4.2 se muestra una gráfica de Markov de la disponibilidad de una sola unidad.

La matriz de los estados de transición está dada por:

$$\begin{array}{c} \text{Estados en } t+\Delta t \\ \text{de estado} \\ \text{en } t \end{array} \begin{array}{cc} & \begin{array}{c} \text{Estados en } t+\Delta t \\ 1 \quad 0 \end{array} \\ \begin{array}{c} 1 \\ 0 \end{array} & \begin{bmatrix} 1-\lambda & \lambda \\ \mu & 1-\mu \end{bmatrix} \end{array}$$

Figura 4.3 Matriz de los de la disponibilidad de una sola unidad.

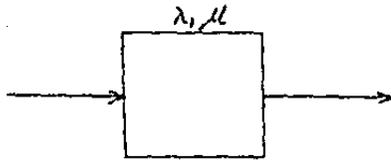


FIGURA 4.1 DISPONIBILIDAD DE UNA SOLA UNIDAD CON REPARACION, DADA UNA λ Y μ EN EL TIEMPO t DESDE EL INICIO DE OPERACION.

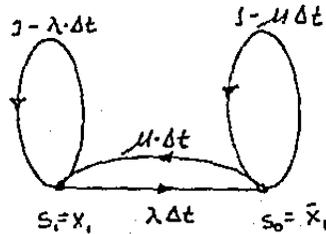


FIGURA 4.2 GRAFICA DE MARKOV PARA LA DISPONIBILIDAD DE UNA SOLA UNIDAD.

La disponibilidad de unidades solas es:

$$A(t) = P_1(t) \quad (4.1)$$

y

$$P_1(t) + P_0(t) = 1 \quad (4.2)$$

Donde:

$P_0(t)$ = indisponibilidad de la unidad.

Entonces:

$$P_1'(t) = -\lambda P_1(t) + \mu P_0(t) \quad (4.3)$$

$$P_1'(t) = \lambda P_1(t) - \mu P_0(t) \quad (4.4)$$

y

$$P_1(0) = 1, \quad P_0(0) = 0$$

Las transformadas de Laplace de estas ecuaciones son:

$$(s + \lambda)P_1(s) - \mu P_0(s) = 1 \quad (4.5)$$

y

$$-\lambda P_1(s) + (s + \mu)P_0(s) = 0 \quad (4.6)$$

Resolviendo estas ecuaciones para $P_1(s)$

$$P_1(s) = \frac{\begin{vmatrix} 1 & -\mu \\ 0 & s+\mu \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} s+\mu & -\mu \\ -\lambda & s+\mu \end{vmatrix}} \quad (4.7)$$

o

$$P_1(s) = \frac{s + \mu}{s(s + \lambda + \mu)} \quad (4.8)$$

y

$$P_1(s) = \frac{s}{s(s + \lambda + \mu)} + \frac{\mu}{s(s + \lambda + \mu)} \quad (4.9)$$

o

$$P_1(s) = \frac{1}{s + \lambda + \mu} + \frac{\mu}{s_1 - s_2} \left[\frac{1}{s - s_1} - \frac{1}{s - s_2} \right] \quad (4.10)$$

donde: $s_1 = 0$ y $s_2 = -(\lambda + \mu)$

por lo tanto:

$$P_1(s) = \frac{1}{s + \lambda + \mu} + \frac{\mu}{\lambda + \mu} \left\{ \frac{1}{s} - \frac{1}{s - [-(\lambda + \mu)]} \right\} \quad (4.11)$$

$P_1(t) = \mathcal{L}^{-1} [P_1(s)]$ por consiguiente:

$$P_1(t) = e^{-(\lambda + \mu)t} + \frac{\mu}{\lambda + \mu} \left[1 - e^{-(\lambda + \mu)t} \right] \quad (4.12)$$

y

$$A(t) = P_1(t) = \underbrace{\frac{\mu}{\lambda + \mu}}_{\text{Componente estable}} + \underbrace{\frac{\mu}{\lambda + \mu} \cdot e^{-(\lambda + \mu)t}}_{\text{Componente Transitorio.}} \quad (4.13)$$

Disponibilidad en la misión, $A(m) \cdot (t_2 - t_1)$.

$$A(m) \cdot (t_2 - t_1) = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} A(t) \cdot dt \quad (4.14)$$

La disponibilidad en estado estable, A_s .

$$A_s = \lim_{t \rightarrow \infty} A(t) = A(\omega) \quad (4.15)$$

por lo tanto:

como $\lambda = \frac{1}{\text{MTBF}}$ y $\mu = \frac{1}{\text{MTTR}}$ da como resultado que la disponibilidad en estado estable.

$$A_s = \frac{\text{MTTR}}{\text{MTBF} + \text{MTTR}} \quad (4.16)$$

Usualmente μ es mucho mayor que λ , y A_s puede tomarse como:

$$A_s = \frac{1}{1 + \lambda/\mu} = 1 - \frac{\lambda}{\mu} + \frac{\lambda^2}{\mu^2} + \frac{\lambda^3}{\mu^3} \approx 1 - \frac{\lambda}{\mu} \quad (4.17)$$

La parte transitoria de la disponibilidad decae relativamente rápido resultando despreciable, entonces:

$$t \approx \frac{4}{\lambda - \mu} \quad (4.18)$$

Si μ es substancialmente mayor que λ , entonces la parte transitoria queda como:

$$t \approx \frac{4}{\mu} \quad (4.19)$$

En la figura 4.4 se indica la disponibilidad de una sola unidad con reparación, mostrando el efecto asintótico hasta llegar a la disponibilidad en estado estable como una función de:

$$\frac{1}{\lambda + \mu} \quad (4.20)$$

A su vez la figura 4.5 representa las disponibilidades instantánea y en estado estable de una sola unidad tipo exponencial.

4.2 DISPONIBILIDAD DEL SISTEMA.

Considere un sistema en serie general contituido por n componentes con tasas de falla λ , y tasas de reparación μ . Suponga que solo se permite una reparación a la vez, ó que hay una sola instalación para reparación.

Las probabilidades de estado de los sistemas en serie son los siguientes:

$P_1(t)$ = Probabilidad de que el sistema este en el estado 1, ó este operando; y

$P_{0i}(t)$ = Probabilidad de que el sistema este en el estado 0, ó este fuera de servicio por falla en t , porque uno de los componentes en serie falló

La probabilidad de que falle el sistema en Δt está dada por la probabilidad de que uno ó más componentes fallen.

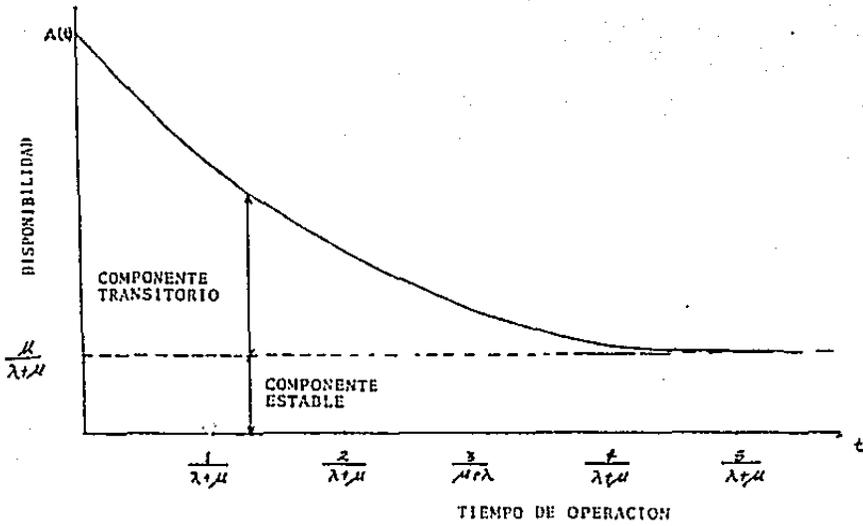


FIGURA 4.4 DISPONIBILIDAD DE UNA SOLA UNIDAD CON REPARACION.

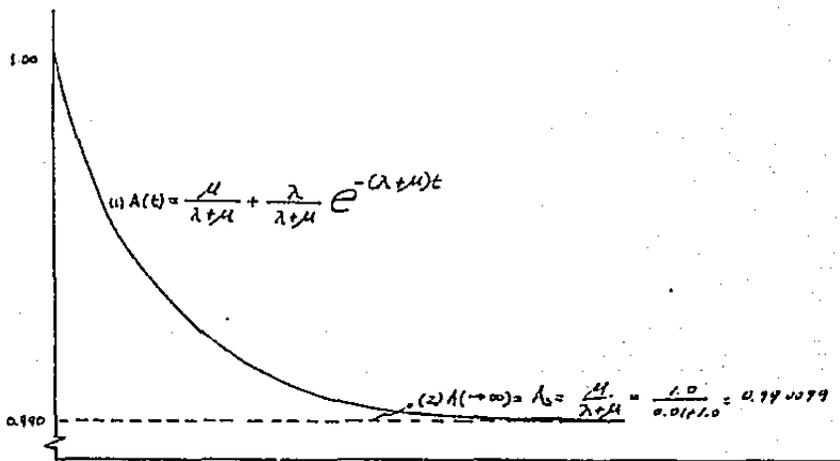


FIGURA 4.5 DISPONIBILIDAD DE UN SOLO COMPONENTE O SISTEMA.
 (1) DISPONIBILIDAD PUNTUAL O INSTANTANEA
 (2) DISPONIBILIDAD EN ESTADO ESTABLE
 $\lambda = 0.01$ fallas/h; $\mu = 1.0$ reparaciones/h.

Considerando que los términos de orden superior de Δt (con Δt pequeña) tiende a cero, esta probabilidad esta dada por:

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i \Delta t \quad (4.21)$$

Similarmente la probabilidad de que el sistema sea reparado en Δt , dado que el sistema ha fallado, está dado por:

$$\sum_{i=1}^n P_{oi}(t) \mu_i \Delta t \quad (4.22)$$

Por lo tanto:

$$P_1(t+\Delta t) = P_1(t) \cdot (1 - \sum_{i=1}^n \lambda_i \Delta t) + \sum_{i=1}^n P_{oi}(t) \mu_i \Delta t \quad (4.23)$$

ó

$$P_1'(t) = -\sum_{i=1}^n \lambda_i P_1(t) + \sum_{i=1}^n \mu_i P_{oi}(t) \quad (4.24)$$

También

$$P_{oi}(t+\Delta t) = P_1(t) \lambda_i \Delta t + P_{oi}(t)(1 - \mu_i \Delta t) \quad (4.25)$$

ó

$$P_{oi}'(t) = -\mu_i P_{oi}(t) + \lambda_i P_1(t) \quad (4.26)$$

Si las condiciones iniciales son $P_1(0) = 1$ y $P_{oi}(0) = 0$ para $i \neq 0$, tomando las transformadas de Laplace en ambos lados, se obtiene:

$$s \cdot P_1(s) - 1 = \sum_{i=1}^n \lambda_i P_1(s) + \sum_{i=1}^n \mu_i P_{oi}(s) \quad (4.27)$$

y

$$s \cdot P_{oi}(s) - \mu_i P_{oi}(s) + \lambda_i P_1(s) \quad (4.28)$$

ó

$$P_{oi}(s) = \frac{\lambda_i}{s + \lambda_i} \cdot P_1(s) \quad (4.29)$$

Sustituyendo este resultado en la ecuación para el estado 1 se tiene:

$$s \cdot P_1(s) - 1 = - \sum_{i=1}^n \lambda_i P_1(s) + \sum_{i=1}^n \frac{\mu_i \cdot \lambda_i}{s + \mu_i} \cdot P_1(s) \quad (4.30)$$

$$= - \sum_{i=1}^n \frac{s \cdot \lambda_i}{s + \mu_i} \cdot P_1(s) \quad (4.31)$$

y

$$P_1(s) = \frac{1}{s \left[1 + \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i}{s + \mu_i} \right]} \quad (4.32)$$

Tomando λ_i y μ_i este resultado puede ser escrito en fracciones múltiples, usando el método de las fracciones parciales. Entonces podemos obtener la inversa de la transformada de Laplace de las fracciones resultantes y así obtener la disponibilidad del sistema.

$$A(t) = \mathcal{L}^{-1} \left\{ P_1(s) \right\} = P_1(t) \quad (4.33)$$

La disponibilidad en estado estable por "el teorema del valor final."

$$A_s = A(t \rightarrow \infty) = \lim_{t \rightarrow \infty} P_1(t) \quad (4.34)$$

$$A_s = \lim_{s \rightarrow 0} \mathcal{L}^{-1} \lim_{s \rightarrow 0} \left[s P_1(s) \right] \quad (4.35)$$

o

$$A_s = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i}{\mu_i}} \quad (4.36)$$

Para el caso especial en que $\mu_i = \mu$,

$$P_1(s) = \frac{1}{s \left[1 + \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i}{s + \mu} \right]} \quad (4.37)$$

$$P_1(s) = \frac{s + \mu}{s \left[s + \mu + \sum_{i=1}^n \lambda_i \right]} \quad (4.38)$$

o

$$P_1(s) = \frac{\mu}{\mu + \sum_{i=1}^n \lambda_i} \cdot \frac{1}{s} + \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i}{\mu + \sum_{i=1}^n \lambda_i} \cdot \frac{1}{s + \mu + \sum_{i=1}^n \lambda_i} \quad (4.39)$$

Donde:

$$\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (4.40)$$

consecuentemente:

$$A(t) = P_1(t) = \frac{\mu}{\mu + \lambda} + \frac{\lambda}{\mu + \lambda} \cdot e^{-(\mu + \lambda)t} \quad (4.41)$$

que es un resultado previamente obtenido para la disponibilidad de una sola unidad con tasa de falla λ y tasa de reparación μ .

Por otra parte:

$$P_{oi}(s) = \frac{\lambda_i}{s + \mu_i} \cdot P_1(s) \quad (4.42)$$

Substituyendo para $P_1(s)$ en el resultado anterior nos queda que:

$$P_{oi}(s) = \frac{\lambda_i}{s + \mu_i} \cdot \frac{1}{s \left[1 + \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i}{s + \mu_i} \right]} \quad (4.43)$$

Si $\mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_n = \mu$ esta ecuación se convierte en:

$$P_{oi}(s) = \frac{\lambda_i}{s(s + \mu + \lambda)} \quad (4.44)$$

Donde:

$$\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (4.45)$$

es la tasa de falla de los sistemas en serie, ó

$$P_{oi}(s) = \frac{\lambda_i}{\mu + \lambda} \cdot \frac{1}{s} - \frac{\lambda_i}{\mu + \lambda} \cdot \frac{1}{s + \mu + \lambda} \quad (4.46)$$

La inversa de la transformada de Laplace de esta expresión es:

$$P_{oi}(s) = \frac{\lambda_i}{\mu + \lambda} - \frac{\lambda_i}{\mu + \lambda} \cdot e^{-(\lambda + \mu)t} \quad (4.47)$$

Esta ecuación nos da la probabilidad de que un sistema en serie falle cuando la i-ésima unidad falle.

En general si un sistema tiene subsistemas en serie que a su vez están relacionando sus disponibilidades en serie, es decir, se requiere que cada subsistema este disponible para que el sistema este también disponible, entonces la disponibilidad instantánea de este tipo de sistemas es calculado por:

$$A_{s-s}(t) = \prod_{i=1}^n A_i(t) \quad (4.48)$$

Donde:

- A_i = la disponibilidad del i-ésimo subsistema
- n = el número de subsistemas que están funcionando con disponibilidades en serie

En nuestro caso de aplicación hemos venido manejando un subsistema de dos bombas una activa y una en reserva.

En la tabla 4.1 encontramos para este caso y otros sistemas, compuestos hasta por tres unidades, las disponibilidades considerando que todas las unidades tienen distribuciones de falla y reparación de tipo exponencial [20].

Table 2 - Availability of Some Redundant Systems Based on Exponential Failure and Repair Distributions*

| No. of Equipments | Continuous | | Instantaneous Availability Model | Definitions of Constants for Instantaneous Availability Model | Steady State Availability | |
|-------------------|-----------------|----------|---|--|---|---|
| | Type Redundancy | Repair | | | Model | Av. for $\lambda = 0.01$ $\mu = 0.2$ |
| 1 | Standby | Single | $A(t) = \frac{\mu}{\mu + \lambda} + \frac{\lambda}{\mu + \lambda} e^{-(\mu + \lambda)t}$ | $r_1 = -(\lambda + \mu) + \sqrt{\mu\lambda}$ $r_2 = -(\lambda + \mu) - \sqrt{\mu\lambda}$ | $\frac{\mu}{\mu + \lambda}$ | 0.95 |
| | | Multiple | $A(t) = \frac{\mu^2 + \mu\lambda}{\mu^2 + \mu\lambda + \lambda^2} - \frac{\lambda^2(e_1 e^{r_1 t} - e_2 e^{r_2 t})}{e_1 r_1 (e_1 - e_2)}$ | $r_1 = -[(2\lambda + 3\mu) + \sqrt{\mu^2 + 4\mu\lambda}]$ $r_2 = -[(2\lambda + 3\mu) + \sqrt{\mu^2 + 4\mu\lambda}]$ | $\frac{\mu^2 + \mu\lambda}{\mu^2 + \mu\lambda + \lambda^2}$ | 0.978 |
| 2 | Parallel | Single | $A(t) = \frac{\mu^2 + 2\mu\lambda}{\mu^2 + 2\mu\lambda + 2\lambda^2} - \frac{2\lambda^2(e_1 e^{r_1 t} - e_2 e^{r_2 t})}{e_1 r_1 (e_1 - e_2)}$ | $r_1 = -[(\lambda + 2\mu) + \sqrt{\lambda^2 + 4\mu\lambda}]$ $r_2 = -[(\lambda + 2\mu) + \sqrt{\lambda^2 + 4\mu\lambda}]$ | $\frac{\mu^2 + 2\mu\lambda}{\mu^2 + 2\mu\lambda + 2\lambda^2}$ | 0.996 |
| | | Multiple | $A(t) = \frac{\mu^2 + 2\mu\lambda}{\mu^2 + 2\mu\lambda + \lambda^2} - \frac{2\lambda^2(e_1 e^{r_1 t} - e_2 e^{r_2 t})}{e_1 r_1 (e_1 - e_2)}$ | $r_1 = 2(\mu + \lambda)$ $r_2 = -(\mu + \lambda)$ | $\frac{\mu^2 + 2\mu\lambda}{\mu^2 + 2\mu\lambda + \lambda^2}$ | 0.998 |
| 3 | Standby | Single | $A(t) = \frac{\mu^2 + \mu^2\lambda + \mu\lambda^2}{\mu^2 + \mu^2\lambda + \mu\lambda^2 + \lambda^3} - \frac{\lambda^3(e_1 e^{r_1 t} - e_2 e^{r_2 t} - e_3 e^{r_3 t} + e_1 r_1 e_2 - e_2 r_2 e_1 - e_3 r_3 e_2 - e_1 e_2 r_3)}{e_1 r_1 (e_1 - e_2) (e_1 - e_3)}$ | $r_1, r_2, \text{ and } r_3 \text{ correspond to the three roots of } r^3 + r^2(3\lambda + 3\mu) + r(\lambda^2 + 3\mu\lambda + 3\mu^2) + (\lambda^3 + \mu\lambda^2 + \lambda\mu^2 + \mu^3)$ | $\frac{\mu^2 + \mu^2\lambda + \mu\lambda^2}{\mu^2 + \mu^2\lambda + \mu\lambda^2 + \lambda^3}$ | 0.9999 |
| | | Multiple | $A(t) = \frac{6\mu^2 + 6\mu^2\lambda + 3\mu\lambda^2}{6\mu^2 + 6\mu^2\lambda + 3\mu\lambda^2 + \lambda^3} - \frac{\lambda^3(e_1 e^{r_1 t} - e_2 e^{r_2 t} - e_3 e^{r_3 t} + e_1 r_1 e_2 - e_2 r_2 e_1 - e_3 r_3 e_2 - e_1 e_2 r_3)}{e_1 r_1 (e_1 - e_2) (e_1 - e_3)}$ | $r_1, r_2, \text{ and } r_3 \text{ correspond to the three roots of } r^3 + r^2(3\lambda + 6\mu) + r(\lambda^2 + 3\mu\lambda + 11\mu^2) + (\lambda^3 + 3\mu\lambda^2 + 6\mu^2\lambda + 6\mu^3)$ | $\frac{6\mu^2 + 6\mu^2\lambda + 3\mu\lambda^2}{6\mu^2 + 6\mu^2\lambda + 3\mu\lambda^2 + \lambda^3}$ | 0.9998 |
| 3 | Parallel | Single | $A(t) = \frac{\mu^2 + 3\mu^2\lambda + 6\mu\lambda^2}{\mu^2 + 3\mu^2\lambda + 6\mu\lambda^2 + 6\lambda^3} - \frac{6\lambda^3(e_1 e^{r_1 t} - e_2 e^{r_2 t} - e_3 e^{r_3 t} - e_1 r_1 e_2 - e_2 r_2 e_1 - e_3 r_3 e_2 - e_1 e_2 r_3)}{e_1 r_1 (e_1 - e_2) (e_1 - e_3)}$ | $r_1, r_2, \text{ and } r_3 \text{ correspond to the three roots of } r^3 + r^2(6\lambda + 6\mu) + r(11\lambda^2 + 9\mu\lambda + 3\mu^2) + (6\lambda^3 + 6\mu\lambda^2 + 3\mu^2\lambda + \mu^3)$ | $\frac{\mu^2 + 3\mu^2\lambda + 6\mu\lambda^2}{\mu^2 + 3\mu^2\lambda + 6\mu\lambda^2 + 6\lambda^3}$ | 0.9993 |
| | | Multiple | $A(t) = \frac{\mu^2 + 3\mu^2\lambda + 3\mu\lambda^2}{6\lambda^3(e_1 r_1 e_2 - e_2 r_2 e_1 - e_3 r_3 e_2 - e_1 r_1 e_2 - e_2 r_2 e_1 - e_3 r_3 e_2 - e_1 e_2 r_3)}$ | $r_1, r_2, \text{ and } r_3 \text{ correspond to the three roots of } r^3 + r^2(6\lambda + 6\mu) + r(11\lambda^2 + 9\mu\lambda + 6\mu^2) + \mu^3$ | $\frac{\mu^2 + 3\mu^2\lambda + 3\mu\lambda^2}{\mu^2 + 3\mu^2\lambda + 3\mu\lambda^2 + \lambda^3}$ | 0.9999 |

NOTES: 1. $A(t)$ is the probability of a system being available at time t . $A(t)$ is a function of μ and λ the repair and failure rates. For all functions, the probability of a system being available at time zero is unity. The units of μ and λ must be the same as for t .
 2. Instantaneous availability. The probability that the system will be available at any instant at time t .
 3. Mission availability. Expected availability for a given mission period. This value can be derived from the general model by computing the average value of $A(t)$ for the mission period. Mathematically, this is

$$A_m = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} A(t) dt$$

4. Usually t_1 is considered as zero.
 5. Steady state availability. The portion of up time expected for continuous operation. Mathematically, this is expressed

$$A_{ss} = \lim_{t \rightarrow \infty} A(t)$$

Table 4.1 "Reliability Engineering for Electronic Systems", Richard Myers, Kam Wong, and Harold M. Gordy John Wiley & Sons.

CAPITULO 5

RESULTADOS DE UN CASO DE APLICACION

El procedimiento de cálculo consiste en encontrar primero las tasas de falla y reparación de cada componente, posteriormente el cálculo de la confiabilidad y disponibilidad de los subsistemas, y por último el del sistema completo.

5.1 CALCULO DE LAS TASAS DE FALLA Y REPARACION.

En la tabla 5.1 se muestran los datos observados en 4 Unidades generadoras durante 1 año de servicio, donde se consideraron los equipos más importantes.

El factor de servicio por Unidad fue de 78 % entendiéndose por factor de servicio la relación que existe entre el tiempo en que la Unidad permaneció en operación y el período de tiempo considerado expresado en por ciento; así que el tiempo de operación total fue de 284.7 en el año. En las columnas de la C a la F de la tabla 5.1 se muestran los valores calculados o estimados de los parámetros necesarios.

5.2 CONFIABILIDAD Y DISPONIBILIDAD DE COMPONENTES.

Ahora estamos en posibilidad de obtener la confiabilidad de cada componente y su disponibilidad en estado estable. En la tabla 5.2 se resumen los resultados de cada componentes, las expresiones usadas son:

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

para la confiabilidad

$$A_s = \frac{\mu}{\lambda + \mu} = \frac{1}{1 + \frac{\lambda}{\mu}}$$

para la disponibilidad
en estado estable.

5.3 CONFIABILIDAD Y DISPONIBILIDAD DE LOS LOS SUBSISTEMAS, ARREGLO DE LAS BOMBAS.

El arreglo de las bombas está representado por la figura 2.5; una bomba opera y la otra se encuentra inactiva, tanto la bomba A como la B están sujetas a mantenimiento y tienen las mismas características.

Aplicando la ecuación 3.48 obtenemos la confiabilidad del subsistema:

$$R(t) = \frac{s_1 e^{s_2 t} - e^{s_1 t}}{s_1 - s_2}$$

Obsérve la tabla 5.3, en donde se resumen los valores de la confiabilidad en función del tiempo y la disponibilidad en estado estable, obtenida con la ecuación siguiente, ver tabla 4.1 para el caso con reparaciones múltiples:

$$A_s = \frac{2\mu^2 + 2\mu\lambda}{2\mu^2 + 2\mu\lambda + \lambda^2}$$

5.4 ANÁLISIS DEL SISTEMA COMPLETO.

La confiabilidad total del sistema se encuentra con la ecuación (2.11):

$$R_{SS} = \prod_{i=1}^n R_i$$

En la tabla 5.4 se muestran los resultados del cálculo de la confiabilidad del sistema, estos resultados son graficados en la figura 5.1 en donde puede compararse la contribución de los componentes en la confiabilidad total del sistema.

La disponibilidad del sistema está evaluada por la ecuación (4.36):

$$A_s = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i}{\mu_i}}$$

Que da el valor de la disponibilidad en estado estable. Los resultados se muestran en la tabla 5.5.

| COMPONENTE | SALIDAS FORZADAS | | μ | MTBF | MTTR | λ |
|---|------------------|--------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | TOTAL | UNIDAD | FALLA DIA | DIA FALLA | DIA FALLA | FALLA DIA |
| 1. CONDENSADOR | 6 | 2 | 0.007 | 142.35 | 1.91 | 0.524 |
| 2. A/B BOMBAS DE CONDENSADO | | (1) | 0.000027 | 36500 | 0.71 | 1.4 |
| 3. CALENTADORES DE BAJA PRESION | | (1) | 0.000219 | 4562 | 1.23 | 0.813 |
| 4. A/B BOMBAS DE AGUA DE ALIMENTACION | | (1) | 0.000082 | 12167 | 8.92 | 0.1121 |
| 5. CALENTADORES DE BAJA PRESION | | (1) | 0.000219 | 4562 | 1.23 | 0.813 |
| 6. PRECALENTADORES DE AIRE REGENERATIVOS. | | (1) | 0.000082 | 12167 | 1.84 | 0.543 |
| 7. CALDERA | 113 | 28.25 | 0.099227 | 10.07787 | 1.55 | 0.645 |
| 7a. ECONOMIZADOR. | 19 | 4.75 | 0.016684 | 59.93684 | 1.33 | 0.752 |
| 7b. TUBOS DE AGUA | 29 | 7.25 | 0.025465 | 39.26896 | 1.95 | 0.513 |
| 7c. TUBOS PENDIENTES | 22 | 5.5 | 0.019318 | 51.76363 | 2.35 | 0.425 |
| 7d. RECALENTADOR | 12 | 3 | 0.010537 | 94.9 | 2.82 | 0.355 |
| 7e. SOBRECALENTADOR | 25 | 6.25 | 0.021952 | 45.552 | 1.83 | 0.546 |
| 7f. VALVULAS Y OTROS | 6 | 1.5 | 0.005268 | 189.8 | 1.58 | 0.633 |
| 8. TURBINA DE VAPORES | 5 | 1.25 | 0.004390 | 227.76 | 4.44 | 0.225 |
| 9. GENERADOR ELECTRICO | 5 | 1.25 | 0.004390 | 227.76 | 5.5 | 0.182 |
| 10. OTROS | 1 | 0.25 | 0.00088 | 1138.8 | 0.80208 | 1.24675 |
| COLUMNA: | A | B | C | D | E | F |
| CALCULO: | | A/4 | B/284.7 | 1/C | (2) | (2) |

TABLA 5.1 Datos de equipo de 4 Unidades Termoeléctricas, observados durante 1 año de operación.

NOTAS:

- (1) No se cuenta con información específica de estos equipos, la información faltante se tomó de los reportes del EEI [13].
- (2) Para todos los equipos el tiempo medio de reparación y la tasa de falla se tomó también de los reportes del EEI [13].

| COMPONENTE | R(1) | R(7) | R(30) | R(180) | R(365) | As |
|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1. CONDENSADOR | 99.30244 | 95.21811 | 81.05842 | 28.36540 | 7.769223 | 98.68173 |
| 2. A/B BOMBAS DE CONDENS. | 99.99726 | 99.98082 | 99.91783 | 99.50801 | 99.00488 | 99.99804 |
| 3. CALENTADORES DE BAJA PRESION | 99.97810 | 99.84661 | 99.34515 | 96.13468 | 92.31763 | 99.97306 |
| 4. A/B BOMBAS DE AGUA DE ALIMENTACION | 99.99171 | 99.94199 | 99.75160 | 98.51887 | 97.01947 | 99.92610 |
| 5. CALENTADORES DE BAJA PRESION | 99.97808 | 99.84667 | 99.34455 | 96.13122 | 92.31089 | 99.97304 |
| 6. PRECALENTADORES DE AIRE REGENERATIVOS. | 99.99178 | 99.94248 | 99.75373 | 98.53146 | 97.04461 | 99.98486 |
| 7. CALDERA | 90.55368 | 49.92787 | 5.095472 | 0.000001 | 1.7E-14 | 88.66707 |
| 7a. ECONOMIZADOR. | 98.34541 | 88.97723 | 60.62111 | 4.962992 | 0.226598 | 97.82950 |
| 7b. TUBOS DE AGUA | 97.48561 | 83.67266 | 46.58171 | 1.021528 | 0.009189 | 95.27074 |
| 7c. TUBOS PENDIENTES | 98.08668 | 87.35149 | 56.01462 | 3.088932 | 0.086629 | 95.65208 |
| 7d. RECALENTADOR | 98.95179 | 92.88928 | 72.89703 | 15.00579 | 2.136173 | 97.11728 |
| 7e. SOBRECALENTADOR | 97.82862 | 85.75545 | 51.75816 | 1.922530 | 0.033118 | 96.13472 |
| 7f. VALVULAS Y OTROS | 99.47451 | 96.37908 | 85.37975 | 38.73732 | 14.61565 | 99.17453 |
| 8. TURBINA DE VAPOR | 99.56190 | 96.97333 | 87.65885 | 45.37061 | 20.13794 | 98.08597 |
| 9. GENERADOR ELECTRICO | 99.56190 | 96.97333 | 87.65885 | 45.37061 | 20.13794 | 97.64441 |
| 10. OTROS | 99.91203 | 99.38589 | 97.39454 | 85.35083 | 72.52781 | 99.92946 |

TABLA 5.2 Confiabilidad y disponibilidad de equipos en equipos de Plantas Termoeléctricas.

NOTAS:

R(t) = Confiabilidad del componente en la edad t, en días.

As = Disponibilidad en estado estable de cada componente.

| COMPONENTE | BOMBA DE CONDENSADO | BOMBA DE AGUA DE ALIMENTACION |
|-----------------|------------------------|----------------------------------|
| TASA DE FALLA | 0.000027 | 0.000082 |
| TASA REPARACION | 1.4 | 0.1121 |
| RAIZ 1 S1 | -5.0E-10 | -6.12E-8 |
| RAIZ 2 S2 | -1.40005 | -0.11226 |
| R(1) | 99.99999 | 99.99998 |
| R(7) | 99.99999 | 99.99998 |
| R(30) | 99.99999 | 99.99986 |
| R(180) | 99.99999 | 99.99895 |
| R(365) | 99.99998 | 99.99782 |
| As | 99.99999 | 99.99997 |

TABLA 5.3 Confiabilidad de subsistemas.

| COMPONENTE | R(1) | R(7) | R(30) | R(180) | R(365) |
|---|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1. CONDENSADOR | 0.993024 | 0.952181 | 0.810584 | 0.283654 | 0.077692 |
| 2. SUBSISTEMA BOMBAS DE CONDENSADO | 0.999999 | 0.999999 | 0.999999 | 0.999999 | 0.999999 |
| 3. CALENTADORES DE BAJA PRESION | 0.999781 | 0.998468 | 0.993451 | 0.961346 | 0.923176 |
| 4. SUBSISTEMA BOMBAS AGUA ALIMENTACION | 0.999999 | 0.999999 | 0.999998 | 0.999989 | 0.999978 |
| 5. CALENTADORES DE BAJA PRESION | 0.999780 | 0.998466 | 0.993445 | 0.961312 | 0.923108 |
| 6. PRECALENTADORES DE AIRE REGENERATIVOS. | 0.999917 | 0.999424 | 0.997537 | 0.985314 | 0.970446 |
| 7. CALDERA. | 0.905536 | 0.499278 | 0.050954 | 1.75E-8 | 1.9E-16 |
| 8. TURBINA DE VAPOR | 0.995619 | 0.969733 | 0.876588 | 0.453706 | 0.201379 |
| 9. GENERADOR ELECTRICO | 0.995619 | 0.969733 | 0.876588 | 0.453706 | 0.201379 |
| 10. OTROS | 0.999120 | 0.993858 | 0.973945 | 0.853508 | 0.725278 |
| TOTAL | 0.890111 | 0.442700 | 0.030431 | 8.0E-10 | 3.5E-19 |

TABLA 5.4 Confiabilidad total del sistema, arreglo en serie.

| COMPONENTE | λ/μ |
|--|---------------|
| 1. CONDENSADOR | 0.013358 |
| 2. SUBSISTEMA BOMBAS DE CONDENSADO | 3.0E-7 |
| 3. CALENTADORES DE BAJA PRESION | 0.000269 |
| 4. SUBSISTEMA BOMBAS AGUA ALIMENTACION | 1.0E-7 |
| 5. CALENTADORES DE BAJA PRESION | 0.000269 |
| 6. PRECALENTADORES DE AIRE REGENERATIVOS. | 0.000151 |
| 7. GENERADOR DE VAPOR | 0.153840 |
| 8. TURBINA DE VAPOR | 0.019513 |
| 9. GENERADOR DE VAPOR | 0.024124 |
| 10. OTROS | 0.000705 |
| DISPONIBILIDAD TOTAL: | 0.824923 |

TABLA 5.5 Disponibilidad total del sistema, arreglo en serie.

CONFIABILIDAD DE EQUIPOS EN UNA PLANTA TERMOELECTRICA.

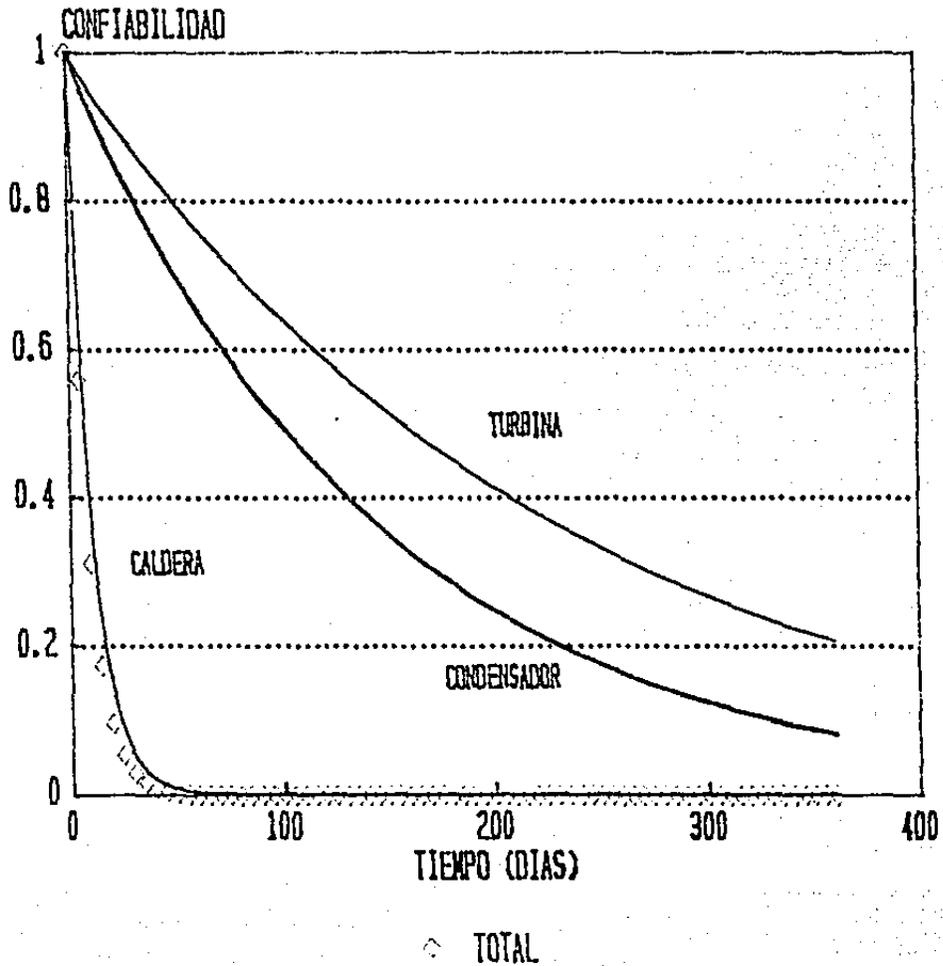


FIGURA 5.1

CONCLUSIONES

En los cálculos anteriores se le asignó al tiempo valores en días, para dar una idea objetiva de los resultados, con esta valoración se genera un concepto de confiabilidad diaria. Se hace notar que valores del orden de 95 % o del 99 % pueden parecer buenos, pero en estas condiciones no es así; las metas deben ser el logro de una confiabilidad del orden del 99.5 % a 99.7 % que corresponden aproximadamente a 200 o 300 días como tiempo promedio entre falla, ver figura 5.1.

Como es de esperarse el generador de vapor tiene la confiabilidad menor de todos los componentes; de hecho si este componente tuviera la confiabilidad del condensador (99.30 %) el sistema lograría un 97.6 %. Esta es un ejemplo de las ventajas de evaluar la confiabilidad del sistema en base a la participación que tiene cada uno de sus componentes, ya que permite identificar los equipos críticos que pueden ser mejorados para aumentar la productividad del sistema.

Otra de las ventajas es que se cuenta con un método para comparar la operación de las Unidades de generación de energía eléctrica, aún cuando sean de otro tipo: nucleares, convencionales o hidroeléctricas.

Resumiendo, se puede establecer una metodología de acuerdo a los pasos desarrollados anteriormente, para evaluar la confiabilidad y disponibilidad de equipos en

Plantas Industriales con la finalidad de aumentar su productividad. Las etapas son:

1. Mediante el diagrama de flujo de proceso se crea un diagrama de bloques de confiabilidad del sistema.
2. Estimación de las tasas de falla y de reparación para cada tipo de componente.
3. Cálculo de la confiabilidad y disponibilidad en el orden siguiente:
 - 3.1 Componentes y subsistemas.
 - 3.2 Sistema total.
4. Clasificación de los equipos o subsistemas más críticos en términos de su disponibilidad y confiabilidad.
5. Se establecen metas de confiabilidad y disponibilidad y su implicación en el aumento del tiempo medio entre fallas y/o disminución del tiempo medio de reparación.
6. Estimación de los costos de las salidas forzadas y de los ahorros anuales considerando diferentes niveles de confiabilidad, hacer una comparación gráfica de los costos con los ahorros anuales al evitar las salidas..
7. Se proponen métodos alternativos para mejorar la confiabilidad y disponibilidad de los equipos algunos de ellos mediante:
 - Diagnósticos para identificar puntos débiles en el diseño, dando mayor tolerancia a los criterios de seguridad.

- Actualización de procedimientos de operación y mantenimiento.
- Mejoramiento en la gestión de refacciones: usar partes sobrediseñadas y estandarizadas; establecer pruebas de confiabilidad para la aceptación de refacciones.
- Desarrollo de estudios sobre políticas de reemplazo preventivo óptimo.
- Implantación de frecuencias de inspección y rutinas de mantenimiento preventivo minimizando costos.
- Estudio sobre la configuraciones de diseño, serie/paralelo óptimas considerando criterios de confiabilidad y costos.

8. Estimación de los costos de inversión en el mejoramiento de la confiabilidad, los costos que pueden incluirse son los originados por:

- Planeación.
- Investigación y desarrollo.
- Ingeniería.
- Materiales e instalación.
- Otros costos asociados.

9. Evaluar las alternativas mediante su relación costo/beneficio, o alguna otra técnica que permita decidir sobre la mejor opción.

REFERENCIAS

1. Ang A.H.S., Tang W.H. "Probability Concepts in Engineering Planning and Design. Vol.1 1979.
2. ANSI/IEEE Std.352-1987 "IEEE Guide for General Principles of Reliability Analysis of Nuclear Power Generating Station Safety Systems (1987).
3. Barlow R.E.,Proschan F. "Availability Theory for Multicomponent Systems" Operations Research Center. College of Engineering, University of California Berkeley ADA 744665 (1972).
4. Comisión Federal de Electricidad (C.F.E.),Subdirección de Construcción, Gerencia de Estudios."Precios internos y externos de referencia de los principales energéticos período 1970-1987, Nov. 1987.
5. C.F.E. "Estadísticas 1986 Sector Eléctrico Nacional.
6. C.F.E. Informe de Operación 1986 México.
7. C.F.E. Central Escuela Celaya "Aspectos Económicos y Legales en la Generación de Energía Eléctrica. (1986).
8. Chang N.E." Applications of Availability Analysis Techniques to Improvement Power Plant Productivity IEEE A-80 112-3.(1980)
9. EPRI NP-1064 "Analysis of Utility Industry Data Systems (1979).
10. EPRI FP-422-SR "Availability Steam Power Plants".Special Report (1977).
11. EPRI EL-1980 Component Outage Data Analysis Methods" Vol.1 Overview and Special Applications. (1981).
12. EPRI 771-6 "Workshop Proceedings: Power Plant

Availability Engineering and Productivity Improvement"

Vol. 1 y 2 (1979).

13. EEI N° 77-64A "Equipments Availability Component Cause Code Summary Report for the Ten-Year Period, 1967-1976", (1978).
14. Gano D.L. "Root cause and how to find it", Nuclear News/August 1987.
15. Hullinger D.P. "Power Plant Equipment Reliability" ASME 78-JPGC-Pwr -8 (1978).
16. IIE Secretariado Técnico Unidad de Planeación "Disponibilidad en Centrales Termoeléctricas" 3^a versión marzo de 1986.
17. IEEE Committee Report "Report on Reliability Survey of Industrial Plants: Part I: Reliability of Electric Equipment". IEEE Trans. Ind. Appl. Vol. IA-10 pp 213-235 March/April (1974).
18. Jardine A.K.S. "Maintenance Replacement and Reliability". John Wiley & Sons (1973).
19. Kapur K.C. Lamberson L.R. "Reliability in Engineering Approach". Mc-Graw Hill (1968).
20. Kececioglu D. "Seminarios Sobre Aplicaciones de la Ingeniería de Confiabilidad y de la Ingeniería de Mantenibilidad y Disponibilidad .IMECCA, A.C. Mexico, D.F.(1989).
21. Lewis E:E: "Introducción to Reliability Engineering" John Wiley & Sons (1987).
22. Mann R.N., Schafer R.E., Singpurwalla N.D. "Methods for Statistical Analysis of Reliability and Life Data.(1974)

23. Shooman M.L. "Probabilistic Reliability an Engineering Approach". Mc-Graw Hill (1968).

APENDICES

APENDICE A

FUNDAMENTOS DE LA TEORIA DE LA CONFIABILIDAD

Los análisis de confiabilidad para cualquier sistema están fundamentados en la Teoría de Probabilidad. En este apéndice se definen los conceptos básicos más importantes; se destaca la importancia de la tasa de falla, las relaciones entre las funciones de confiabilidad y por último las Distribuciones Exponencial y Weibull para modelar la confiabilidad del sistema en cualquier edad.

A.1 CONCEPTOS BASICOS.

Podemos considerar la Confiabilidad en función del tiempo, de tal forma que puede expresarse en términos de una variable aleatoria T , que representa el tiempo hasta la falla (en general, se utilizará mayúsculas para la variable aleatoria y la minúscula para los valores que puede tomar); entonces $T \geq 0$ y es posible asociarle conceptos probabilísticos:

La función densidad de probabilidad de falla $f(t)$,
$$f(t) \cdot \Delta t = P[t \leq T \leq t + \Delta t] \quad (A.1)$$

Significa que es la probabilidad de que la falla ocurra entre el tiempo t y $t + \Delta t$, ya que Δt es infinitesimal.

La función de distribución acumulada de falla $Q(t)$:

$$Q(t) = P[T \leq t] \quad (A.2)$$

Es la probabilidad de que la falla ocurra en el tiempo menor ó igual a t , también expresa el porcentaje de elementos de una muestra ó conjunto que fallan en t ó

antes, recuérdese que $Q(t)$ es una función continua a la derecha, monótona y no decreciente.

$$Q(t_1) \leq Q(t_2) \text{ para } t_1 \leq t_2$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} Q(t) = 1 \quad \lim_{t \rightarrow 0} Q(t) = 0$$

Ahora definamos la Confiabilidad como la probabilidad de éxito:

$$R(t) = P[T > t] \quad (\text{A.3})$$

Es la probabilidad de que el sistema esté aún funcionando, o bien, representa el porcentaje de elementos que sobreviven hasta t . Partiendo de las funciones de distribución acumuladas se cumple que:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} R(t) = 0 \quad \lim_{t \rightarrow 0} R(t) = 1$$

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

También puede ser expresada la función densidad de probabilidad (f.d.p.) de falla en términos de la confiabilidad:

$$f(t) = \frac{d}{dt} Q(t) = \frac{d}{dt} [1 - R(t)] = - \frac{d}{dt} R(t) \quad (\text{A.4})$$

Las funciones anteriores pueden representarse gráficamente en la figura (A.1).

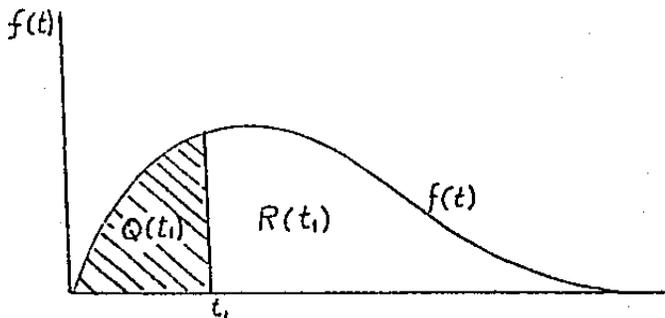


FIGURA A.1 Representación de las funciones relacionadas con confiabilidad.

De manera resumida la Confiabilidad es la probabilidad a un nivel de confianza dado, de que el equipo efectúe las funciones requeridas en forma satisfactoria, en una edad y durante un periodo de tiempo específico ; siempre que sea operado bajo los niveles de esfuerzo y ambiente definidos en su diseño.

Aplicando el enfoque frecuentista de la probabilidad, está definida como la razón entre el número de misiones exitosas $N_g(t)$ con una duración t cada una y el número total de misiones que se probaron $N_T(t)$, esto es, Confiabilidad estimada:

$$\hat{R}(t) = \frac{N_g(t)}{N_T(t)} = 1 - \frac{N_F(t)}{N_T(t)} \quad (A.5)$$

$$\hat{R}(t) = 1 - \hat{Q}(t) = 1 - \text{Inconfiabilidad estimada.}$$

Donde: $N_F(t)$ = Número de misiones de duración t que fallaron
 $\hat{R}(t)$ Es solamente un estimador porque está limitado al número finito de misiones totales probadas. El valor estimado se acerca más al valor verdadero conforme el número total de misiones probadas se acerca al infinito, es decir:

$$\hat{R}(t) = R(t) = \text{Confiabilidad verdadera, si } N_T \longrightarrow \infty$$

EL CONCEPTO DE LA TASA DE FALLA.

Una de las funciones más importantes en Confiabilidad es la función de tasa de falla, $\lambda(t)$, que relaciona la edad de un componente (en este caso hablaremos de componente con la idea de denotar: un equipo, unidad, producto ó un

sistema) y la frecuencia de falla, ó el número de fallas que ocurren por unidad de tiempo en esa edad. La función de la tasa de falla da origen a la curva llamada "tina de baño", ver figura A.2 y permite la determinación de la función de confiabilidad y la función densidad de probabilidad de falla.

ESTIMACION DE LA TASA DE FALLA.

Una forma de estimar la tasa de falla promedio, $\hat{\lambda}(t)$, en cualquier edad t para una unidad que tiene registrados sus datos de comportamiento ó para una muestra homogénea de componentes idénticos que están sometidos a una prueba de confiabilidad, es mediante la expresión siguiente:

$$\hat{\lambda}(t) = \frac{N_F(\Delta t)}{N_S(t) \cdot \Delta t} \quad (A.6)$$

Esto es válido siempre que se opere bajo las mismas condiciones, donde:

$N_F(\Delta t)$ = Número de unidades que fallan en el incremento de edad Δt .

$N_S(t) \cdot \Delta t$ = Número de unidades que sobreviven hasta la edad t , o el número de unidades en observación antes de iniciar el periodo.

Δt = Incremento de edad después de t , durante el que $N_F(\Delta t)$ unidades fallan.

t = Tiempo en que inicia el periodo ó edad

Quando $N_S \rightarrow \infty$ y $\Delta t \rightarrow 0$ entonces $\hat{\lambda}$ tiende al valor real de la tasa de falla $\lambda(t)$ en la edad t .

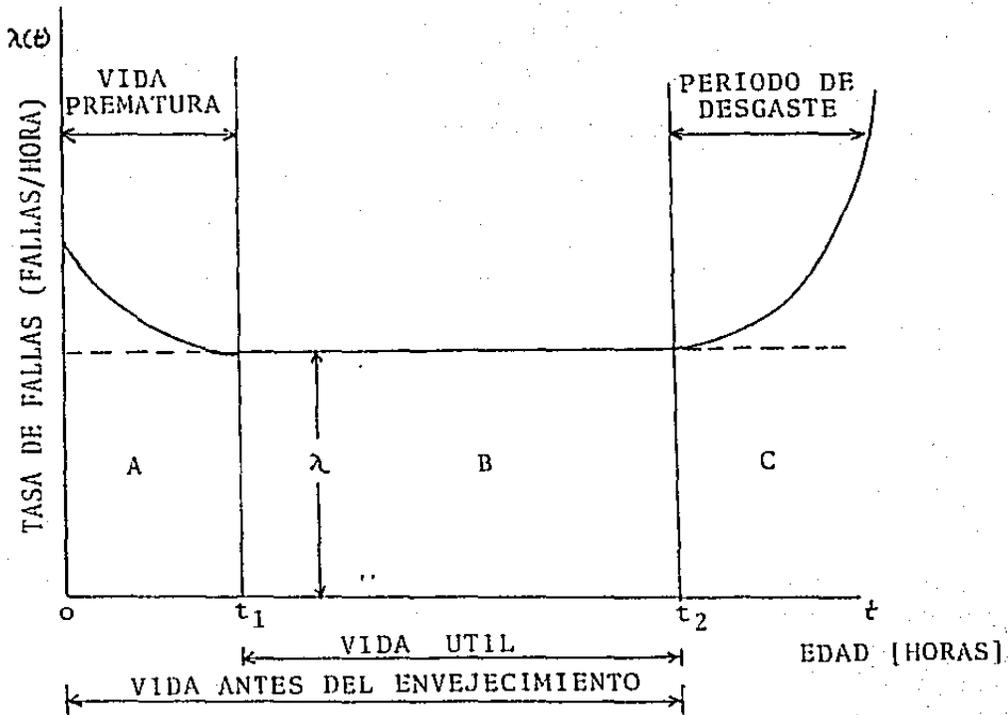


FIGURA A.2 CURVA TIPICA DE LA TINA DE BAÑO

En la ecuación (A.6), $\frac{N_F(\Delta t)}{N_S(t)}$ es la probabilidad de falla en el periodo Δt en base al número de unidades disponibles al principio de dicho periodo y dividiéndola por Δt nos da la probabilidad de que una unidad falle en el intervalo de tiempo Δt , dado que no ha fallado hasta el periodo t .

Obsérvese que si Δt aumenta entonces $N_F(\Delta t)$ también aumenta porque la probabilidad de falla será mayor para un periodo de tiempo mayor, es decir que depende de la longitud del intervalo.

LA TASA DE FALLA INSTANTANEA.

Si en la ecuación (A.6) aproximamos Δt a cero, se genera una tasa de falla instantánea que depende exclusivamente de t , esto es:

$$\lambda(t) = -\frac{1}{N_S(t)} \cdot \frac{d}{dt} [N_F(\Delta t)] \quad (A.7)$$

Donde: $N_S(t)$ = Número de unidades que sobreviven hasta hasta la edad t .

Rearreglando la ecuación (A.7), obtenemos:

$$\lambda(t) = \frac{1}{N_S(t)} \cdot \frac{N_T}{N_T} \cdot \frac{d}{dt} [N_F(t)] \quad (A.8)$$

$$\lambda(t) = \frac{1}{N_S(t)/N_T} \left[\frac{1}{N_T} \cdot \frac{d}{dt} [N_F(t)] \right] \quad (A.9)$$

$$= \frac{1}{R(t)} \cdot f(t)$$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (A.10)$$

Así que, $\lambda(t)$ es la tasa de cambio de la probabilidad condicional de falla, dado que el sistema ha sobrevivido hasta el tiempo t .

A esta función se le ha nombrado de diferentes maneras: tasa o función del peligro (hazard rate), función de fuerza de mortalidad (force of mortality function), intensidad de falla (failure intensity). En lo subsecuente para abreviar nos referiremos a esta expresión (A.10) únicamente como tasa de falla.

Otro procedimiento para obtener la función de la tasa de falla es utilizando la definición siguiente:

La tasa de falla es el número de fallas que ocurren por unidad de tiempo en el incremento de tiempo Δt después de cierta edad t y por unidad de elementos de la población que sobreviven hasta la edad t a medida que $\Delta t \rightarrow 0$.

El número de fallas que ocurren en Δt después de t , está dado por el número de sobrevivientes en la edad t menos el número de sobrevivientes en la edad $t + \Delta t$, ó

$$N_F(\Delta t) = N \cdot R(t) - N \cdot R(t + \Delta t) \quad (\text{A.11})$$

y la población de sobrevivientes en la edad t está dado por:

$$N_S(t) = N \cdot R(t) \quad (\text{A.12})$$

Utilizando las dos expresiones anteriores y aplicando la definición se obtiene:

$$\lambda(t) = \frac{\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{N_F(\Delta t)}{\Delta t}}{N \cdot R(t)}$$

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{N \cdot R(t) - N \cdot R(t+\Delta t)}{\Delta t} \cdot \frac{1}{N \cdot R(t)} \quad (\text{A.13})$$

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} N \left[- \frac{R(t+\Delta t) - R(t)}{\Delta t} \right] \cdot \frac{1}{N \cdot R(t)} \quad (\text{A.14})$$

$$\lambda(t) = - \frac{d}{dt} [R(t)] \cdot \frac{1}{R(t)} = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (\text{A.15})$$

como se obtuvo anteriormente.

Si el tiempo hasta la falla de unidades idénticas tienen una distribución exponencial, entonces podemos decir:

$$\lambda(t) = \frac{\lambda e^{-\lambda t}}{e^{-\lambda t}} = \lambda \quad (\text{A.16})$$

La expresión anterior indica que la tasa de falla instantánea de las unidades es independiente de la edad y tiene un valor constante igual a λ que es la tasa de falla útil.

Si los tiempos hasta la falla de unidades idénticas siguen la distribución Weibull, entonces la tasa de falla de estas unidades está definida por:

$$\lambda(t) = \frac{\frac{\beta}{\eta} \left[\frac{t - \gamma}{\eta} \right]^{\beta-1} \cdot e^{-\left[\frac{t - \gamma}{\eta} \right]^\beta}}{e^{-\left[\frac{t - \gamma}{\eta} \right]^\beta}} \quad (\text{A.17})$$

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left[\frac{t - \gamma}{\eta} \right]^{\beta-1} \quad (\text{A.18})$$

Observéese que la tasa de falla no es constante y varía respecto a t .

A.2 IMPORTANCIA DE LA TASA DE FALLA.

Para ilustrar la importancia de la función de la tasa de falla en la confiabilidad, consideremos la figura A.2, que representa el modelo conocido como "Tina de Baño", donde se observa para la mayoría de los sistemas existentes, la variación en el tiempo de la tasa de falla, distinguiéndose también tres zonas típicas de falla que son:

A) PREMATURAS O DE MORTALIDAD INFANTIL, ubicada en $0 \leq t \leq t_1$, en la que $\lambda(t_i) > \lambda(t_j)$ para $t_i < t_j$. La tasa de falla disminuye con la edad. Las causas de falla son:

- Técnicas de manufactura deficientes, incluyendo: prácticas de ensamble, procesos y manejo de materiales.
- Mano de obra y control de calidad deficientes.
- Insuficientes pruebas de "purgado" de lotes.
- Uso de materiales y componentes con calidades inferiores a las especificadas.
- Deterioro durante el embarque, transportación y almacenamiento.
- Fallas por instalación y arranque inadecuados.

B) CASUALES, definida en $t_1 \leq t \leq t_2$, en la que es prácticamente constante si se observa durante un período de tiempo suficientemente grande. Las fallas ocurren inesperadamente en el tiempo, aleatoriamente a intervalos irregulares, pero globalmente $\lambda(t)$

tiende a ser constante.

Las causas de falla básicas son:

- Insuficientes factores de seguridad o sobrediseño.
- Ocurrencia de esfuerzos y cargas superiores a los esperados.
- Errores humanos en el uso, abusos ó causas inexplicables.
- Aquellas fallas que no pueden eliminarse con mantenimientos preventivos.

C) POR DESGASTE, USO, O ENVEJECIMIENTO, estas ocurren durante la última etapa de operación, su característica es tener una tasa de falla creciente con la edad. Las causas son:

- Envejecimiento.
- Desgaste.
- Degradación durante los esfuerzos.
- Fatiga, corrosión, agrietamiento.
- Inadecuada atención en su mantenimiento, servicio, reparación o reemplazo..
- Deterioro mecánico, eléctrico, hidráulico, neumático ó químico.

A.3 RELACIONES ENTRE LAS FUNCIONES DE CONFIABILIDAD.

Una manera generalmente más usada de expresar la Confiabilidad y la función densidad de probabilidad de falla es relacionándolas con la tasa de falla.

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = - \frac{1}{R(t)} \cdot \frac{d}{dt}[R(t)] \quad (\text{A.19})$$

Multiplicando por dt, obtenemos:

$$\lambda(t)dt = - \frac{dR(t)}{R(t)} \quad (\text{A.20})$$

Integrando entre 0 y t:

$$\int_0^t \lambda(t)dt = -\ln [R(t)] \quad (\text{A.21})$$

que es la función acumulada de la tasa de falla.

Puesto que $R(0) = 1$. Entonces:

$$R(t) = e^{\left[- \int_0^t \lambda(t)dt\right]} \quad (\text{A.22})$$

Para la f.d.p. de falla similarmente se obtiene:

$$f(t) = \lambda(t) \cdot e^{\left[- \int_0^t \lambda(t)dt\right]} \quad (\text{A.23})$$

$$f(t) = \lambda(t) \cdot R(t) \quad (\text{A.24})$$

Uno de los parámetros estadísticos más usados en confiabilidad es el tiempo medio hasta la falla, MTTF, (mean time to failure) que es el valor medio ó valor esperado $E[T]$ del tiempo t de falla, entonces:

$$E[t] = \text{MTTF} = \int_0^{\infty} t f(t) dt \quad (\text{A.25})$$

$$\text{MTTF} = - \int_0^{\infty} t \cdot \frac{dR}{dt} dt = -tR(t) \Big|_0^{\infty} + \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (\text{A.26})$$

El término $tR(t)$ desaparece en $t = 0$.

También observamos que $R(t)$ decae exponencialmente o más rápidamente, ya que la tasa $\lambda(t)$ debe ser mayor que

cero, así que $t \cdot R(t) \rightarrow 0$ si $t \rightarrow \infty$. Entonces la expresión para obtener el tiempo esperado de funcionamiento de un sistema es:

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (A.27)$$

Puesto que : $\lambda(0) = \frac{f(0)}{R(0)} = \frac{f(0)}{1} = f(0)$, obsérvese que $\lambda(0) = f(0)$ y siempre se cumple que: $\lambda(t) \geq f(t)$.

A.4 DISTRIBUCIONES EXPONENCIAL Y WEIBULL.

En la literatura existen desarrollos matemáticos para diferentes f.d.p., dos de las más usuales son la distribución Weibull y la Exponencial; la primera permite debido a la flexibilidad en sus parámetros modelar la vida prematura y de desgaste de un sistema, la segunda es un caso particular de la primera que se aplica a la vida útil.

A continuación se resumen para estas dos distribuciones las funciones de mayor aplicación en el análisis de confiabilidad, estas son:

Distribución del tiempo medio hasta la falla.

Función de confiabilidad.

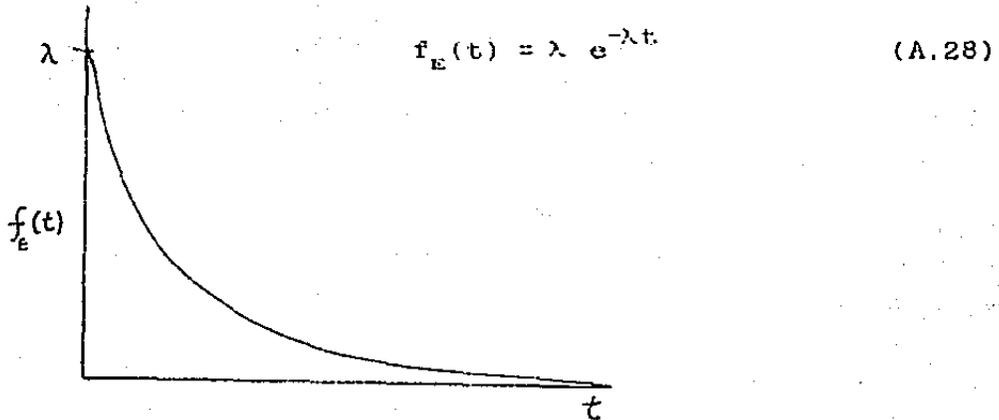
Función de confiabilidad condicional.

Función de la tasa de falla.

Vida media.

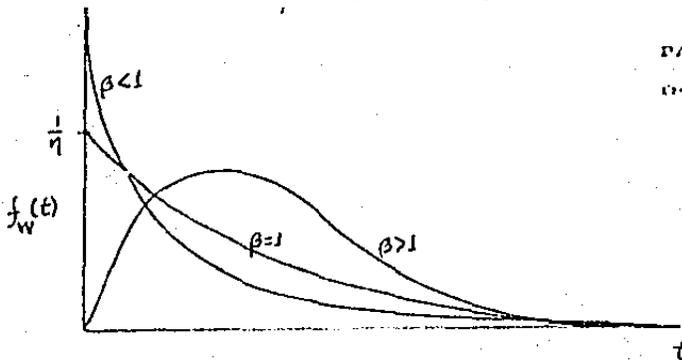
DISTRIBUCION DEL TIEMPO MEDIO HASTA LA FALLA.

EXPONENCIAL, es aplicable en la etapa de la vida util del sistema. es un caso particular de la distribución Weibull con parámetros: $\gamma = 0$ y $\beta = 1$



WEIBULL, es usada para cualquier tipo de falla (temprana, vida util o envejecimiento), dependiendo de sus parámetros.

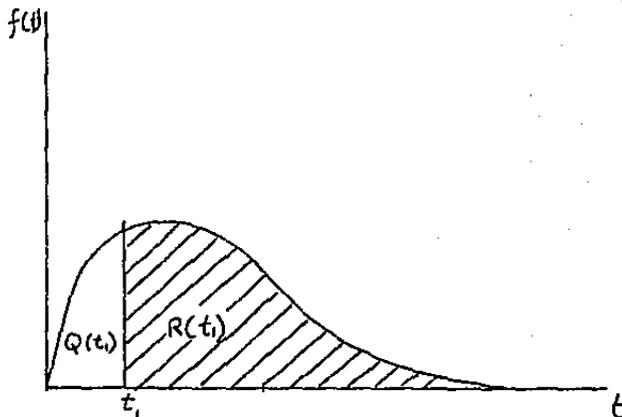
$$f_W(t) = \frac{\beta}{\eta} \left[\frac{t - \gamma}{\eta} \right]^{\beta-1} \cdot e^{-\left[\frac{t - \gamma}{\eta} \right]^\beta} \quad (A.29)$$



| PARAMETRO: | VIDA: |
|-------------|-----------|
| $\beta < 1$ | TEMPRANA. |
| $\beta = 1$ | UTIL. |
| $\beta > 1$ | DESGASTE. |

FUNCION DE CONFIABILIDAD.

$$R(t_1) = P[T > t_1] = \int_0^{\infty} f(t) dt \quad (A.30)$$



EXPONENCIAL.

$$R(t_1) = \int_{t_1}^{\infty} \lambda e^{-\lambda t} dt = e^{-\lambda t_1} = e^{-\frac{t_1}{MTBF}} \quad (A.31)$$

WEIBULL.

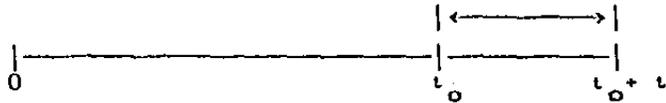
$$R(t_1) = e^{-\left[\frac{t_1 - \gamma}{\eta}\right]^\beta} \quad (A.32)$$

GENERAL.

$$R(t) = e^{-\left[\int_0^t \lambda(t) dt\right]} \quad (A.33)$$

FUNCIÓN DE CONFIABILIDAD CONDICIONAL.

Esta función es usada cuando se quiere conocer la confiabilidad de una misión adicional, de duración t , después de que la unidad ya ha acumulado t_0 horas de operación desde la edad 0.



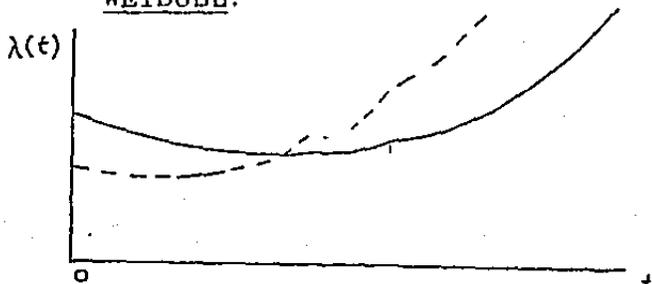
$$R(t_0, t) = \frac{R(t_0 + t)}{R(t_0)} \quad (A.34)$$

EXPONENCIAL.

$$R(t_0, t) = \frac{e^{-\lambda(t_0 + t)}}{e^{-\lambda t_0}} = e^{-\lambda t} = R(t) \quad (A.35)$$

NOTA: No es función de la edad.

WEIBULL.



$$R(t_0, t) = \frac{e^{-\left[\frac{t_0 + t - \gamma}{\eta}\right]^\beta}}{e^{-\left[\frac{t_0 - \gamma}{\eta}\right]^\beta}} = e^{-\left[\left(\frac{t_0 + t - \gamma}{\eta}\right)^\beta - \left(\frac{t_0 - \gamma}{\eta}\right)^\beta\right]}$$

si $\beta \neq 1$

Depende tanto de la edad en la que inició la misión como de su duración.

FUNCION DE LA TASA DE FALLA.

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (\text{A.36})$$

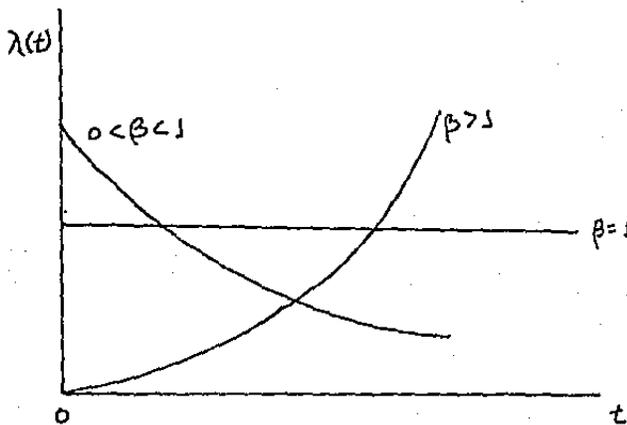
EXPONENCIAL.

$$\lambda(t) = \frac{\lambda e^{-\lambda t}}{e^{-\lambda t}} = \lambda = \text{Constante} \quad (\text{A.37})$$

WEIBULL.

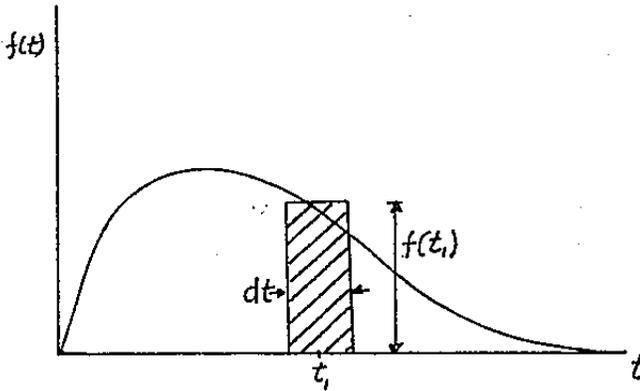
$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left[\frac{t - \gamma}{\eta} \right]^{\beta}, \quad \beta \neq 1 \quad (\text{A.38})$$

VARIA CON LA EDAD.



VIDA MEDIA.

$$M = \text{MTTF} = \int_0^{\infty} t f(t) dt = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (\text{A.39})$$



EXPONENCIAL.

$$M = \text{MTTF} = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} \quad (\text{A.40})$$

WEIBULL.

$$M = \text{MTTF} = \int_0^{\infty} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta}} dt \quad (\text{A.41})$$

$$\text{MTTF} = \gamma + \eta \Gamma\left[\frac{1}{\beta} + 1\right] \quad (\text{A.42})$$

APENDICE B
MANTENIBILIDAD Y DISPONIBILIDAD

B.1 CONCEPTOS SOBRE MANTENIBILIDAD.

Para los equipos en servicio uno de los parámetros importantes que valoran su comportamiento es el índice de disponibilidad, que tiene una estrecha relación con el mantenimiento y el concepto de tasa de reparación de fallas. Cuando se habla de la confiabilidad de un equipo implica que debe continuar su operación y en el momento en que exista la falla, el tiempo de la misión termina y el concepto de confiabilidad ya no es aplicable. Sin embargo, la valoración de la disponibilidad depende tanto del tiempo en servicio como del tiempo dedicado a la reparación del equipo.

En este apéndice se definen los conceptos de mantenibilidad, los tiempos medios y tasas de reparación de la distribución Lognormal y Exponencial, así como algunos conceptos de disponibilidad.

MANTENIBILIDAD. Es la probabilidad de ejecutar y terminar con éxito una acción específica de mantenimiento correctivo y/o preventivo. Estableciendo: un periodo de tiempo, un nivel de confianza deseado, mano de obra, nivel de destreza, equipos de prueba, datos técnicos, manuales de operación y mantenimiento, organización, instalaciones de apoyo y las condiciones ambientales.

MANTENIMIENTO. Cualquier acción que evite que las unidades no fallen y si fallan al restaurarlas alcancen los niveles de seguridad y confiabilidad satisfactorios, así como sus condiciones de operación.

DISTRIBUCIONES DEL TIEMPO FUERA DE SERVICIO FALLA.

La duración de mantenimiento preventivo y correctivo varían con el tiempo dependiendo de:

- El tipo de componente involucrado.
- Niveles de capacitación del personal de mantenimiento.
- Tipo de equipo disponible para realizar el mantenimiento.
- Las condiciones ambientales bajo las cuales ellos trabajan, etc.

Aún para componentes idénticos en localizaciones idénticas tales acciones de mantenimiento variarán de una unidad que ha fallado a la siguiente unidad que falle en equipos idénticos. Esto conduce a que el tiempo de mantenimiento se distribuya en forma particular. Tales distribuciones pueden ser de tipo Exponencial, Normal, Lognormal, Weibull, Gamma o de otros tipos. Una de las más usuales, sobre todo para muestras grandes (datos agrupados), es la distribución Lognormal ya que representa de la mejor forma a los tiempos de reparación [20].

DISTRIBUCION LOGNORMAL DEL TIEMPO DE REPARACION.

Para determinar la f.d.p. lognormal de los tiempos para reparacion, se deben de calcular:

\bar{t}' y $\sigma_{t'}$. Donde:

$$\bar{t}' = \text{Log } t \quad (\text{B.1})$$

t = tiempo que dura la reparacion.

$$\bar{t}' = \frac{\sum_{i=1}^N t'_i}{N}; \quad \sigma_{t'} = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (t'_i)^2 - N \cdot (\bar{t}')^2}{N-1} \right]^{1/2} \quad (\text{B.2})$$

N = Número total de observaciones ó reparaciones.

Para datos agrupados:

$$\bar{t}' = \frac{\sum_{j=1}^{N'} n_j t'_j}{\sum_{j=1}^{N'} n_j}; \quad \sigma_{t'} = \left[\frac{\sum_{j=1}^{N'} n_j (t'_j)^2 - N \cdot (\bar{t}')^2}{N-1} \right]^{1/2} \quad (\text{B.3})$$

Donde: n_j = Al número de observaciones idénticas ó reparaciones con el mismo tiempo de duracion.

N' = El número de tiempos de reparacion de valor diferentes ó número de grupos de datos.

Una vez encontrados los parámetros \bar{t}' y $\sigma_{t'}$, consecuentemente tenemos la f.d.p. lognormal:

$$g(t') = \frac{1}{t \sigma_{t'} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left[\frac{t' - \bar{t}'}{\sigma_{t'}} \right]^2} \quad (\text{B.4})$$

y su tiempo medio de reparacion del sistema:

$$\bar{t} = e^{\bar{t}' + \frac{1}{2} (\sigma_{t'})^2} = \tilde{t} e^{\frac{1}{2} (\sigma_{t'})^2} \quad (\text{B.5})$$

la mediana de los tiempos medios de reparación:

$$\tilde{t} = e^{\bar{t}'} = \text{Antilog}_e \bar{t}'$$

La moda ó el valor del tiempo en que las reparaciones se realizan con mayor frecuencia es:

$$t'' = e^{\bar{t}' - \sigma_{t'}^2} = \tilde{t} e^{-\sigma_{t'}^2} \quad (\text{B.6})$$

La desviación estándar de los tiempos hasta la restauración está dado por:

$$\sigma_{t'} = \bar{t} \left[e^{\sigma_{t'}^2} - 1 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{B.7})$$

DISTRIBUCION EXPONENCIAL DEL TIEMPO DE REPARACION.

Cuando la duración del tiempo de reparación ó restauración presenta una distribución exponencial, esta distribución aplica para el mantenimiento correctivo:

$$g(t) = \mu e^{-\mu t} = \frac{1}{\text{MTTR}} \cdot e^{-\frac{t}{\text{MTTR}}} \quad (\text{B.8})$$

Donde:

μ = Tasa de restauración ó reparación correctiva del equipo, expresada en reparaciones por unidad de tiempo, por ejemplo restauraciones por minuto.

t = Tiempo requerido para la restauración ó

reparación del equipo.

MTTR = Es el tiempo medio requerido para reparar el equipo para una función satisfactoria, expresada en las mismas unidades de tiempo como en t ; y

$$MTTR = \frac{1}{\mu} \quad (B.9)$$

CONCEPTOS BASICOS DE DISPONIBILIDAD.

La disponibilidad de un sistema puede ser definida de las maneras siguientes [20].

DISPONIBILIDAD INSTANTANEA. $A(t)$ Es la probabilidad de que un sistema estará disponible para su uso en cualquier tiempo t aleatorio después de iniciar su operación, ver figura B.1

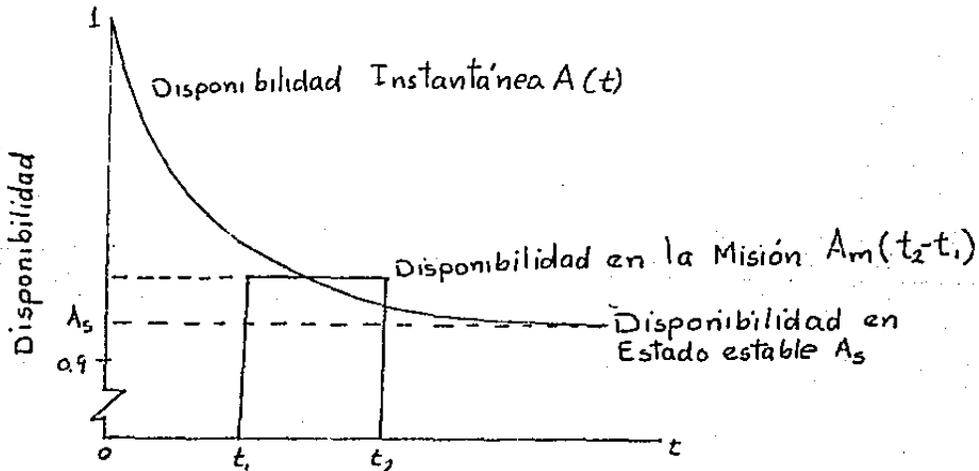
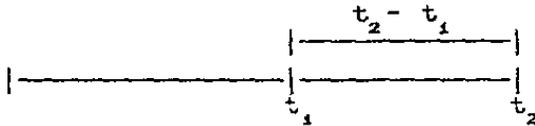


Figura B.1 Relaciones entre diferentes conceptos de disponibilidad.

DISPONIBILIDAD EN LA MISION $A_m(t_2 - t_1)$. Es la proporción del tiempo en un intervalo durante una misión en la que el sistema está disponible para su uso:

$$A_m(t_2 - t_1) = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} A(t) dt \quad (B.10)$$



DISPONIBILIDAD EN ESTADO ESTABLE A_s Es la probabilidad de que un sistema estará disponible para su uso en un punto en el tiempo t después de iniciar la operación del sistema conforme t es muy grande ó $t \rightarrow \infty$

$$A_s = \lim_{t \rightarrow \infty} A(t) \quad (B.11)$$

APENDICE C

PROGRAMAS DE BASES DE DATOS ESTABLECIDOS.

Una alternativa que se ofrece para obtener información, en lo inmediato, para realizar aplicaciones específicas sobre confiabilidad es recurrir a los bancos de datos ya establecidos, en general estos programas proporcionan el respaldo suficiente en tasa de falla como para hacer evaluaciones razonables.

Muchas de las bases de datos han sido desarrolladas en E.E. U.U.. En la industria de la generación de energía eléctrica se tienen actualizados los datos sobre los equipos y eventos que afectan la disponibilidad y operación de las plantas; en las industrias no-eléctricas los programas de datos dan atención principalmente y en forma especializada a aplicaciones en la industria espacial y servicios militares.

Actualmente se tiene pocos datos sobre el factor humano respecto a la confiabilidad de sistemas, sobre este tema en la Industria Nuclear se han desarrollado algunos trabajos, para mayor información ver referencia [2]. A continuación se describen brevemente algunas de las bases de datos para dar una idea del tipo y alcance de los programas desarrollados.

a). Failure Rate Data Program (FARADA), patrocinada conjuntamente por la fuerza aérea, armada, marina y NASA; actualmente lo patrocina el GIDEP; comprende la colección, análisis y distribución de datos sobre las

tasas y modos de falla.

b). Government-Industry Data Exchange Program (GIDEP)

es una actividad cooperativa entre gobierno e industrias, lo que pretende es reducir o eliminar gastos en tiempo o dinero haciendo un uso máximo del conocimiento existente.

El programa proporciona los medios para intercambiar ciertos tipos de datos técnicos esenciales en la investigación, diseño, desarrollo, producción y operación de las diferentes etapas de la vida de equipos y sistemas.

c). Nonelectric Parts Reliability Data (NPRD-1)

La información principalmente es de aplicaciones militares y del espacio, se ofrecen 4 secciones:

- i). Datos de tasa de falla genéricas.
- ii). Datos de tasa de falla detallados por partes.
- iii.) Datos de partes para aplicaciones comerciales.
- iv). Modos y mecanismos de falla.

d). Energy Technology Engineering Center (ETEC).

Principalmente se refiere a equipos y partes usados en instalaciones de reactores experimentales y pruebas de metales líquidos.

e). United Kingdom Atomic Energy Authority Data Program. (UKAEA), National Center of Systems Reliability (SYREL). El programa UKAEA es una

fuelle de datos sobre confiabilidad de reactores de centrales nucleares y datos industriales.

f). Nuclear Plant Reliability Data System (NERDS). Es diseñado por ANSI para recopilar, almacenar y reportar estadísticas de falla de sistemas y componentes relacionados con seguridad de Plantas Nucleoelectricas.

g). Generating Availability Data System (GADS), anteriormente Edison Electric Institute Equipment Availability Data System, regulado por National Electric Reliability Council (NERC), principalmente trata de resumir los datos de comportamiento de todos los tipos de equipos en centrales generadoras, proporciona estadísticas sobre la disponibilidad y mantenimiento por tamaño de Unidad.

h). Licensee Event Report. Es un reporte mensual preparado por la Nuclear Regulatory Commission, da una fuente de datos sobre eventos significativos, detalles de las condiciones de operación de sus componentes, localización de radioactividad, su detección y corrección.

i). Operating Units Status Report (NUREG-0020), "Libro Gris", es un reporte mensual de la Nuclear Regulatory Commission, resume por unidad, estado de las inspecciones, licencias, niveles de producción diaria, unidades en paro y reducción de su capacidad.

j). Reactor Safety Study WASH-1400 (NUREG-75/014). Es un estudio y guía de riesgos de accidentes en Plantas Nucleoeléctricas comerciales, proporciona información sobre la metodología de colección de datos, tasas de falla y desarrollo de modelos de sistemas para análisis de riesgo.

k). Failure Incident Report Review (FIRR). Son actividades realizadas por un subcomite de ANSI, revisa problemas para determinar la necesidad para cambiar los estándares.

l). IEEE Survey of Industrial and Commercial Power Systems. Es un reporte de 30 empresas con 68 plantas en 9 industrias, proporciona fallas de equipos eléctricos, costos de las salidas, tipo de fallas y causas de pérdida de carga.

m). Nuclear Power Experience Reports. Es un organismo privado de colección y divulgación de datos.

n). IEEE Nuclear Reliability Data Manual ANSI/IEEE Std. 500-1984. Ofrece una base de datos para usarse en análisis cualitativo y cuantitativo de confiabilidad.

Otras bases de datos para componentes electrónicos o de plantas generadoras de electricidad son:

o). MIL-HANDBOOK 217

p). RADC Rome Air Development Center.

q). EEL Edison Electric Institute.