



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE
MEXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES

"CAMPUS ARAGON"

**"UN CURSO DE FIABILIDAD CON ENFOQUE
HACIA DISPOSITIVOS ELECTRONICOS"**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO EN COMPUTACION**

P R E S E N T A:

FRANCISCO PENSABE GOMEZ

**DIRECTOR DE TESIS :
MAT. LUIS RAMIREZ FLORES**

SAN JUAN DE ARAGÓN EDO. DE MEXICO. 1996

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

50
Lij



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 esta 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.

TESIS

COMPLETA



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES
ARAGÓN
DIRECCION

FRANCISCO PENSABE GÓMEZ
P R E S E N T E .

En contestación a su solicitud de fecha 4 de septiembre del año en curso, relativa a la autorización que se le debe conceder para que el señor profesor, Mat. LUIS RAMÍREZ FLORES pueda dirigirle el trabajo de Tesis denominado "UN CURSO DE FIABILIDAD CON ENFOQUE HACIA DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS", con fundamento en el punto 6 y siguientes, del Reglamento para Exámenes Profesionales en esta Escuela, y toda vez que la documentación presentada por usted reúne los requisitos que establece el precitado Reglamento; me permito comunicarle que ha sido aprobada su solicitud.

Aprovecho la ocasión para reiterarle mi distinguida consideración.

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPÍRITU"
San Juan de Aragón, México., 12 de septiembre de 1995
EL DIRECTOR


M. CLAUDIO C. MERRIFIELD CASTRO



c c p Jefe de la Unidad Académica.
c c p Jefatura de Carrera de Ingeniería en Computación.
c c p Asesor de Tesis.

CCMC/AIR/11a.

AGRADECIMIENTOS

Quiero dedicar ésta tesis a mis padres Francisco Pensabé de la Cruz y María Irene Gómez de Pensabé, así como a mi hermano Fernando Pensabé Gómez por todo su apoyo y un agradecimiento muy especial a las siguientes personas:

Francisco Pensabé de la Cruz por sus consejos y puntos de vista en la redacción de ésta tesis para intentar que fuera lo más sencilla posible.

Mat. Luis Ramírez Flores por sus consejos, por el material proporcionado para la elaboración de este trabajo y por esa paciencia que lo caracteriza.

Lic. José Pedro Narvaez López, Director de Calidad de Xerox Mexicana y a los ingenieros de la planta en Aguascalientes que me atendieron.

y por último al siguiente departamento

DEPARTMENT OF THE NAVY

DEFENSE PRINTING SERVICE DETACHMENT OFFICE

de los Estados Unidos de América por contestar mis cartas y enviarme los manuales Militares solicitados. A todos ellos

MUCHAS GRACIAS

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	xv
I. ANTECEDENTES	1
II. EL PROBLEMA DE LA FIABILIDAD	7
2.1 PRINCIPALES CAUSAS DE LA INESTABILIDAD	9
2.2 ASEGURAMIENTO DE LA FIABILIDAD	9
2.3 MEDICIÓN DE LA ELEVACIÓN DE LA FIABILIDAD	14
2.4 LA IMPORTANCIA DE ACUMULAR LOS DATOS DE FALLA	16
2.4.1 LA IMPORTANCIA DEL REAPROVECHAMIENTO DE LOS DATOS SOBRE FALLAS	16
2.4.2 FUENTES PARA EL REAPROVECHAMIENTO DE LOS DATOS	16
2.5 RESUMEN DE LAS NECESIDADES DE LA FIABILIDAD	17
III. RAZONES POR LAS QUE FALLAN LOS EQUIPOS ELECTRÓNICOS	19
3.1 CRITERIO DE FALLAS	21
3.1.1 FALLAS ALEATORIAS	21
3.1.2 FALLAS SECUNDARIAS	21
3.1.3 FALLAS POR DESGASTE	22
3.1.4 DEFECTOS INICIALES	22
3.1.5 DEFECTOS NO OPERACIONALES	22
3.1.6 RESPONSABILIDAD DE LA INGENIERÍA	22
3.1.7 COMPLEJIDAD Y FALLAS EN LOS COMPONENTES	23
3.1.8 DEFECTOS DE TRABAJO	24
IV. FALLAS EN LOS EQUIPOS ELECTRÓNICOS Y SUS COMPONENTES	25
4.1 FALLAS TÍPICAS EN LOS EQUIPOS	27
4.1.1 FALLAS EN LOS EQUIPOS	27
4.1.2 FALLAS DEBIDO AL DISEÑO MECÁNICO	27
4.2 FALLAS TÍPICAS EN LOS COMPONENTES	28
4.2.1 RESISTENCIAS CON COMPOSICIÓN DE CARBONO	28

4.2.2 RESISTENCIAS DE ALAMBRE	28
4.2.3 RESISTENCIAS VARIABLES DE PROPÓSITO GENERAL	28
4.2.4 CAPACITORES FIJOS	29
4.2.5 GENERACIÓN DE RUIDO Y DE PULSOS	30
4.2.6 CAPACITORES VARIABLES	30
4.2.7 CABLES Y ALAMBRES	31
4.2.8 ENCHUFES Y CLAVIJAS	32
4.2.9 RELEVADORES	32
4.2.10 INTERRUPTORES O SWITCHES	32
4.2.11 TRANSFORMADORES	33

V. EFECTOS DE LAS CONDICIONES AMBIENTALES EN LOS EQUIPOS

DE FIABILIDAD	35
5.1 CLIMATOLOGÍA MUNDIAL	37
5.1.1 LOS TRÓPICOS	37
5.1.2 EL DESIERTO	38
5.1.3 EL ÁRTICO	38
5.2 EFECTOS SEVEROS PROVOCADOS POR EL MEDIO AMBIENTE	38
5.2.1 CONDICIONES TROPICALES	38
5.2.2 CONDICIONES EN EL DESIERTO	39
5.2.3 CONDICIONES EN EL ÁRTICO	39
5.3 EFECTOS DE LAS ALTAS TEMPERATURAS	39
5.3.1 RESISTENCIAS FIJAS	40
5.3.2 RESISTENCIAS VARIABLES	40
5.3.3 CABLES Y FORROS	41
5.3.4 CAPACITORES FIJOS	41
5.3.5 TRANSFORMADORES Y BOBINAS DE REACTANCIA	41
5.3.6 RELEVADORES	42
5.3.7 INTERRUPTORES	43
5.3.8 CLAVIJAS Y ENCHUFES	43
5.3.9 RECTIFICADORES DE PODER	43
5.4 EFECTOS DE LA HUMEDAD	44
5.5 EFECTOS DE LAS BAJAS TEMPERATURAS	44
5.5.1 COMPONENTES ELECTRÓNICOS	44
5.6 SISTEMAS DE PROTECCIÓN CONTRA CHOQUES Y	

4.2.2 RESISTENCIAS DE ALAMBRE	28
4.2.3 RESISTENCIAS VARIABLES DE PROPÓSITO GENERAL	28
4.2.4 CAPACITORES FIJOS	29
4.2.5 GENERACIÓN DE RUIDO Y DE PULSOS	30
4.2.6 CAPACITORES VARIABLES	30
4.2.7 CABLES Y ALAMBRES	31
4.2.8 ENCHUFES Y CLAVIJAS	32
4.2.9 RELEVADORES	32
4.2.10 INTERRUPTORES O SWITCHES	32
4.2.11 TRANSFORMADORES	33

V. EFECTOS DE LAS CONDICIONES AMBIENTALES EN LOS EQUIPOS

DE FIABILIDAD	35
5.1 CLIMATOLOGÍA MUNDIAL	37
5.1.1 LOS TRÓPICOS	37
5.1.2 EL DESIERTO	38
5.1.3 EL ÁRTICO	38
5.2 EFECTOS SEVEROS PROVOCADOS POR EL MEDIO AMBIENTE	38
5.2.1 CONDICIONES TROPICALES	38
5.2.2 CONDICIONES EN EL DESIERTO	39
5.2.3 CONDICIONES EN EL ÁRTICO	39
5.3 EFECTOS DE LAS ALTAS TEMPERATURAS	39
5.3.1 RESISTENCIAS FIJAS	40
5.3.2 RESISTENCIAS VARIABLES	40
5.3.3 CABLES Y FORROS	41
5.3.4 CAPACITORES FIJOS	41
5.3.5 TRANSFORMADORES Y BOBINAS DE REACTANCIA	41
5.3.6 RELEVADORES	42
5.3.7 INTERRUPTORES	43
5.3.8 CLAVIJAS Y ENCHUFES	43
5.3.9 RECTIFICADORES DE PODER	43
5.4 EFECTOS DE LA HUMEDAD	44
5.5 EFECTOS DE LAS BAJAS TEMPERATURAS	44
5.5.1 COMPONENTES ELECTRÓNICOS	44
5.6 SISTEMAS DE PROTECCIÓN CONTRA CHOQUES Y	

VIBRACIONES	45
5.7 EL EFECTO DE LA ALTITUD	46
5.7.1 CAPACITORES VARIABLES	46
5.7.2 CAPACITORES FIJOS	46
5.8 EFECTOS DE LA RADIACIÓN NUCLEAR	47
5.9 EFECTOS POR ALMACENAMIENTO	48
5.10 PRUEBA DE LOS SEMICONDUCTORES BAJO TENSIONES	
AMBIENTALES	48
5.10.1 CLASIFICACIÓN DE LAS PRUEBAS AMBIENTALES	49
5.10.2 CÁMARAS DE PRUEBA	51
5.10.3 TENSIONES TÉRMICAS	51
5.10.4 ALMACENAMIENTO A ALTAS TEMPERATURAS	52
5.10.5 CICLOS DE TEMPERATURA	52
5.10.6 DESCARGAS TÉRMICAS	53
5.10.7 RESISTENCIA A LA HUMEDAD	53
5.10.8 ATMÓSFERA DE SAL	54
5.10.9 CURVA DE LA FUNCIÓN DE RIESGO O FALLA	54
5.11 CONSUMACIÓN ESTÁTICA	55
5.12 DESTRUCCIÓN DINÁMICA	55
5.13 PRUEBAS MECÁNICAS	56
VI. CONCEPTOS FUNDAMENTALES DE LA FIABILIDAD	59
MEDICIONES DE FIABILIDAD	61
DISTRIBUCIONES DE FIABILIDAD	
6.1 FÓRMULAS BÁSICAS	68
6.2 FUNCIÓN DE RIESGO	73
6.3 PROCESO DE POISSON	74
6.4 DISTRIBUCIÓN LOGARÍTMICA NORMAL	81
6.5 DISTRIBUCIÓN NORMAL	82
6.6 DISTRIBUCIÓN GAMMA	83
6.7 DISTRIBUCIÓN WEIBULL	84
6.8 DISTRIBUCIÓN BINOMIAL	85

VII. CONFIGURACIONES BÁSICAS	87
SISTEMAS MULTICOMPONENTES	
DISEÑANDO PARA UNA MÁXIMA FIABILIDAD	89
LA FIABILIDAD A TRAVÉS DE LA REDUNDANCIA	89
7.1 SISTEMAS SERIE Y PARALELO	89
7.2 SISTEMAS NI EN SERIE NI EN PARALELO	94
7.3 CONFIGURACIONES DELTA Y ESTRELLA	100
7.4 RESUMEN	108
VIII. PRUEBAS DE VIDA	113
PRUEBAS DE VIDA	115
8.1 PRUEBAS SIN REEMPLAZO CON TIEMPOS DE FALLA REGISTRADOS	115
8.2 PRUEBAS ESTÁNDARES, TIEMPOS DE FALLA ANOTADAS	117
8.3 TRUNCAMIENTO INDEXADO (CENSADO TIPO II); SIN REEMPLAZO	119
8.4 TRUNCAMIENTO INDEXADO (CENSADO TIPO II); CON REEMPLAZO	127
8.5 TIEMPO DE TRUNCAMIENTO (CENSADO TIPO II); CON REEMPLAZO	131
8.6 PRUEBA DE HIPÓTESIS PARA COMPONENTES CFR Y CENSADO TIPO II	135
IX. MANEJO DE LA MIL-H108	
INTRODUCCIÓN	143
SECCIÓN A	
DESCRIPCIONES GENERALES PARA LOS PLANES DE TOMA DE MUESTRA PARA LAS PRUEBAS DE VIDA	
A1 ALCANCE	144
A1.1 PROPÓSITO	144
A1.2 ESPECIFICACIÓN DE LA VIDA MEDIA ACEPTABLE	144
A1.3 ESPECIFICACIÓN DE LA VIDA MEDIA INACEPTABLE	144

A1.4 ESPECIFICACIÓN DE LA PARTE ACEPTABLE DEL LOTE QUE FALLA ANTES DEL TIEMPO ESPECIFICADO	144
A1.5 ESPECIFICACIÓN DE LA PARTE INACEPTABLE DEL LOTE QUE FALLA ANTES DEL TIEMPO ESPECIFICADO	144
A2 RIESGOS PARA LA TOMA DE MUESTRAS	144
A2.1 RIESGO DEL FABRICANTE (α)	144
A2.2 ESPECIFICACIONES DEL RIESGO DEL FABRICANTE	145
A2.3 RIESGO DEL CONSUMIDOR (β)	145
A2.4 ESPECIFICACIONES DEL RIESGO DEL CONSUMIDOR	146
A3 CURVAS CARACTERÍSTICAS DE OPERACIÓN	146
A3.1 CURVA CARACTERÍSTICA DE OPERACIÓN	146
A3.2 CÓDIGO DE DESIGNACIÓN PARA LA TOMA DE MUESTRAS	146
A3.3 LA RAZÓN θ_1/θ_0 COMO MEDICIÓN DE PROTECCIÓN OFRECIDA PARA LA TOMA DE MUESTRAS	146
A.4 ESPECIFICANDO LOS PROCEDIMIENTOS DE ACEPTACIÓN	169

SECCIÓN B

PRUEBAS DE VIDA TERMINADAS EN PRESENCIA DE UN NÚMERO PREFIJADO DE FALLAS

PARTE I

PROCEDIMIENTOS DE ACEPTACIÓN

B1 MUESTREO PARA LAS PRUEBAS DE VIDA	170
B1.1 USO DE LAS MUESTRAS PARA LAS PRUEBAS DE VIDA	170
B2 SELECCIONANDO EL PLAN DE TOMA DE MUESTRAS PARA LA PRUEBA DE VIDA	170
B2.1 TABLAS MAESTRAS DE MUESTREO	170
B2.2 OBTENCIÓN DE LA TOMA DE MUESTRAS	170
B2.2.1 TAMAÑO DE LA MUESTRA	170
B2.2.2 NUMERO FINAL O DE TERMINACIÓN (r)	170
B2.2.3 CONSTANTE DE ACEPTABILIDAD (C)	171

B3 PROCEDIMIENTO DE ACEPTABILIDAD DEL LOTE CUANDO LA PRUEBA ES SIN REEMPLAZO	171
B3.1 VIDA MEDIA ESTIMADA	171
B3.2 CÁLCULOS	171
B3.3 CRITERIO DE ACEPTABILIDAD	171
B4 PROCEDIMIENTO DE ACEPTABILIDAD DEL LOTE CUANDO LA PRUEBA ES CON REEMPLAZO	172
B4.1 VIDA MEDIA ESTIMADA	172
B4.2 CÁLCULOS	172
B4.3 CRITERIO DE ACEPTABILIDAD	172

PARTE II

TIEMPO DE ESPERA SUPUESTO DE LAS PRUEBAS DE VIDA Y CONSIDERACIONES DE COSTO EN LA SELECCIÓN DEL TAMAÑO DE LAS MUESTRAS

B5 TAMAÑO DE LA MUESTRA	175
B5.1 TIEMPO DE ESPERA SUPUESTO	175
B5.2 AHORRO RELATIVO EN TIEMPO INCREMENTANDO EL TAMAÑO DE LA MUESTRA CUANDO LA PRUEBA ES SIN REEMPLAZO	176
B5.3 AHORRO RELATIVO EN TIEMPO INCREMENTANDO EL TAMAÑO DE LA MUESTRA CUANDO LA PRUEBA ES CON REEMPLAZO	176
B5.4 AHORRO RELATIVO EN TIEMPO COMPARANDO LAS PRUEBAS CON Y SIN REEMPLAZO	176
B5.5 CONSIDERACIÓN DE COSTOS AL ESCOGER EL TAMAÑO DE LA MUESTRA	178
B5.5.1 COSTOS CUANDO LA PRUEBA ES SIN REEMPLAZO	178
B5.5.2 TAMAÑO ÓPTIMO DE LA MUESTRA CUANDO LA PRUEBA ES SIN REEMPLAZO	178
B5.5.3 COSTOS CUANDO LA PRUEBA ES CON REEMPLAZO	180
B5.5.4 TAMAÑO ÓPTIMO DE LA MUESTRA CUANDO	

LA PRUEBA ES CON REEMPLAZO	180
PARTE III	
PLANES DE TOMA DE MUESTRA PARA PRUEBAS DE VIDA PARA CIERTOS VALORES ESPECIFICADOS DE α , β , Y θ_1/θ_0	
B6 DISEÑANDO PLANES DE TOMA DE MUESTRAS PARA PRUEBAS DE VIDA	188
B6.1 PLANES DE TOMA DE MUESTRA PARA PRUEBAS DE VIDA	189
B6.2 EXPANSIÓN DE LA TABLA 9B-5 (TABLA 2B-5) PARA VALORES θ_1/θ_0 MAYORES QUE 2/3	189
SECCION 2C	
PRUEBAS DE VIDA FINALIZADAS EN TIEMPO PREFIJADO	
PARTE I	
PROCEDIMIENTOS DE ACEPTACIÓN	
C1 PLANES DE TOMA DE MUESTRA PARA PRUEBAS DE VIDA	192
C1.1 USO DE LOS PLANES DE TOMA DE MUESTRA DE LAS PRUEBAS DE VIDA	192
C2 SELECCIONANDO LAS TOMAS DE MUESTRA DE LA PRUEBA DE VIDA CUANDO LA MUESTRA ES SIN REEMPLAZO	192
C2.1 TABLA MAESTRA DE LA TOMA DE MUESTRAS	192
C2.2 OBTENCIÓN DE LOS PLANES DE TOMA DE MUESTRAS	192
C2.2.1 NÚMERO DE FINALIZACIÓN	192
C2.2.2 TAMAÑO DE LA MUESTRA	192
C2.2.3 TIEMPO DE FINALIZACIÓN	193
C3 PROCEDIMIENTO PARA ACEPTAR EL LOTE CUANDO LA PRUEBA ES SIN REEMPLAZO	193
C3.1 CRITERIO DE ACEPTABILIDAD	193
C.4 SELECCIONANDO LOS PLANES DE TOMA DE MUESTRA CUANDO LA PRUEBA ES CON REEMPLAZO	193

C4.1 TABLA MAESTRA DE LA TOMA DE MUESTRAS	193
C4.2 OBTENCIÓN DE LA TOMA DE MUESTRAS	193
C4.2.1 NÚMERO DE FINALIZACIÓN	193
C4.2.2 TAMAÑO DE LA MUESTRA	194
C4.2.3 TIEMPO DE FINALIZACIÓN	194
C5 PROCEDIMIENTOS PARA ACEPTAR EL LOTE CUANDO LA PRUEBA ES CON REEMPLAZO	194
C5.1 CRITERIO DE ACEPTABILIDAD	194

PRUEBAS DE VIDA FINALIZADAS EN TIEMPO PREFIJADO

PARTE II

PLANES PARA LA TOMA DE MUESTRAS PARA PRUEBAS DE VIDA
ESPECIFICANDO α , β , θ_1/θ_0 Y T/θ_0

C6 DISEÑANDO LA TOMA DE MUESTRAS CON PRUEBAS DE VIDA	200
C6.1 PRUEBAS DE VIDA CUANDO LA PRUEBA ES SIN REEMPLAZO	201
C6.2 PRUEBAS DE VIDA CUANDO LA PRUEBA ES CON REEMPLAZO	201

PRUEBAS DE VIDA FINALIZADAS EN TIEMPO PREFIJADO, PRUEBAS
SIN REEMPLAZO

PARTE III

PLANES PARA LA TOMA DE MUESTRA DE PRUEBA DE VIDA BASADAS
EN RAZONES DE FALLA

C7 FRACCIÓN DE FALLA DE UN LOTE ANTES DEL TIEMPO ESPECIFICADO	207
C8 TOMA DE MUESTRAS PARA PRUEBAS DE VIDA	207

SECCIÓN 2D

PLANES DE TOMA DE MUESTRA PARA PRUEBAS DE VIDA
SECUENCIALES

D1 PLANES PARA LA TOMA DE MUESTRAS DE PRUEBAS DE VIDA SECUENCIALES	209
D1.1 USO DE PRUEBAS DE VIDA SECUENCIALES	209
D1.2 CÓDIGO DE DESIGNACIÓN PARA LA TOMA DE MUESTRAS	209
D2 SELECCIÓN DE PRUEBAS DE VIDA SECUENCIAL PARA DETERMINAR LA ACEPTABILIDAD DEL LOTE	209
D2.1 TABLA MAESTRA DE LA TOMA DE MUESTRAS	209
D2.2 OBTENCIÓN DE LA TOMA DE MUESTRAS	209
D2.2.1 TAMAÑO DE LA MUESTRA	209
D2.2.2 LÍNEA DE CORTE ACEPTADA (h_0)	209
D2.2.3 LÍNEA DE CORTE RECHAZADA (h_1)	210
D2.2.4 LÍNEA DE DECISIÓN DE LA PENDIENTE	210
D2.3 TIEMPO DE ACEPTACIÓN	210
D2.4 TIEMPO DE RECHAZO	210
D3 PROCEDIMIENTO DE ACEPTABILIDAD DE UN LOTE CUANDO LA PRUEBA ES SIN REEMPLAZO	210
D3.1 VIDA TOTAL	210
D3.2 CÁLCULO	210
D3.3 CRITERIO DE ACEPTABILIDAD	211
D4 PROCEDIMIENTO DE ACEPTABILIDAD DE UN LOTE CUANDO LA PRUEBA ES CON REEMPLAZO	211
D4.1 VIDA TOTAL	211
D4.2 CÁLCULO	211
D4.3 CRITERIO DE ACEPTABILIDAD	211
D5 SELECCIÓN DE TIEMPO PARA DETERMINAR LA ACEPTABILIDAD	212
D6 TRUNCAMIENTO DE PRUEBAS DE VIDA SECUENCIALES	212
D7 PROCEDIMIENTO DE ACEPTACIÓN POR GRÁFICAS	213
D7.1 HACER LAS GRÁFICAS ANTES DE EMPEZAR LA PRUEBA DE VIDA	213
D7.2 GRAFICANDO LOS DATOS	213
D8 NÚMERO ESPERADO DE FALLAS REQUERIDAS PARA LA DECISIÓN	213

D9 TIEMPO DE ESPERA SUPUESTO REQUERIDO PARA LA DECISIÓN	213
APÉNDICE D1	222
X. DISPONIBILIDAD Y MANTENIBILIDAD	225
CONCLUSIONES	231
GLOSARIO DE TÉRMINOS	235
BIBLIOGRAFÍA	239

INTRODUCCIÓN.

El siguiente trabajo de fiabilidad es solo un panorama de lo que en realidad es la Ingeniería de fiabilidad o de confiabilidad. La idea original es que dicha tesis sirva como un texto o como referencia para la posible materia de Fiabilidad que sería impartida en un semestre en la E.N.E.P. ARAGÓN para las carreras de Ingeniería en Computación, Ingeniería Civil e Ingeniería Mecánica-Eléctrica. El nuevo Centro de Investigaciones de la E.N.E.P. ARAGÓN serviría para realizar las pruebas junto con la industria privada, con el fin de abaratar los costos de producción de muchos equipos manufacturados en México y empezar a tener tecnología propia para poder competir con los países industrializados. Desafortunadamente muchas empresas no conocen ésta herramienta, algunas lo usan pero se reservan los datos para evitar posible espionaje industrial.

La Fiabilidad o Confiabilidad es una parte del Control Total de Calidad, la cual nos ayuda a predecir cómo un producto en servicio operará en manos del consumidor. Inicialmente ésta herramienta fue usada solamente para fines militares (Estados Unidos, Inglaterra y la Ex Unión Soviética principalmente), hoy en día es usada también con fines comerciales. Su aplicación no es exclusiva en el diseño de equipos electrónicos, se puede ver también la utilidad en la ingeniería industrial, en la ingeniería del software, en seguridad industrial, en la termodinámica, en la ingeniería civil, etc..

El mayor problema encontrado para la elaboración de este trabajo fue la falta de información disponible en México, (aún buscándola en Estados Unidos y Canadá es difícil de encontrar), y la poca información que hay disponible es muy matemática por la gran cantidad de modelos matemáticos usados. En los capítulos 6, 7, 8 se incluyen muchas fórmulas matemáticas, aún cuando aquí no se pretende demostrar de donde surgen todas estas fórmulas, sino más bien su aplicación en la vida real y además sirven para comprender mejor el capítulo 9. Se decidió usar la norma MIL-H108 (Procedimientos de muestreo y tablas para pruebas de vida y de fiabilidad, basadas en la distribución exponencial) por ser una de las normas más completas comparadas con otras normas militares.

Las normas MIL-STD (Military Specifications and Standards) son manuales publicados por la DOD (Departamento de Defensa del Pentágono de los Estados Unidos de América) que contienen notas, definiciones, procedimientos, dibujos, gráficas, tablas, fórmulas, etc.. Estos estándares proporcionan los mínimos requerimientos para realizar una tarea específica.

La MIL-H108 contiene tres tipos de ensayos, a diferencia de la MIL-STD-690B (Planes de muestreo para razones de falla y procedimientos) y la MIL-STD-781B (Pruebas de fiabilidad para el desarrollo de la ingeniería, calificación y producción) que sólo incluyen 2 y 1 tipos de

ensayos respectivamente. El documento proporciona planes para pruebas terminadas en un índice predeterminado de destrucción r , o en un tiempo predeterminado t_0 , también como planes secuenciales. Los planes pueden ser usados para pruebas de muestreo con o sin reemplazo. Además contiene tablas y CCO (Curvas Características de Operación) relacionadas con las pruebas de vida.

Documento*	Planes en función de					Tipo de ensayo		
	Distribución básica y tipo de plan	Vida media	Tasa de riesgo	Vida fiable	Tasa de falla (TF)	Terminado por fallas	Terminado por tiempo	Secuencial
MIL-HDBK 108	Exponencial, lote por lote	X			X	X	X	X
MIL-STD 690B	Exponencial, lote por lote				X		X	
MIL-STD-781B	Exponencial, esquema de muestreo	X					X	X
TR-3	Weibull, lote por lote	X					X	
TR-4	Weibull, lote por lote		X				X	
TR-6	Weibull, lote por lote			X			X	
TR-7	Weibull, lote por lote, conversión de la MIL-STD-105D	X	X	X			X	

La MIL-STD-690B (1960), esta norma proporciona planes para evaluar la capacidad del proceso más que para producir componentes electrónicos que se ajusten a una tasa de falla especificada como requisito. Por otra parte, la MIL-STD-781C es un conjunto de planes de ensayo de aceptación, tanto para la calificación de la fiabilidad de producción como para la aceptación de la fiabilidad en la producción. Esta norma se desarrolló para equipos electrónicos, en contraste con la MIL-STD-690B que es para componentes electrónicos.

La tesis está dividida en 10 capítulos, que son:

Capítulo I: "ANTECEDENTES", aquí se da una breve explicación de lo que es la fiabilidad junto con ejemplos que demuestran la aplicabilidad de la fiabilidad en los diferentes campos de la ingeniería.

Capítulo II: "EL PROBLEMA DE LA FIABILIDAD", se habla sobre las dificultades que tiene un diseñador en la obtención de datos sobre fiabilidad y el porque se debe tener un buen banco de datos sobre fiabilidad.

Capítulo III: "RAZONES POR LAS QUE FALLAN LOS EQUIPOS ELECTRÓNICOS", se abarcan las falla más comunes durante y después de un equipo en funcionamiento (cuando se hace mención a la palabra equipo, se refiere a un artículo o sistema global, por ejemplo una computadora).

Capítulo IV: "FALLAS EN LOS EQUIPOS ELECTRÓNICOS Y SUS COMPONENTES", aquí se tratan las fallas más comunes pero en componentes específicos (cuando se hace mención a la palabra componente, se refiere a una pieza, elemento o circuito de un equipo, por ejemplo, un capacitor, una tarjeta, etc.).

Capítulo V: "EFECTOS DE LAS CONDICIONES AMBIENTALES EN LOS EQUIPOS DE FIABILIDAD". El principal tema tratado aquí es de como los diferentes climas existentes afectan el funcionamiento de los componentes y equipos, además de una breve explicación de la norma MIL-STD-883 para pruebas ambientales de semiconductores.

Capítulo VI: "CONCEPTOS FUNDAMENTALES DE LA FIABILIDAD", es el uso de las fórmulas más básicas en la teoría de la fiabilidad.

Capítulo VII: "CONFIGURACIONES BÁSICAS", se abarcan los diferentes tipos de configuraciones para la simplificación y mejora en el diseño de cualquier equipo o sistema.

Capítulo VIII: "PRUEBAS DE VIDA", se trata de explicar de donde salen las fórmulas y conceptos usados en la norma MIL-H108.

Capítulo IX: "MANEJO DE LA MIL-H108", es el manual completo de la versión en inglés de la norma MIL-H108. Hay que hacer notar que la numeración original de las tablas y figuras de dicha norma están entre paréntesis.

Capítulo X: "DISPONIBILIDAD Y MANTENIBILIDAD", son las definiciones de disponibilidad y mantenibilidad y la relación que tienen con la fiabilidad.

I. ANTECEDENTES.

Desde hace tiempo se ha tratado de que los productos tengan una larga vida productiva, y que la cantidad de fallas sean lo mínimo posible. A medida que los productos se hacen más complejos, los problemas de fallas se incrementan también. De ahí, que haya surgido la **Ingeniería en Fiabilidad o Teoría de la Confiabilidad** como una herramienta.

En 1952 en los Estados Unidos fué formado un grupo consultivo de equipo electrónico (Advisory Group on Reliability of Electronic Equipment (AGREE)) bajo la dependencia de la Secretaría de Defensa para "monitorear y estimular el interés en cuestiones de fiabilidad y recomendar medidas de corrección las cuales resultarían en un equipo electrónico más fiable". En 1957, AGREE definió la fiabilidad como sigue: "**La fiabilidad es la probabilidad de realizar, sin fallas, una función específica bajo condiciones dadas para un período de tiempo especificado**". En este sentido, la fiabilidad no es la prueba del producto, sino más bien cómo operará, en las manos del consumidor.

Otras definiciones sobre fiabilidad son:

- La probabilidad de que un artículo o producto (equipo electrónico) realice una función determinada, en un período determinado, en condiciones determinadas.
- El grado de confianza que puede concederse a un elemento, ateniéndose a la calidad de los materiales empleados, de la perfección con que ha sido elaborado, y la multiplicidad de controles y pruebas a las que fué sometido. Y cuando un elemento satisface todas estas condiciones, se puede tener la seguridad absoluta de su funcionamiento, aunque, puede haber imponderables que hagan fallar estas previsiones.

La fiabilidad tiende a imponerse en muchos campos de la industria entre los que se cuentan: la aeronáutica, la militar, los cables submarinos, los dispositivos automáticos, la electrónica, etc., y tan solo una pequeña falla en estos modernos sistemas puede dar lugar a grandes pérdidas técnicas y económicas, y en algunos casos puede provocar efectos catastróficos. Por ejemplo:

- En atomística en donde se necesitan sistemas y elementos de alta fiabilidad, ya que una vez que un reactor nuclear empieza a funcionar, la radioactividad impide el acceso a lugares internos, circunstancia que obliga a tomar grandes precauciones para evitar las averías que podrían costar millones de dólares.
- En astronáutica al ir a reparar un satélite artificial o una sonda espacial. De ahí que, en una ocasión de un lote de mil transistores destinados a un satélite, solamente se hayan

Desde hace tiempo se ha tratado de que los productos tengan una larga vida productiva, y que la cantidad de fallas sean lo mínimo posible. A medida que los productos se hacen más complejos, los problemas de fallas se incrementan también. De ahí, que haya surgido la **Ingeniería en Fiabilidad o Teoría de la Confiabilidad** como una herramienta.

En 1952 en los Estados Unidos fué formado un grupo consultivo de equipo electrónico (Advisory Group on Reliability of Electronic Equipment (AGREE)) bajo la dependencia de la Secretaría de Defensa para "monitorear y estimular el interés en cuestiones de fiabilidad y recomendar medidas de corrección las cuales resultarían en un equipo electrónico más fiable". En 1957, AGREE definió la fiabilidad como sigue: "**La fiabilidad es la probabilidad de realizar, sin fallas, una función específica bajo condiciones dadas para un período de tiempo especificado**". En este sentido, la fiabilidad no es la prueba del producto, sino más bien cómo operará, en las manos del consumidor.

Otras definiciones sobre fiabilidad son:

- La probabilidad de que un artículo o producto (equipo electrónico) realice una función determinada, en un período determinado, en condiciones determinadas.
- El grado de confianza que puede concederse a un elemento, ateniéndose a la calidad de los materiales empleados, de la perfección con que ha sido elaborado, y la multiplicidad de controles y pruebas a las que fué sometido. Y cuando un elemento satisface todas estas condiciones, se puede tener la seguridad absoluta de su funcionamiento, aunque, puede haber imponderables que hagan fallar estas previsiones.

La fiabilidad tiende a imponerse en muchos campos de la industria entre los que se cuentan: la aeronáutica, la militar, los cables submarinos, los dispositivos automáticos, la electrónica, etc., y tan solo una pequeña falla en estos modernos sistemas puede dar lugar a grandes pérdidas técnicas y económicas, y en algunos casos puede provocar efectos catastróficos. Por ejemplo:

- En atomística en donde se necesitan sistemas y elementos de alta fiabilidad, ya que una vez que un reactor nuclear empieza a funcionar, la radioactividad impide el acceso a lugares internos, circunstancia que obliga a tomar grandes precauciones para evitar las averías que podrían costar millones de dólares.
- En astronáutica al ir a reparar un satélite artificial o una sonda espacial. De ahí que, en una ocasión de un lote de mil transistores destinados a un satélite, solamente se hayan

escogido 6, aún cuando el fabricante los había seleccionado mediante una serie de controles rigurosos.

- En el campo militar la fiabilidad de los equipos electrónicos tiene un alto orden de prioridad (en el uso de misiles y de dispositivos militares). Sin embargo la falla de un elemento con valor de 5 dólares provocó, en los Estados Unidos, el fracaso del lanzamiento de un satélite con un valor de aproximadamente 8 millones de dólares.
- La falla de un relé de protección en un sistema de energía eléctrica en el noreste de los Estados Unidos provocó la interrupción del suministro de energía en una serie de estados y dió como resultado pérdidas por más de 500 millones de dólares.
- Las computadoras, juegan un papel muy importante en cualquier industria y son tan caras como complejas. Una computadora que no esté operando por unos días no solamente da inconvenientes, sino también significa pérdidas de dinero.

Los sistemas más modernos se caracterizan por trabajar en una amplia gama de temperaturas (de -70° a $+70^{\circ}$ C), de existencia de vacío, de alta humedad (del 98 al 100%), de vibraciones de gran amplitud, de espectros de altas frecuencias, así como de la alta radiación solar y cósmica. Todas estas condiciones juntas dan como lugar a que las probabilidades de aparición de fallas aumenten de 25 a 100, e incluso de 500 a 1,000 veces en comparación con la probabilidad de fallas al trabajar con sistemas técnicos en condiciones de laboratorio.

En los últimos 20 ó 30 años el problema de la fiabilidad o seguridad de los sistemas y de sus componentes electrónicos se ha incrementado notoriamente.

- Los aviones de bombardeo (tipos B-17 y B-29) tenían en el año 1945 un promedio de 2,000 elementos, en 1960 (el tipo B-58) 95,000 y en 1965 (el tipo B-70) 150,000 elementos.
- El sistema de mando de los cohetes balísticos intercontinentales "Atlas" contiene cerca de 300,000 elementos, mientras que el sistema de mando del cohete "Nike" tiene más de 1.5 millones de elementos.
- El microprocesador 8086 (1978) contenía 29,000 transistores; el 80286 (1982) tenía 134,000; el 80386 (1985) duplicó la cantidad de transistores a 275,000; el 80486 (1989) tenía 1,200,000; el 80486SL (1992) se elevó a 1,400,000 y el Pentium (1993) contiene 3,210,000 transistores.

Para poder comprender la **Teoría de la Fiabilidad** se deben tener conocimientos en Probabilidad y Estadística, Cálculo Diferencial e Integral, Transformada de Laplace y

Control de Calidad. Tanto el **Control Total de Calidad** como la **Teoría de la Fiabilidad** están estrechamente ligados. La diferencia entre estos dos temas es:

1) Los procedimientos del **Control Total de Calidad** fueron desarrollados para llevar a cabo juicios entre medidas y características. Las medidas pueden estar relacionadas con características físicas como la distancia entre componentes en una misma tarjeta o entre las ranuras de expansión para los simm's de memoria, la resistencia eléctrica, etc. Este tipo de datos están disponibles inmediatamente y se prestan bien para hacer gráficas de Control de Barras. Por otra parte, el análisis por atributos, debe preocuparse de si un artículo posee o no algunas características descritas como el tamaño (medida) o el grado de perfección (aceptable contra producto defectuoso).

2) La **Fiabilidad** es un subconjunto del Control Total de Calidad. Aquí algunas características estudiadas no son mediciones dimensionales disponibles inmediatamente, como la duración de vida (funcionamiento) de un artículo debido a los periodos demasiados grandes para reunir los datos de duración, datos que son generalmente mucho más caros de obtener que una simple medición.

Por lo tanto la principal función del **Control Total de Calidad** es la de tratar con nuevos productos bajo inspección, mientras que la **Fiabilidad** trata con productos en servicio.

II. EL PROBLEMA DE LA FIABILIDAD.

Como se mencionó anteriormente, en el campo de la electrónica, ha habido una tendencia por la complejidad, y como consecuencia de esto, los porcentajes de fiabilidad son más difíciles de alcanzar.

Esta alta demanda de fiabilidad en el diseño de componentes y circuitos, asegura que el alto porcentaje de fiabilidad sea mantenido por largos períodos de tiempo, sin ningún tipo de servicio por parte de técnicos altamente especializados.

2.1 PRINCIPALES CAUSAS DE LA INESTABILIDAD

Las principales fuentes de inestabilidad son:

- 1) Complejidad en las unidades, sistemas y dispositivos principales. Aquí hay una baja fiabilidad en los componentes y un incremento en las fallas (técnicas y operacionales).
- 2) Requerimientos de mantenimiento. Los cuales son frecuentes y excesivos en los equipos, debido a un mal reconocimiento en la localización y en la reparación de fallas después de haberlas encontrado.
- 3) Servicio de medio ambiente (descargas eléctricas, vibraciones, medio ambiente de servicio, variaciones de temperatura y humedad). Es obvio que al usar un medio ambiente controlado, la fiabilidad del equipo se incrementa. Esto fué demostrado en la Gran Bretaña, donde se encontró que el 80% del total de fallas desarrolladas en ciertos equipos de control no sellados, se debió por la alta humedad y el calor, y el otro 20% fué provocado por descargas eléctricas y vibraciones.
- 4) El uso de componentes no estándar que no han sido probados y aprobados por los servicios de especificaciones.

2.2 ASEGURAMIENTO DE LA FIABILIDAD

El problema de la fiabilidad está vinculada en todas las etapas del producto y del período de su funcionamiento.

La fiabilidad de un artículo se prevé durante su cálculo y diseño y se asegura en su producción mediante la adecuada tecnología para su elaboración, en el control de calidad de los materiales, en los productos semiacabados y terminados, en los controles de regímenes y en su utilización (tabla 2.1).

TABLA 2.1 Etapas de análisis y predicción de la fiabilidad

	1	2	3	4	5
	Al comienzo del diseño	Durante el diseño detallado	En el diseño final	A partir de los ensayos del sistema	A partir de la utilización del usuario
Base	<p>Predicción basada parte en cálculos aproximados y parte en tasas de falla de piezas utilizadas en productos anteriores; poco conocimiento de los niveles de esfuerzo, redundancia, etc.</p>	<p>Predicción basada en la cantidad y tipo de piezas, redundancias, niveles de esfuerzo, etc.</p>	<p>Predicción basada en tipos y proporción de fallas para las distintas piezas según los niveles esperados de esfuerzo, redundancias, ambientes externos, técnicas especiales de mantenimiento, efectos especiales por la complejidad del sistema, efectos de reciclado, etc.</p>	<p>Medición basada en los resultados de ensayos del sistema completo. Se calculan índices aproximados de fiabilidad a partir de la cantidad de fallas y del funcionamiento</p>	<p>Igual que en la etapa 4, pero basando los cálculos en datos obtenidos de la utilización del usuario</p>
Principales objetivos	<p>a. Evaluar la posibilidad de cumplir un requisito numérico propuesto</p> <p>b. Ayudar a establecer un objetivo de fiabilidad para el diseño</p>	<p>a. Evaluar la fiabilidad global</p> <p>b. Definir las áreas con problemas</p>	<p>a. Evaluar la fiabilidad global</p> <p>b. Definir las áreas con problemas</p>	<p>a. Evaluar la fiabilidad global</p> <p>b. Definir las áreas con problemas</p>	<p>a. Medir la fiabilidad alcanzada</p> <p>b. Definir las áreas con problemas</p> <p>c. Obtener datos para futuros diseños</p>

1) Al diseñar un artículo deben tenerse en cuenta los siguientes factores.

- 1) La calidad de los componentes o elementos a utilizar. La elección de los componentes debe realizarse teniendo en cuenta las condiciones de trabajo del artículo (climáticas y de producción) y deben satisfacer los requisitos según sus propiedades funcionales y sus características, poseer las resistencias mecánicas y térmicas, la rigidez dieléctrica, la precisión exigida y las condiciones necesarias para su explotación. Esto también es muy importante para aquellos artículos que cumplen funciones claves dentro de un sistema.

En la elaboración de artículos o sistemas complejos, se ha demostrado que al utilizar componentes unificados, la fiabilidad se incrementa sustancialmente.

Actualmente se usa la construcción en módulos-bloques para circuitos. Los sistemas, subsistemas y demás elementos deben ser definidos con precisión (en un diagrama de bloques funcionales), para mostrar su interrelación y conexión con otros sistemas (señales de entrada y salida, fuentes de alimentación, dimensiones exteriores, etc.). Para un sistema grande puede ser necesario preparar un diagrama de bloques para cada uno de los distintos niveles de composición del producto (figura 2.1).

- 2) La elección incorrecta de los regímenes de funcionamiento generalmente se debe al desconocimiento de las propiedades de los elementos, de sus características, de la acción de los distintos factores físicos (internos y externos) y del ciclo de trabajo. No hay que permitir regímenes más estrictos que los indicados en la documentación técnica oficial de componentes y aparatos elegidos al construir o diseñar un artículo.

Ésta detallada elaboración hace posible la realización de un análisis que no solo proporciona información sobre los ajustes que hay que hacer en los datos de entrada, sino que permiten descubrir puntos débiles o áreas cuestionables en el diseño.

- 3) Trazar un diagrama de bloques de fiabilidad. Este es similar al de bloques funcionales, pero aquí se destacan aquellos aspectos que puedan influir en la fiabilidad. Esto es una condición importante para el mantenimiento de la fiabilidad durante su funcionamiento. Esta forma de construcción en módulo-bloques (en conjunto) permite sustituir fácilmente elementos individuales, conservando la capacidad de trabajo general del artículo o sistema. El fácil acceso

a los aparatos, unidades y componentes, asegura una rápida restitución al trabajo después de haber aparecido la falla (figura 2.2).

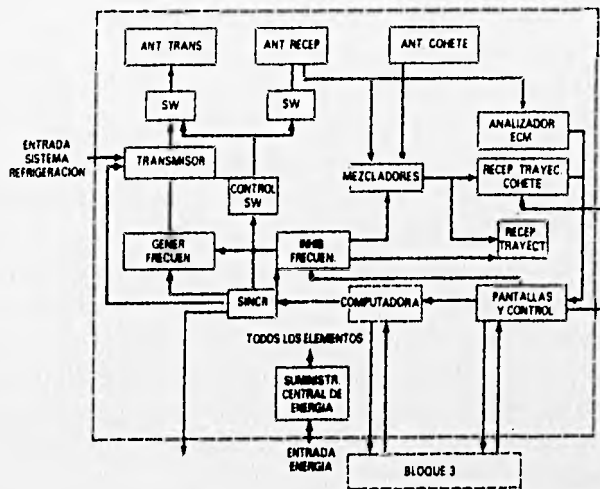


Figura 2.1 Diagrama de bloque funcional.

- 4) Determinar las adecuadas relaciones de fiabilidad entre los distintos módulos del producto o dispositivos de protección, para no provocar un estado de avería en toda la instalación. Si esto no se logra, será necesario incluir elementos que permitan evitar el desarrollo de una situación de avería.
- II) Durante la producción de un artículo, debe observarse una serie de condiciones, vinculadas con el mantenimiento y los procesos de elaboración.
- 1) El debido control de calidad (propiedades fisicoquímicas, características y parámetros de los materiales) y de los artículos complementarios (productos semiacabados, componentes de circuitos, etc.) recibidos de otras empresas.
 - 2) La inadmisión de materiales o sustitución de artículos complementarios de baja calidad.
 - 3) El cuidado y limpieza en la instalación, así como cumplir las normas sanitarias necesarias para poder trabajar.

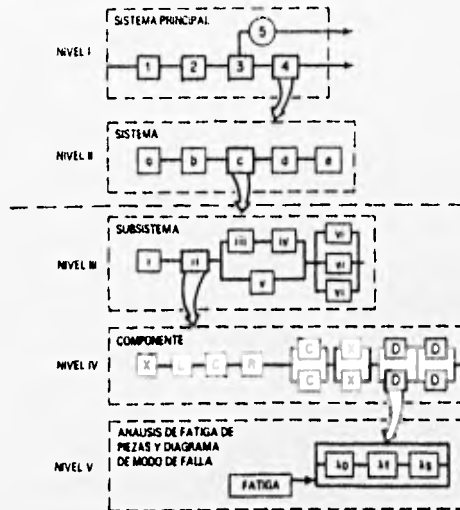


Figura 2.2 Diagrama de bloque de fiabilidad.

- 4) La prohibición en la alteración de los regímenes en los procesos de ensamblaje y de las reglas del montaje eléctrico.
- 5) El debido control de operaciones y la verificación periódica de la calidad y la fiabilidad del producto terminado.

III) Los principales factores que influyen en la fiabilidad de los artículos durante su uso son:

- 1) Las condiciones climatológicas (las diferentes temperaturas durante el día, la alta humedad, la niebla, la lluvia, etc.) y el medio ambiente (impurezas en el aire que despiden las fábricas metalúrgicas y químicas) ejercen una gran influencia en la fiabilidad de los aparatos. También la ubicación de los aparatos cerca de grandes equipos y fuentes de potencia que provocan oscilaciones mecánicas y acústicas. Esto da lugar al envejecimiento acelerado de los materiales y de la aparición de fallas. Si los artículos se instalan en automóviles, trenes, barcos, aviones, cohetes, etc., la acción de los factores climáticos se combina con el efecto de las vibraciones y aceleraciones.

- 2) El mantenimiento tiene una gran importancia para conservar la fiabilidad en los aparatos. El exámen y el control preventivo periódico, la limpieza, la reparación y la sustitución de piezas y elementos desgastados, permiten evitar las fallas y prolongan la vida útil del artículo.
- 3) La calificación y la responsabilidad del personal de servicio, tiene un gran valor para asegurar la fiabilidad, la duración y la efectividad de trabajo del artículo. La fiabilidad de un mismo tipo de aparato se diferenciará sensiblemente si el personal de servicio no tiene igual preparación, o bien tienen distinto grado de responsabilidad por el buen estado de dichos aparatos y el cumplimiento de la funciones prefijadas por él. La experiencia demuestra que el cambio frecuente del personal disminuye la responsabilidad y, por otro lado, obstaculiza el completo dominio de los aparatos.

Un estudio sobre las causas de como las fallas y defectos en los equipos electrónicos aparecen, demuestra que aproximadamente entre el 40 al 45% de la cantidad total de fallas provienen por errores cometidos al momento de diseñar, un 20% por errores cometidos en la producción, otro 30% por las condiciones de explotación y regímenes incorrectos en la utilización o por el servicio incorrecto y cerca del 5 al 7% por el desgaste natural o envejecimiento.

2.3 MEDICIÓN DE LA ELEVACIÓN DE LA FIABILIDAD

Un aumento considerable en la fiabilidad de los artículos, se puede lograr mediante una serie de medidas de perfeccionamiento en los métodos de diseño, producción y utilización de los artículos.

En la parte del diseño es necesario:

- Conocer el funcionamiento del artículo.
- Comprender como se originan las fallas.
- Utilizar materiales, productos semiacabados, elementos complementarios (de alta calidad) y estimular la elaboración de nuevos materiales.
- Tener todos los datos necesarios sobre las propiedades, características y parámetros de los materiales, productos semiacabados y elementos complementarios a fin de elegir correctamente sus regímenes y condiciones de utilización.

- Crear nuevos circuitos de bloque, aparatos y sistemas de alta fiabilidad teniendo en cuenta los regímenes y las condiciones de trabajo.
- Crear construcciones seguras de los artículos teniendo en cuenta las condiciones de utilización, el lugar de instalación en el sistema y la organización del servicio.
- Utilizar ampliamente componentes y unidades unificadas de alta calidad.
- Emplear los principios de construcción en módulo-bloques.
- Realizar el análisis y el cálculo de la fiabilidad con respecto a las fallas en los circuitos, elementos y dispositivos fundamentales en todo el artículo.

En la parte de la producción es necesario:

- Un estricto control de la calidad en la entrada de los materiales, productos semiacabados y artículos complementarios.
- El uso de instalaciones y métodos tecnológicos modernos.
- El aseguramiento de la limpieza extrema y el confort en los locales de producción, el estricto control de las operaciones tecnológicas y de funcionamiento en la instalación.
- El control de calidad del artículo que se elabora después de cada etapa de producción.
- El control de calidad en las propiedades, características y parámetros de todo el artículo después de su producción.
- La utilización de métodos modernos de empaquetamiento para el almacenaje y el transporte del artículo.

En la parte de la explotación es necesario:

- Utilizar instrucciones y métodos de explotación minuciosamente elaborados y fundamentados, así como la reparación del artículo.
- Emplear un solo personal de servicio especializado, completamente instruido (después de un período de práctica y rendir los exámenes) para el servicio de un cierto artículo.
- Establecer correctamente los derechos, obligaciones y responsabilidades del personal de servicio, así como los del usuario.
- Organizar en las instalaciones la reunión de los datos estadísticos completos y fidedignos sobre las fallas y paradas de los artículos.
- Analizar periódicamente los datos y elaborar las recomendaciones necesarias para mejorar la explotación y perfeccionar la construcción y la tecnología de elaboración de los artículos.
- Para los nuevos artículos en fase experimental, se tienen que conocer las condiciones de instalación o establecimiento, con la participación de los diseñadores y productores.

2.4 LA IMPORTANCIA DE ACUMULAR LOS DATOS DE FALLA

Los datos que se necesitan, son los correspondientes a fallas catastróficas y a las variaciones de tolerancias con respecto al tiempo en condiciones conocidas de entorno (medio ambiente) y de funcionamiento. La obtención de estos datos es un importante problema para el diseñador, ya que no hay ningún banco de datos sobre fiabilidad, comparable con los manuales que hay sobre las propiedades físicas de los materiales.

2.4.1 LA IMPORTANCIA DEL REAPROVECHAMIENTO DE LOS DATOS SOBRE FALLAS

El propósito del reaprovechamiento de los datos es proporcionar información para alcanzar una mayor fiabilidad en el equipo existente o para posteriores diseños. La fiabilidad y el mejoramiento no están necesariamente relacionados. Por ejemplo, un incremento en la fiabilidad puede ser alcanzado por un cambio en el mantenimiento o en la técnica de operación sin mejorar el equipo; por otro lado, el equipo puede ser mejorado en el desempeño sin incrementar la fiabilidad.

Para obtener resultados, el sistema de realimentación debe proporcionar un conjunto y un reporte de la información, análisis y presentación de los datos para que puedan ser entendidos y uno pueda tomar alguna acción. Las predicciones no sólo indican la fiabilidad que se espera que tenga el producto, sino que también señalan las áreas débiles para su mejoramiento.

La acumulación de datos nos sirven para:

- 1) Detectar los actuales problemas de la fiabilidad y ayudar a solucionarlos.
- 2) Proporcionar a los directivos información cuantitativa sobre el rendimiento del producto y sobre la situación de los problemas.
- 3) Ayudar a la preparación de los programas de mejora de fiabilidad.
- 4) Reunir una historia de las fallas y otros datos de referencia, al realizar cambios en el producto y para productos posteriores.

2.4.2 FUENTES PARA EL REAPROVECHAMIENTO DE LOS DATOS

El reaprovechamiento de datos no debería estar restringido solo para los servicios individuales u organizaciones, laboratorios o fabricantes de componentes de partes y de equipos, ya que todos pueden beneficiarse con el programa de reaprovechamiento. Por

ejemplo los ingenieros pueden aprender mucho de lo que ha sucedido en el pasado, y como evitarlo en el futuro.

Los reportes, las pruebas de laboratorio en el diseño y desarrollo de partes, son fuentes de reaprovechamiento de datos que acumulan información sobre el comportamiento de los productos. El reporte de campo es importante por que es una de las fuentes de las cuales un flujo continuo de información es obtenido bajo condiciones de operación, y permite a los encargados en servicio o diseño dar a conocer a los fabricantes los méritos de sus productos. Por el contrario, el diseñador o staff de apoyo técnico, debe elaborar un banco de datos o utilizar buenos datos de fiabilidad obtenidos de las siguientes fuentes:

- Estudio de rendimiento en servicios, realizados en condiciones controladas.
- Ensayo de vida de las especificaciones.
- Datos de los fabricantes de componentes o de las asociaciones industriales.
- Ensayos de especificación y calificación realizadas por consumidores.
- Banco de datos de organismos de gobierno.

2.5 RESUMEN DE LAS NECESIDADES DE LA FIABILIDAD

La inestabilidad de alguna forma cuesta dinero. La complejidad en los circuitos continuamente se está incrementando para mejorar el desarrollo funcional de los sistemas. Esto generalmente, requiere de más componentes, los cuales deben proporcionar una mayor estabilidad en las características eléctricas para mantener el mejoramiento del desempeño del sistema. La era de los satélites y vehículos espaciales requieren de equipos de electrónica que tengan una fiabilidad de un orden muy alto, por lo tanto, la fiabilidad debe ser estudiada por todos los que se preocupan por el diseño, desarrollo, producción de instrumentos y equipos en electrónica, lo cual se verá reflejado en un importante incremento económico (tabla 2.2).

Tipo de ensayo	Objetivo
De rendimiento	Determinar la aptitud del producto para alcanzar los requisitos de rendimiento básicos
Ambiental	Evaluar la aptitud del producto para funcionar en unos niveles ambientales dados; determinar el ambiente interno generado por el funcionamiento del producto; verificar los niveles ambientales especificados
De esfuerzos	Determinar los niveles de esfuerzo que el producto puede realizar a fin de poder establecer los márgenes de seguridad del diseño; determinar los modos de falla no asociados con el tiempo
De fiabilidad	Determinar la fiabilidad del producto y compararla con las exigencias; actuar sobre las tendencias
De mantenibilidad	Determinar el tiempo necesario para realizar las reparaciones y compararlo con las exigencias
De vida	Determinar el tiempo hasta el desgaste del producto y los modos de falla asociados con el tiempo o con los ciclos de funcionamiento
De funcionamiento piloto	Determinar si los procesos de fabricación y montaje son capaces de cumplir con las exigencias del diseño; determinar si la fiabilidad puede deteriorarse

Tabla 2.2 Resumen de los ensayos utilizados para evaluar un diseño

III. RAZONES POR LAS QUE FALLAN LOS EQUIPOS ELECTRÓNICOS.

3.1 CRITERIO DE FALLAS

En un campo tan amplio como la electrónica, es importante obtener un cuadro preliminar de las causas por las que fallan los equipos y de su inestabilidad.

Hay muchas dificultades en el análisis de fallas en los equipos, particularmente los que están en servicio. Algunos análisis requieren tres cosas a saber:

- El número total de equipos y de componentes en cada equipo.
- El tiempo de operación, y
- El medio ambiente en el cual los equipos serán usados o probados.

Como todos los equipos pueden ser probados en las mismas condiciones de prueba, no es posible presentar datos precisos. La dificultad de obtener análisis precisos, se debe a muchos factores (los datos del fabricante, los componentes usados en el equipo, los cuales pueden algunas veces ser de muchos años atrás; los parámetros del circuito, los cuales pueden estar en condiciones inestables debido al pobre diseño, sobrecarga de los componentes, falla o mala calidad en el mantenimiento, etc.). Reconocido esto, la única forma de enfrentar el problema es a través de la experiencia y de los datos en ciertos equipos bajo ciertas condiciones.

3.1.1 FALLAS ALEATORIAS

Son aquellas fallas, las cuales ocurren dentro del período operacional después de que se han hecho todos los esfuerzos para eliminar los defectos de diseño y de componentes que no están en buen estado. Un ejemplo de falla aleatoria, es la operación de una resistencia después de operar cientos de horas.

3.1.2 FALLAS SECUNDARIAS

Cuando los componentes dejan de funcionar como resultado directo de que ocurrió una falla en alguna parte contigua, estas fallas secundarias son clasificadas como dependientes.

3.1.3 FALLAS POR DESGASTE

Son aquellas que pueden ser evitadas por mantenimiento preventivo. Ejemplos de componentes y partes las cuales caen dentro de esta categoría durante la vida útil del equipo son: fuentes de poder, transformadores, capacitores, motores a pasos, etc.. La información obtenida de los datos de falla y de las pruebas generalmente indicarán el desgaste en algunos componentes y partes, y como resultado, las fallas pueden ser anticipadas.

3.1.4 DEFECTOS INICIALES

En algunos componentes y partes hay defectos, las cuales resultan en fallas muy tempranas. Estas pueden ser, algunas veces eliminadas durante la inspección o al finalizar la prueba de un producto, pero en su mayor parte pueden ser detectadas durante las primeras horas de operación del equipo. Como las partes defectuosas son reemplazadas por otras en mejor estado, la población total de defectos iniciales se decrementa exponencialmente.

3.1.5 DEFECTOS NO OPERACIONALES

Este incluye defectos en componentes o partes los cuales son reemplazados, pero que dichos defectos no afectan drásticamente la operación actual del sistema. Ejemplos que incluyen controles manuales como un potenciómetro, pero el sistema sigue todavía funcionando.

3.1.6 RESPONSABILIDAD DE LA INGENIERÍA

La falta de buenos ingenieros en el desarrollo y en la etapa del diseño de prototipos es la principal razón de la falla de equipos. Esto fué encontrado en el laboratorio de electrónica de la Naval de los Estados Unidos. Un análisis de la falla está dada en la tabla 3.1.

Una segunda falla en la ingeniería, es el uso incorrecto y mala aplicación de los componentes. Así, un gran número de fallas ocurren relativamente en un número pequeño de aplicaciones, esto significa que un componente en específico por si mismo no puede fallar, sino por el mal uso.

Otra inspección fué realizada por Bell Telephone Laboratories, quien determinó las causas específicas de falla en los componentes electrónicos usados en el equipo militar. Los resultados se ven en la tabla 3.2.

	Total de fallas %
Ingeniería Errores, omisión, negligencia, malos juicios en la ingeniería de diseño.	40
Componentes componentes usados de acuerdo con las especificaciones de fabricación, las cuales vienen con defectos.	30
Instalación, Operación y Mantenimiento Equipo manejado inadecuadamente o incorrectamente.	20
Fabricación Equipo no construido, probado o inspeccionado de acuerdo con las propias especificaciones.	10
	100 %

Tabla 3.1. Relación de las diferentes causas por las que el equipo falla

3.1.7 COMPLEJIDAD Y FALLAS EN LOS COMPONENTES

La constante tendencia por la complejidad debido a las demandas militares por una mayor precisión, se ve reflejado en el número de componentes requeridos para construir el equipo, provocando una reducción en la fiabilidad.

3.1.8 DEFECTOS DE TRABAJO

Esto resulta del incorrecto ensamble de partes electrónicas, alambrado, mecanismos, etc., que vienen mal de la fábrica. Las buenas técnicas de fabricación, han demostrado la capacidad de reducir tales fallas al mínimo, con pruebas oportunas e inspecciones, por lo que son omitidas de las predicciones de fiabilidad.

Estos artículos incluyen riesgo de daño provocado por el personal durante las pruebas. soldadura derramada, cables al descubierto, etc..

	Total de fallas %
Ingeniería	43
Consideraciones eléctricas:	
- Circuitos y componentes deficientes	11
- Diseño inadecuado en los componentes	10
- Mal uso de los circuitos	12
Consideraciones mecánicas:	
- Materiales inapropiados	5
- Partes no satisfactorias	5
Operación	30
Condiciones anormales o accidentales.	12
Manipulación	10
Mantenimiento defectuosos	8
Fabricación	20
Trabajo defectuoso, más la inspección inadecuada y los controles de proceso	18
Materia prima defectuosa	2
Otros	7
Desgaste o vejez	4
Causas no determinadas	3
	100 %

Tabla 3.2 Análisis de las causas de falla en los componentes electrónicos

**IV. FALLAS EN LOS EQUIPOS
ELECTRÓNICOS Y SUS COMPONENTES.**

4.1 FALLAS TÍPICAS EN LOS EQUIPOS

4.1.1 FALLAS EN LOS EQUIPOS

Las fallas que ocurren en algunos equipos electrónicos, pueden ser divididos en tres clases generales:

- 1) Fallas debido a la pobre fabricación o al uso de componentes y materiales inapropiados.
- 2) Fallas debido al mal diseño.
- 3) Fallas fundamentales, en donde la investigación es necesaria.

Las fallas de la clase 1, teóricamente, deberían ocurrir rara vez. Desafortunadamente, la economía juega un papel muy importante en ésta clase de fallas, en donde los equipos tienen que ser construidos a bajo precio debido a la alta competitividad entre las industrias.

Las fallas de la segunda clase dependen de la habilidad del diseñador del equipo. Es importante que el diseñador esté informado sobre las fallas, que seguramente ocurrirán, para que estas no se repitan en diseños posteriores.

La tercera clase representa un problema el cual es más difícil de resolver. La investigación es necesaria, por ejemplo, para quitar la generación de pulsos no deseados en los capacitores, producir seguridad y estabilidad en las resistencias de valores muy altos, desarrollar nuevos componentes que cumplan las demandas más exigentes para los nuevos productos, etc..

4.1.2 FALLAS DEBIDO AL DISEÑO MECÁNICO

Las pruebas de vibración son útiles porque nos revelan los puntos débiles en un diseño. La importancia de detectar la resonancia mecánica en los equipos puede no estar en la sobrecarga, sino, tal vez, en el chasis, en las tarjetas, en los subensambles o en los métodos de montar componentes. Este último, provoca el mayor número de problemas, como cables rotos.

Otro aspecto de los diseños mecánicos en los equipos, es el del sellado. Numerosas pruebas han mostrado que los equipos herméticamente sellados son más seguros que los equipos que no lo están. Es obvio que los que están herméticamente sellados prevendrán daños provocados por la penetración de polvo o deterioración por la humedad, y por lo tanto, se espera que la fiabilidad de los componentes mejore. Pero por otra parte, la

disipación de calor en un espacio sellado llega a ser un problema, y hacer componentes resistentes al calor no es nada fácil.

4.2 FALLAS TÍPICAS EN LOS COMPONENTES

4.2.1 RESISTENCIAS CON COMPOSICIÓN DE CARBONO

Estos son los componentes más usados en los equipos electrónicos, y las fallas son comparativamente pocas. La razón de falla es de una por cada mil al año cuando se usa bajo condiciones de laboratorio. Tales fallas consisten principalmente al incrementarse el valor de la resistencia, probablemente debido al movimiento del carbón bajo la influencia del calor o por cargas de voltaje, y en algunos casos, por circuitos abiertos, debido a la conexión de cables que no fueron firmemente fijados, o alambres mal puestos al momento de soldarse.

El elevado ruido eléctrico, es debido generalmente a la mala conexión entre los elementos de la resistencia y el cable.

4.2.2 RESISTENCIAS DE ALAMBRE

La falla normalmente más encontrada en este tipo de resistencias es el de circuito abierto. Como el alambre usado es muy fino para los valores altos de resistencia, se debe tener gran cuidado en la fabricación, particularmente al terminar en el enrollamiento. Las fallas pueden ser provocadas por una soldadura de mala calidad o por la acción electrolítica en presencia de la humedad cuando lleva corriente directa, con la consecuente corrosión y rompimiento del alambre.

4.2.3 RESISTENCIAS VARIABLES DE PROPÓSITO GENERAL

En este tipo de resistencias la falla más común es el ruido o los falsos contactos, que ocurren principalmente en donde las resistencias son usadas como control de ganancia en los monitores o CD-ROM's (brillo, volumen, etc.). Esto es por partículas de polvo o grasa entre las laminillas conductoras y las pistas, provocando un movimiento irregular y un contacto intermitente.

La falla de circuito abierto se debe a que hay una ruptura entre las pistas y el final de la conexión. En las resistencias no selladas, la corrosión en las pistas y el eje, provocan un

endurecimiento debido a la alta humedad, y considerables cambios en el valor de la resistencia pueden ocurrir como resultado de la alta humedad.

Las resistencias del tipo alambre de propósito general, de alto wattaje y de bajo valor óhmico, están por lo general libre de problemas, pero los de alto valor óhmico pueden llegar a ser ruidosos y/o no hacer buen contacto por la entrada de polvo, etc.

4.2.4 CAPACITORES FIJOS

Una de las fallas más comunes en los capacitores fijos es la deterioración de la resistencia dieléctrica provocada por la penetración de humedad debido a que no están bien selladas. Los cambios de la humedad y de temperatura provocan vapor de humedad, el cual es absorbido debido a la composición molecular de los materiales usados, o por el largo de los cables que conectan a los electrodos. Este vapor que es atrapado, permanece como humedad, y da como resultado una baja resistencia dieléctrica, provocando pérdidas, y algunas veces, la ruptura del componente.

Los capacitores de papel impregnado de bajo voltaje fallan principalmente porque ha ocurrido una fuga de corriente o un corto circuito, y como consecuencia la deterioración del impregnado. En algunos equipos, en condiciones de alta temperatura, han sido usados los capacitores de papel dieléctrico provocando la deterioración del papel, que se hace polvo, al llegar rápidamente a los 70° C. aproximadamente. Los capacitores que están quemados o con corto circuito, se debe probablemente al exceso de voltaje, ya que el dieléctrico no resiste y como consecuencia se rompe. La progresiva deterioración del impregnado también es una causa que contribuye para que estas fallas aparezcan, así como los capacitores que envejecieron durante su almacenamiento.

En los capacitores electrolíticos, las principales fallas son debido al ensamblado. Las altas pérdidas de corriente son a menudo provocadas por la despolarización durante el almacenamiento. El electrolítico, es generalmente la principal causa de falla en los capacitores de óxido de aluminio. Las altas temperaturas secan eventualmente al electrolítico provocando un factor de alta potencia y pérdidas de capacitancia. A bajas temperaturas, el electrolítico se congela y provoca un factor de alta potencia y baja capacitancia. Algunos efectos de corrosión son generalmente atribuibles al electrolítico.

4.2.5 GENERACIÓN DE RUIDO Y DE PULSOS

Los pulsos y el ruido generado en los capacitores pueden tener muchos orígenes. Ciertas fuentes de ruido han sido bien establecidas durante muchas pruebas, y es posible que estas puedan persistir bajo otras condiciones provocando pulsos no deseados. Las posibles fuentes de ruido o generación de pulsos son:

- 1) Descargas internas: Este fenómeno es debido a la ionización local bajo altas descargas cuando hay alguna obstrucción de aire o hueco. Bajo corriente directa, un pulso de corriente puede estar seguido por un período inactivo durante el cual la sobrecarga se va perdiendo hasta que se vuelve a encender. Los malos diseños o componentes mal ensamblados son otra causa de ruido.
- 2) Titilación o pulsos irregulares: Ésta es una posible fuente de generación de ruido en los artículos con capacitores de mica o de cerámica, y consisten en saltos al azar en la capacitancia y en la carga almacenada. Esto es atribuido por una mala adhesión en los materiales del dieléctrico.

Otra causa es cuando los componentes electrónicos se ven afectados por vibraciones provocadas por movimientos mecánicos, que sacuden o mueven a los circuitos, haciendo que los capacitores lleven pequeñas cantidades de corriente que no deberían ser usadas y por lo tanto provocan ruido.

- 3) El dieléctrico después de trabajar: La estimación de que ocurra una falla es baja, pero es posible que los efectos del dieléctrico después de trabajar puedan producir pulsos en forma de ruido, y desafortunadamente esto es más marcado con los buenos dieléctricos como el polietileno o el cuarzo. Los dieléctricos líquidos pueden ser usados para reducir este efecto.
- 4) La radiación: La acción de la luz o de partículas radioactivas y los rayos X en cualquier dieléctrico (polietileno, cuarzo, mica, etc.) producen ionización y ruido, especialmente en componentes de poca capacitancia.

4.2.6 CAPACITORES VARIABLES

En general, los capacitores variables tienen muy pocas fallas en comparación con los demás componentes. Estos son diseñados y ensamblados con gran cuidado, usando materiales seleccionados. Las fallas en este tipo de componentes son raras.

Las fallas de los capacitores de propósito general, tanto receptores como emisores, ocurren principalmente debido a sustancias exteriores que son atrapadas en las laminillas conductoras, provocando crujidos y ruido. El ruido también es desarrollado por la

deterioración de los resortes metálicos al mover las laminillas. Bajo condiciones normales la corrosión del material es raro, pero bajo condiciones de servicio, la corrosión puede ocurrir, particularmente si los componentes están expuestos a largos periodos de alta humedad (por ejemplo, cerca del mar).

Las fallas en los capacitores de propósito general incluyen microfallas, las cuales son debido al incorrecto centrado del eje y de las mismas laminillas conductoras. Las microfallas pueden desarrollarse si estos están fuera de posición.

4.2.7 CABLES Y ALAMBRES

Estas pueden ser consideradas bajo lo siguiente puntos:

- 1) Rotura en el interior del conductor: Puede ser que el cable presente roturas de origen o surgan al finalizar la instalación. Estas roturas pueden ser reducidas evitando todos los dobleces innecesarios.
- 2) El ingreso de humedad: El ingreso de humedad tiende a reducir la resistencia dieléctrica e incrementa la atenuación.
- 3) Fallas climáticas: Son las fallas bajo extremas condiciones climáticas (calor, frío, luz ultravioleta, prolongada calefacción), que hacen que la capa exterior de P.V.C. lleve a ser rígida, y subsecuentemente se agriete, esto mismo sucede si está a bajas temperaturas. En altas temperaturas, las partes de plástico del cable llegan a ser relativamente blandas y es entonces importante que ésta sea instalada con el menor número de dobleces. Los componentes de los rayos ultravioleta de la luz del sol pueden provocar un endurecimiento de muchos plásticos incluyendo el polietileno y el P.V.C.. Se ha encontrado que una añadidura de un 2% de polvo fino de carbono a la capa de plástico, da una buena protección al polietileno de los rayos solares.
- 4) Efecto de voltaje: La falla debido a la sobrecarga, generalmente se presenta a través de la deformación del dieléctrico, así que el propio conductor llega a ser muy excéntrico y en el peor de los casos toca la parte exterior del conductor. Debido a la alta resistividad térmica del polietileno, poliestireno y P.V.C., sus constantes de tiempo térmicos son muy largos, de modo que las cargas transitorias no son serias, sin embargo, las sobrecargas pueden provocar graves diferencias en la expansión de los conductores.

4.2.8 ENCHUFES Y CLAVIJAS

Las clavijas circulares que están selladas y que son muy usadas, son constantemente modificadas para hacer frente cada vez más a las duras condiciones de operación. Una de las fallas más comunes, es al desoldarse la uniones que están dentro de los enchufes y clavijas, debido a que estirán el cable. Otra de las fallas puede ocurrir en los contactos debido a la acumulación de suciedad, etc..

En los enchufes, el principal problemas son los contactos. Esto se puede deber porque los contactos están oxidados, sucios o no están bien alineados, incluso si no están bien polarizados, ya que protegen a los componentes de una posible descarga eléctrica de alta tensión.

4.2.9 RELEVADORES

En los relevadores de propósito general, la corrosión en los alambres finos se debe a la acción electroquímica con consecuencias de circuito abierto (falla común en la bobina). En los relevadores no sellados, los contactos pueden dar considerables problemas debido al polvo y al desgaste de los contactos contaminados por el ambiente. La limpieza es esencial, pero esto debe ser hecho por un operador hábil, de lo contrario se puede perjudicar al hacer una modificación en los metales.

En los relevadores sellados, una pequeña fuga de corriente, provocará el ingreso y condensación de humedad dentro del relevador con la consecuente corrosión y una baja resistencia eléctrica de las bobinas.

4.2.10 INTERRUPTORES O SWITCHES

En los interruptores eléctricos, las dos fallas más comunes son: la ruptura de los resortes debido al desgaste y al intermitente y pobre contacto debido a la pérdida de tensión en los resortes. La pérdida de tensión es debido generalmente al ablandamiento del resorte por el sobrecalentamiento y por el exceso de corriente en el interruptor. Una limpieza cuidadosa en contactos es necesaria, y en algunas veces, la grasa grafitada es usada para prevenir la deterioración de las superficies de los contactos.

4.2.11 TRANSFORMADORES

Un transformador, es más o menos, de diseño estandar y varia solamente con respecto al núcleo y la técnica de sellado. Un buen transformador, sólo falla durante un corto en el alambre del devanado, esto tal vez por la diferencia de uniformidades del alambre en sí, aunque esto es comparativamente raro. El ruido que provoca un transformador es debido a que las láminas están flojas o sueltas, esta falla puede ser atribuida por el pobre diseño o una deficiente técnica de fabricación.

**V. EFECTOS DE LAS CONDICIONES
AMBIENTALES EN LOS EQUIPOS DE
FIABILIDAD.**

5.1 CLIMATOLOGÍA MUNDIAL

El diseñador de equipo electrónico debe tener en cuenta los datos de su equipo para poder operar y funcionar eficientemente bajo condiciones climáticas adversas. La deterioración del equipo y las partes de los componentes varían considerablemente en diferentes partes del mundo, dependiendo de la temperatura, humedad, actividad biológica, actividad entomológica (proliferación de los insectos), y de las condiciones atmosféricas como la contaminación en el medio ambiente y la presencia de polvo transportado por el aire.

Es por lo tanto, de mucho valor que el diseñador tenga en mente los diferentes tipos de condiciones a las que puede trabajar. El problema puede ser considerado, con respecto al clima en que los equipos deben resistir, en tres partes:

- Los trópicos: en las cuales hay relativamente alta temperatura en la atmósfera llevando un alto contenido de humedad.
- Las áreas desérticas: donde las altas temperaturas varían durante el día, con una atmósfera con muy bajo contenido de humedad, y
- Las condiciones árticas: donde las bajas temperaturas son encontradas en la mayor parte del año.

5.1.1 LOS TRÓPICOS

La región ecuatorial conocida como los trópicos, es aquella parte del mundo que se encuentra entre las latitudes 23.5° norte y sur del ecuador, esto es entre los trópicos de Cáncer y de Capricornio. En esta zona la temperatura depende en gran parte de como llega la luz solar, así, las variaciones de temperatura entre las estaciones son relativamente pequeñas y generalmente varían menos entre la noche y el día. En estas regiones, la lluvia es fuerte en ciertas áreas y se extiende por muchos meses del año.

Aquí, la humedad es siempre alta (80 a 98%) dependiendo de la hora del día, con la temperatura relativamente estable sobre los 29° C (85° F).

Estas condiciones de alta temperatura y humedad estimulan la actividad biológica, que crecen en forma de moho y hongo, produciendo un medio ambiente el cual en un corto tiempo puede afectar a los equipos electrónicos que no han sido apropiadamente diseñados para esas condiciones.

5.1.2 EL DESIERTO

En las áreas desérticas, se encuentran las temperaturas que serían las más altas del mundo, con largos cambios entre el día y la noche. El efecto de una baja humedad relativa es la deshidratación. La intensa radiación solar puede provocar una rápida y excesiva degradación de algunos materiales y el polvo y la arena contribuyen a una sobredeterioración. La actividad entomológica (por ejemplo, las termitas) puede ser dañina cuando lo vemos en términos de destrucción.

5.1.3 EL ÁRTICO

Las bajas temperaturas en las capas polares provocan diferentes tipos de problemas. Aunque temperaturas debajo de los -65°C son ocasionalmente encontradas, las temperaturas en los árticos generalmente varían entre los -10°C y los -40°C . En el verano, la temperatura aumenta unos pocos grados por encima del cero y por lo tanto la humedad aumenta. Las actividades entomológicas y biológicas son casi nulas en este tipo de medio ambiente.

5.2 EFECTOS SEVEROS PROVOCADOS POR EL MEDIO AMBIENTE

5.2.1 CONDICIONES TROPICALES

En condiciones tropicales, todos los materiales orgánicos están sujetos a la deterioración, que en algunas veces es rápido. Esto es debido principalmente por la presencia de humedad, hongos y nutrientes que florecen en estas temperaturas y destruyen el equipo mecánico y principalmente el electrónico. Los metales se corroen rápidamente en presencia de condiciones similares y la acción electrolítica entre los diferentes metales es severa.

La alta radiación solar puede ser muy destructiva para los cables que están expuestos a su influencia, porque el alto porcentaje de radiación ocurre en una longitud de onda entre los 2,600 y 3,900 Å .

5.2.2 CONDICIONES EN EL DESIERTO

Las altas temperaturas son el peor factor a ser consideradas en la deterioración del equipo. En el desierto, los rayos ultravioletas son más altos que en las áreas tropicales y de este modo, la degradación es más rápida, por ejemplo, en los cables. La deshidratación debido al contenido muy bajo de humedad en la atmósfera puede provocar que el plástico se doble. Ciertos materiales perderán la resistencia a la atracción, y los materiales que incluyen papel se desintegrarán.

El ingreso de polvo y arena es inevitable bajo estas condiciones y la penetración dentro de partes móviles puede provocar serios desgastes. La cera normal usada en la fabricación de algunos componentes electrónicos se derrite a éstas temperaturas y son prácticamente inútiles.

5.2.3 CONDICIONES EN EL ÁRTICO

Una de las principales dificultades es la operación de equipo expuesto a las bajas temperaturas, digamos a -40° C. A esta temperatura el petróleo y los lubricantes endurecen a los dispositivos de rotación. Igualmente las gomas y los plásticos llegan a ser quebradizos a esta temperaturas.

5.3 EFECTOS DE LAS ALTAS TEMPERATURAS

Muchos de los termoplásticos se deforman con el calor, a temperaturas por encima de los 95° C, mientras que la deterioración del aislamiento de la celulosa es alrededor de los 100° C. La expansión en los diferentes materiales puede provocar: deformación al ensamblarse, ruptura de sellado, etc..

El origen del calor en las unidades electrónicas se debe generalmente a la baja eficiencia eléctrica y solamente un pequeño porcentaje de la potencia consumida será convertida en un útil rendimiento. El resto es transformado en una indeseable pérdida por calor, y si las unidades operan en un ambiente de alta temperatura o cerrados dentro de otros equipos calientes, el calor aumentará. Hay dos formas para eliminar la pérdida por calor.

- Mejorando la fiabilidad de los componentes y de su vida.
- Mejorando la estabilidad del circuito desarrollado.

Los efectos del calor en los componentes son generalmente uno de los siguientes:

- a) Una falla desastrosa.
- b) Una vida reducida.
- c) Cambio físico temporal, resultando en un cambio temporal en el valor.
- d) Cambio en el aspecto físico y químico. Con una exposición continua, el cambio en el valor puede llegar a ser excesivo. La deterioración continuará hasta que el componente falle antes de tiempo.

Como se sabe, las altas temperaturas aceleran todas las formas de interrupción, electrónicas y eléctricas. En general, para el desarrollo de componentes de uso en ambientes de alta temperatura, se excluyen el uso de materiales orgánicos como el papel y muchos de los plásticos y se requiere el uso de materiales inorgánicos como el vidrio o la cerámica. Ciertos plásticos, como el politetrafluoroetileno (P.T.F.E.) y materiales como silicones pueden ser usados con mucha más ventaja que los anteriores.

Las temperaturas de trabajo, máximas aproximadas, para algunos materiales aislantes, son dadas en la tabla 5.1

5.3.1 RESISTENCIAS FIJAS

Las resistencias de óxido metálico son hechas rociándolas con cloruro de estaño-antimonio en barras de vidrio a temperaturas del orden de los 600 - 700° C. Sobre el vidrio, este cloruro se hace óxido en la superficie, formando una película adherente resistente muy dura. Las temperaturas de operación de éstas resistencias (menos al final de las conexiones) pueden ser de 400° C y hasta 600° C por algunos cientos de horas.

5.3.2 RESISTENCIAS VARIABLES

La construcción de resistencias de alambre enrollado, son hechas de cerámica principalmente, pero también las hay de diferentes metales. Éstas pueden operar en exceso de 150° C, pero las resistencias compuestas de carbón no pueden exceder los 115° C, algunas son hechas usando mezclas de silicón con carbón negro para incrementar la temperatura de operación de la pista.

5.3.3 CABLES Y FORROS

Los cables hechos con vidrio trenzado e impregnados con barniz de silicón y aislamiento de P.T.F.E. pueden operar a 200^o C; los cables rígidos o no flexibles con aislamiento mineral y forro externo de cobre pueden funcionar hasta 250^o C y, para periodos cortos hasta 1.000^o C. Los de forro de silicón hasta 200^o C.

5.3.4 CAPACITORES FIJOS

Los capacitores con dieléctrico de P.T.F.E. tienen operaciones de 20.000 horas. a 200^o C, pero son caros y se han encontrado dificultades para producir delgadas películas del material para enrollar. Los capacitores con dieléctrico de vidrio también tienen una operación continua a 200^o C.

La mica como dieléctrico puede resistir a temperaturas arriba de los 400^o C aproximadamente antes que la deshidratación ocurra, pero los capacitores de mica son limitados por el material de sellado. Los capacitores de mica de lata operan aproximadamente a los 130^o C; los capacitores con dieléctrico de cerámica de alta permeabilidad no pueden, en general, operar sobre los 100^o C debido a los efectos de deterioración. Por otra parte los capacitores de cerámica de baja permeabilidad pueden operar por arriba de los 125^o C.

Los capacitores con dieléctrico de papel pueden operar por arriba de los 100^o C sin demasiada deterioración en la resistencia dieléctrica, y los capacitores de papel metálico por arriba de los 125^o C. Los capacitores electrolíticos de tantalio pueden operar a 150^o C por largos periodos de tiempo sin deterioración.

5.3.5 TRANSFORMADORES Y BOBINAS DE REACTANCIA

Es posible la operación de transformadores por arriba de los 250^o C usando alambre con cubierta de vidrio y silicón impregnado. Transformadores experimentales para operaciones por arriba de los 500^o C han sido hechos en Gran Bretaña, usando en su construcción asbesto, mica, vidrio, sílice y otras sustancias. La máxima temperatura de operación permisible de algunos materiales en los transformadores se resume en la tabla 5.2.

Temperatura Aproximada ° C	Material Aislante
45	Cera Parafinada.
50	Laca.
70	Poliestireno.
78	Plexiglas (Resina transparente, incolora y flexible que se emplea principalmente como vidrio de seguridad).
80	Ebonita.
85	P.V.C (Polivinilo de Cloruro).
90	Polielileno.
120	Betún.
130	Terylene.
140	Baquelita.
145	Aceite para Transformador.
150	Barniz de Baquelita, Vidrio Barnizado de Baquelita, Asbesto Barnizado de Baquelita, Resina Epóxica.
180	Alambre Esmaltado de Silicón.
200	Resina de Silicón, Polietileno Irradiado.
250	Gomas de Silicón, Líquido de Silicón.
260	P.T.F.E. (Politetrafluoroetileno).
450	Mycalex.
700	Vidrio
1000	Mica, Asbesto, Porcelana, Cuarzo, Alumina, Esteatita.

Tabla 5.1 Temperatura de Trabajo Máxima Aproximada de Algunos Materiales Aislantes

5.3.6 RELEVADORES

Algunos relevadores operan a temperaturas de 150 - 200° C usando aislantes, cerámica y vidrio.

5.3.7 INTERRUPTORES

Con base de cerámica pueden operar a 150° C.

Temperatura de trabajo Máx. Aprox. ° C	Material del Transformador
75	Baquelita, Ebonita, Papel, Algodón, Polietileno, Seda, P.V.C., Diferentes Ceras, Alambre Esmaltado, etc..
110	Baquelita, Papel Impregando, Algodón o Seda, Alambre Esmaltado, etc., Barniz de Baquelita, Aceite para Transformadores, Barniz de Algodón o Fibra de Vidrio, Diferentes Tipos de Resinas, etc..
150	Barniz de Baquelita, Fluidos de Silicón, etc..
200	Vidrio, Cerámica, Fluidos Fluoroquímicos, Barniz de Silicón, P.T.F.E

Tabla 5.2 Temperaturas de Trabajo Máxima Aproximados de Algunos Materiales Usados por los Transformadores.

5.3.8 CLAVIJAS Y ENCHUFES

Las clavijas y enchufes de multiformas y de propósito general con aislante de Fenol son generalmente limitadas a los 85° C, pero en recientes desarrollos con material aislante de silicón, lo han llevado a nuevos rangos los cuales operan arriba de los 200 - 250° C. Los enchufes y las clavijas de vidrio sellado son usados para operaciones de 200° C; los de cerámica de alumina sintética operan por arriba de los 300° C.

5.3.9 RECTIFICADORES DE PODER

Los rectificadores de silicón pueden operar a 180° C y son mucho más eficientes que los de tipo de selenium u óxido de cobre y son considerablemente más pequeños. Los rectificadores de dióxido de titanio pueden operar por largos períodos entre los 100 -

150° C. pero son más grandes que los rectificadores de selenio y óxido de cobre y más sensibles a la humedad.

5.4 EFECTOS DE LA HUMEDAD

El contenido de humedad en el aire es generalmente expresado en términos de porcentaje de humedad relativa y es definida como la razón en por ciento de la presión parcial de la humedad en el aire a la presión de saturación o presión de vapor de agua a la misma temperatura. El cien por ciento de humedad, significa que el aire a una temperatura dada tiene todo el vapor de agua que puede tener, si la temperatura del aire se incrementa, más vapor de agua se añadira; si la temperatura baja, algo de humedad será condensada, probablemente como lluvia.

¿Cómo afecta la humedad al equipo electrónico?. El agua es un buen conductor y puede actuar como un camino o trayectoria de baja resistividad en los circuitos electrónicos. Sí, la humedad es considerada como la cantidad de agua en el aire, es claro que muchos componentes electrónicos deben ser protegidos para altas humedades. La presencia de humedad en la superficies de los materiales aislantes reduce la resistencia de la superficie de el material. La cantidad de humedad presente en una superficie depende de la humedad relativa (R.H.). Solamente unos pocos materiales, como el poliestireno, silicones, y otros polímeros, pueden exitosamente parar la formación de una película de humedad.

Al filtrarse al interior de un material poroso, la humedad reduce el volúmen de resistividad. La razón por la cual la humedad penetra un material depende del contenido de agua alrededor de la atmósfera. Muchos de los vidrios, cerámicas vitrificadas, poliestireno, polietileno y algunos polímeros no absorben el agua fácilmente.

5.5 EFECTOS DE LAS BAJAS TEMPERATURAS

5.5.1 COMPONENTES ELECTRÓNICOS

A temperaturas del orden de los -40° C y por debajo de ésta, algunos componentes dejan de funcionar debido a los cambios físicos ocurridos dentro de estos. Los capacitores electrolíticos de aluminio llegan a ser ineficientes, y los de cristal de cuarzo frecuentemente fallan al oscilar debido a los cambios mecánicos. Las ceras y componentes protectores se endurecen y se agrietan; y los compuestos de goma o caucho

pierden su flexibilidad y también se agrietan fácilmente. En estos casos el uso de gomas de silicón es recomendado para cables que deban operar a estas temperaturas.

Las baterías almacenadas pierden potencia a bajas temperaturas, y por lo tanto deben mantenerse bien cargadas a toda hora. Las baterías de Níquel-Cadmio tienen ventajas en climas fríos en el uso de vehículos.

La principal dificultad en todos los componentes operados mecánicamente como interruptores, potenciómetros, ejes, engranes, etc., es el endurecimiento de la grasa: un lubricante no debería ser usado a menos que fuera esencial. Si esto es, entonces hay unos lubricantes especiales para bajas temperaturas que deberían ser usadas y checar el desempeño en una sala de pruebas para asegurarse que no se congelen. La diferencia de volumen en los metales es distinto y es también un factor importante. Los enchufes y las clavijas algunas veces provocan problemas debido a la contracción de los metales y el plástico, provocando un pobre contacto.

5.6 SISTEMAS DE PROTECCIÓN CONTRA CHOQUES Y VIBRACIONES

Algunos sistemas para proteger a los equipos principalmente portátiles contra la vibración y el choque, se deben componer de tres partes.

- 1) La estructura de soporte inmediata.
- 2) Aislante para vibraciones y choques.
- 3) La estructura interna de el equipo.

Cada una de estas partes debería ser diseñada correctamente, por que si alguna de estas es inadecuada, las otras dos lo compensarían. Cada una de estas tres partes sirve con un propósito distinto y además cada una le añade su influencia al sistema protector. Los aislantes para vibraciones y choques cumplen dos funciones: Una es la de aislar o atenuar la vibración; y la otra, la cual es algunas veces pasado por alto, es la de controlar o estabilizar la frecuencia resonante del equipo.

Otra parte del sistema protector es la estructura interna de los equipos electrónicos. Su propósito es el de soportar parte de los componentes como relevadores, resistencias, etc.. Esta estructura afecta al sistema de protección, a menos que esté rígido y dentro de los límites definidos, ya que algunas vibraciones no atenuadas por los aislantes serán amplificadas y provocarán daño.

Una condición adicional en la protección de vibración es la posición y arreglo de los componentes dentro del chasis.

5.7 EL EFECTO DE LA ALTITUD

Los equipos de control para radio y radar en los aviones tienen que operar a grandes altitudes. Con el incremento de las altitudes de los vuelos el problema puede llegar a acentuarse. Hay solamente dos posibles enfoques:

- 1) Sellar y ejercer presión sobre los equipos, después de que todos los componentes operen efectivamente a nivel de tierra.
- 2) Usar equipo normal abierto, pero separar todos los puntos de alto voltaje.

En el primer caso, el peso extra será llevado por el chasis y la cubierta que deben ser diseñadas para resistir las altas presiones y, además, ciertas medidas de refrigeración deben considerarse, como los componentes son conservados a cierta temperatura y secos, la fiabilidad del equipo es mejorada. En el segundo caso el principal peligro es la descarga a altas altitudes, particularmente con los puntos de alto voltaje.

La interrupción del aire como dieléctrico a altas frecuencias y voltajes, ha sido tema de muchos estudios que han contribuido al diseño de componentes para altas altitudes.

5.7.1 CAPACITORES VARIABLES

En todos los capacitores de alto voltaje, es necesario evitar la presencia de polvo y partículas de fibra. Estas partículas son depositadas entre las láminas por la acción electrostática y pueden provocar interrupciones prematuras.

5.7.2 CAPACITORES FIJOS

En ciertos tipos de capacitores electrostáticos, es posible que el electrolítico escape del sellado a baja presión, el cual puede corroer otros componentes. Esto depende enteramente del método de sellado, y las pruebas deberían asegurar de no dejar salir el electrolítico.

5.8 EFECTOS DE LA RADIACIÓN NUCLEAR

Los efectos de la radiación nuclear no son nuevos. como fuentes tenemos al uranio y otros materiales radioactivos en la tierra, así como los rayos cósmicos que provienen del espacio.

En los Estados Unidos por la década de los 50's expusieron algunos componentes a la radiación a través de plantas nucleares. En estas pruebas los componentes fueron irradiados hasta que fallaron. De lo cual se desprendió:

- Los conductores metálicos generalmente tienen una buena tolerancia a la radiación.
- Los alambres y los cables cubiertos son afectados y la resistencia aisladora de los cables cubiertos de polietileno puede bajar considerablemente.
- Las resistencias de carbón no son muy afectadas pero bajo ciertas condiciones la resistencia puede decrecer aproximadamente de un 10 - 15%.
- Las resistencias de alambre enrolladas tienen una tolerancia a la radiación; solamente un insignificante incremento gradual en la resistencia puede ocurrir durante la irradiación.
- Los capacitores de mica, cerámica, y vidrio se salvan, al parecer, razonablemente de la radiación.
- Los capacitores de papel impregnado de aceite son seriamente afectados. la capacitancia y el factor de potencia cambian considerablemente durante la irradiación. Esto indica que la irradiación provoca el desprendimiento de un gas el cual expande las láminas del capacitor y puede distorsionar y quebrar las unidades herméticamente selladas. La capacitancia decrece debido a la distancia entre las láminas.
- Los capacitores de aluminio y tantalio pueden ser afectados.

Otra clase de componentes sensibles a la radiación es la celda fotoeléctrica. La radiación, particularmente la radiación gamma, tiene casi las mismas propiedades y efectos en algunos materiales que la luz, por lo tanto, una fotocelda puede indicar la presencia de luz donde ésta no exista. Materiales semiconductores como el germanio y el silicio, son también sensibles a la radiación. Los tubos de rayos catódicos también entran en esta categoría, ya que contienen fósforo (semiconductor). En términos generales, los materiales orgánicos sufren más daño que los materiales inorgánicos. Las radiaciones gamma producen en su mayor parte cambios en la superficie y los efectos son impredecibles.

5.9 EFECTOS POR EL ALMACENAMIENTO

En los E.U. y en Inglaterra, considerables esfuerzos han sido dados para valorar las razones de fallas debido a las pobres condiciones de almacenamiento. Algunos componentes electrónicos, con una vida corta (12 meses) pierden sus propiedades. Por ejemplo, los capacitores electrolíticos y los rectificadores de silicio.

5.10 PRUEBA DE LOS SEMICONDUCTORES BAJO TENSIONES AMBIENTALES

Los dispositivos semiconductores pueden funcionar perfectamente bajo óptimas condiciones (temperaturas ambientales, presiones de aire a nivel del mar y humedad relativamente baja), pero fallan cuando operan en un medio ambiente hostil, y que se pueden presentar con combinaciones de cambio físico, químicos y eléctricos. En el medio ambiente hostil, físicamente están expuestos a temperatura, presión de aire, aceleración, humedad y radiación extrema. En el químico están las exposiciones a fluidos biológicos, atmósferas perjudiciales, suciedad, sprays de sal, gases y fluidos químicamente activos. En los eléctricos se incluyen los altos voltajes y campos magnéticos destructivos, así como corriente alterna y directa e interferencias.

Las compañías de dispositivos semiconductores pueden estar de acuerdo en proteger sus productos de los ambientes hostiles envasandolos en empaques de cerámica o de lata herméticamente sellados. Hay un envase hermético de cerámica DIP (CERDIP) y más aún un envasado de cerámica sellado por soldadura bastante caro (sellado lateralmente).

Los estándares militares y aeroespaciales tienen muchas especificaciones para los envases de dispositivos de metal cerámico porque estos productos serán expuestos a tensiones de voltaje mayores que los envases comerciales o de consumo. Esto se aplica a diodos, transistores y termistores, así como compuertas lógicas, memorias y microprocesadores. En ciertos casos, la falla en los dispositivos semiconductores podría resultar en pérdida de duración en aplicaciones como en equipo de soporte, radios de emergencia, equipo de navegación y sistemas de control de misiles. Por lo tanto, la fiabilidad ha sido más importante que el precio por unidad en estas aplicaciones.

Como resultado de el mejoramiento en las técnicas de fabricación, e indicaciones favorables de datos de fiabilidad acumulados por años, los dispositivos de envasado son ahora desarrollados satisfactoriamente en aplicaciones previamente reservados para envasados de metal y cerámica. El Departamento de Defensa de los E.U. está tratando de

reducir los costos de la electrónica sin comprometer la fiabilidad regresando a prácticas internas documentadas de compañías fabricantes de semiconductores para muchas aplicaciones no críticas.

El Departamento de Defensa del Pentágono (DOD), está aceptando más equipo comercial para las bases y depósitos, tal como las telecomunicaciones, pruebas electrónicas y de comprobación y procesamiento de datos. Equipo comercial como los radios, radares y equipo de navegación es comprado para los aviones que no son de combate.

Los responsables del diseño, fabricación, mantenimiento o especificaciones militares y de electrónica aeroespacial, en su mayoría usan la publicación MIL-STD-883, (que son pruebas militares estandar y procedimientos para la microelectrónica), y es la "biblia" para todos las pruebas de dispositivos semiconductores e incluye 18 pruebas diferentes de medio ambiente.

La tabla 5.3 lista las pruebas de medio ambiente por el número de método, y la tabla 5.4 lista el número de métodos para pruebas mecánicas. No todos los dispositivos semiconductores fabricados están 100% probados porque su costo sería imposible y sólo una muestra es tomada para diferentes pruebas. Una falla en las pruebas llevaría al rechazo de toda la oblea, la cual contiene cientos de circuitos integrados.

Los cubos o chips envasados en plástico no están sujetos a la misma tensión ambiental (particularmente a temperaturas extremas) como los envasados en botes metálicos herméticamente sellados o los envasados en cerámica. A pesar de las aplicaciones eventuales de los dispositivos o de envasado, sus parámetros eléctricos son medidos y registrados para referencias antes que sean sujetas a pruebas rigurosas, ambientalmente hablando.

Como complemento de las pruebas ambientales, los parámetros eléctricos son medidos otra vez, y si hay algún cambio en las características éstas son anotadas. Los datos determinan si el dispositivo es aceptable para ser vendido en alguna categoría o debe ser rechazado como falla.

5.10.1 CLASIFICACIÓN DE LAS PRUEBAS AMBIENTALES

Las pruebas ambientales, dadas a algún dispositivo, dependen del tipo y de la aplicación. Muchas de las fábricas de semiconductores en el mundo someten sus productos a pruebas basadas directamente o indirectamente por las pruebas especificadas en la Norma MIL-STD-883. Los dispositivos semiconductores conseguidos por el

Departamento de Defensa de los E.U. deben ser probados de acuerdo con éstas provisiones, pero los productos de consumo o comerciales pueden ser probados o examinados con versiones liberadas de estas pruebas.

Muchos creen que las pruebas militares estándar son preparadas por personal del Pentágono y mejoradas por la compañías de semiconductores. Pero son realmente el resultado de la unión de esfuerzos entre el Departamento de Defensa de los E.U. y las compañías quienes tienen la oportunidad de expresar sus puntos de vista sobre cual es factible y cual no.

Número del Método	Nombre de la Prueba
1001	Presión Barométrica (Operación de Altitud).
1002	Inmersión.
1003	Resistencia Aislante.
1004	Resistencia a la Humedad.
1005	Estado de Vida Fijo.
1006	Vida Intermitente.
1007	Vida Acelerada.
1008	Almacenamiento a Altas Temperaturas.
1009	Atmósfera de Sal (Corrosión).
1010	Ciclo de la Temperatura.
1011	Descargas Térmicas.
1012	Características Térmicas.
1013	Punto de Rocío.
1014	Sellado.
1015	Pruebas de Consumación.
1016	Pruebas de Caracterización de Vida/Fiabilidad.
1017	Irradiación de Neutrones.
1018	Contenido de vapor de Agua Interno.

Tabla 5.3 Norma MIL-STD-883. Pruebas Ambientales Para Semiconductores

Los estándares militares son el resultado de considerables investigaciones en tiempo y dinero de muchos años por todos los participantes. Estos estándares y especificaciones fueron importantes hace muchos años cuando la DOD fué el mayor consumidor de semiconductores. Sin embargo han sobrevivido a los masivos cambios en los clientes base, desde la Defensa hasta los comerciales en los pasados 20 años, debido al rápido crecimiento en el gasto comercial.

Es una práctica común en la industria seleccionar una muestra al azar de dispositivos de un lote grande, generalmente entre siete y cien para probarlos. Estos dispositivos son divididos dentro de grupos de un dispositivo o más, y cada grupo es sometido a diferentes pruebas de rutina. Al final del programa de pruebas, las partes son evaluadas para ver su desempeño. Dependiendo de estos resultados, la condición general de los demás dispositivos del lote (no probados) se determina por análisis estadístico.

5.10.2 CÁMARAS DE PRUEBA

Muchas pruebas ambientales se llevan acabo en cámaras o salas especiales capaces de probar semiconductores bajo condiciones ambientales que exceden a los encontrados en el laboratorio: temperatura, humedad y presión del aire.

Muchas pruebas en las cámaras son diseñadas para una prueba específica como ciclos de temperatura o presión. Una cámara de temperatura con un humedecedor permite la simulación de condiciones tropicales y otro con un inyector de brisa de sal puede reproducir condiciones similares al océano. Una cámara de presión permite la simulación de presiones de aire muchas veces mayor que la normal que serían encontrados en los fondos del mar, también como esas cerca del cero para simulaciones en el espacio exterior

5.10.3 TENSIONES TÉRMICAS

La tensión térmica es el medio ambiente más perjudicial que influye en los dispositivos semiconductores. Las pruebas de presión térmica son clasificadas en tres categorías básicas: Almacenamiento a altas temperaturas, ciclos de temperatura y choques o descargas térmicas. Dentro de cada categoría hay un subconjunto de pruebas de condición que pueden ser adaptadas para diferentes tipos de dispositivos.

5.10.4 ALMACENAMIENTO A ALTAS TEMPERATURAS

Los controles de almacenamiento a altas temperaturas (Método 1008), prueban los efectos de las elevadas temperaturas en los dispositivos semiconductores sin energía aplicada. Un horno que regule la temperatura es el equipo requerido para realizar esta prueba. Las partes a ser probadas son colocadas en la cámara y la temperatura es incrementada a la temperatura de almacenamiento requerida.

Las temperaturas fluctúan entre los 75° C y los 400° C (167° F y 752° F). Los dispositivos militares y aeroespaciales son, probados a más altas temperaturas que sus contrapartes comerciales. Los dispositivos con envase de plástico son generalmente probados a 150° C (302° F).

Las muestras son guardadas en compartimientos de temperatura por un período de tiempo especificado que puede fluctuar entre 24 y 1000 horas. Las partes que son retiradas de la sala, se dejan enfriar a temperatura ambiente, y después son probadas para su rendimiento eléctrico.

Los solventes que sobran de los moldes de inyección de plástico y los subsiguientes limpiadores pueden provocar funcionamientos erráticos. Los ciclos uniformes de alta temperatura pueden apartar estos contaminantes, estabilizando los parámetros de los dispositivos.

5.10.5 CICLOS DE TEMPERATURA

Los ciclos de temperatura (método 1010) también prueban la capacidad de que un componente resista a exposiciones repetidas regularmente extremas entre el frío y el calor. Los dispositivos destinados a aplicaciones automovilísticas, por ejemplo, deben sobrevivir a repetidos ciclos de temperatura extremadamente altos y bajos.

Algunos cambios permanentes en las características de operación de los dispositivos semiconductores provocados por los períodos de temperatura son generalmente el resultado de tensiones mecánicas establecidos entre los materiales. Este daño puede tener muchas formas: agrietamiento y cuarteaduras en los compuestos del molde, ruptura en las juntas y el sellado, fallas en el aislamiento, y la separación de los cables de los semiconductores del bloque o chip.

Los ciclos de temperatura se hacen en una cámara u horno cuyas temperaturas pueden ser controladas, así como los ciclos entre temperaturas extremas especificadas.

Alternativamente, la prueba puede ser realizada en dos cámaras separadas, una para altas temperaturas y la otra para bajas temperaturas.

En los procedimientos estándar, los dispositivos a ser probados se colocan en cámaras frías primero y después permitiendo la estabilización por un mínimo de 15 minutos a temperatura ambiente. Al mismo tiempo, estas exposiciones completan un ciclo de temperatura de cuarto (25° C).

5.10.6 DESCARGAS TÉRMICAS

La tensión térmica (método 1011) es la prueba de sobrecarga térmica más demandada. Es una versión más severa que la de ciclos de temperatura. Un líquido reemplaza el aire como medio de transferencia de calor para los ciclos de temperatura en esta prueba. Esto es por que el líquido transfiere el calor más eficientemente que un gas (aire), y la temperatura interna del dispositivo a ser probado es reemplazada más rápidamente.

Una tira que controla la temperatura contiene un líquido (típicamente agua), indicada para transferir calor sobre el rango especificado que es requerido para esta prueba. Los límites de la temperatura para la tensiones térmicas son a menudo las mismas que las del método 1010.

Los compuestos de clouorflouorcarbonos (CFC), por ejemplo, el freón, han sido usados para las pruebas, pero pueden ser requeridos sustitutos debido al posible daño a la capa de ozono provocado por la liberación de estos compuestos a la atmósfera.

A diferencia de los ciclos de temperatura, un ciclo de tensión térmica empieza con la inmersión de una muestra en el líquido caliente. Después de cinco minutos a esa temperatura, el componente es rápidamente transferido a una solución fría, y después de otros cinco minutos a baja temperatura, el ciclo es completado y otro ciclo es empezado inmediatamente. 15 ciclos completos son requeridos para completar la prueba y el tiempo que se toma para transferir la parte desde la tina caliente a la fría no debe exceder los 10 segundos.

5.10.7 RESISTENCIA A LA HUMEDAD

La prueba de resistencia a la humedad (método 1004) es similar a la prueba de tensión térmica (método 1011). Ésta es realizada para evaluar la capacidad, de los dispositivos, de resistir los efectos de deterioración de la alta humedad y de calor. El daño provocado por

la humedad incluye la absorción de humedad por los materiales aislantes, superficies mojadas o húmedas y corrosión de los metales.

Esta prueba es realizada en una cámara que controla la temperatura con un humidificador capaz de crear condiciones de humedad relativa del 85% o más. Antes de la prueba, un voltaje de polarización igual al voltaje de operación máximo de el dispositivo es aplicado entre las terminales.

Un voltaje de polarización inverso igual al voltaje de ruptura es aplicado a los diodos, transistores y termistores y un voltaje igual al voltaje normal suministrado es aplicado a los circuitos integrados tanto analógicos como digitales.

5.10.8 ATMÓSFERA DE SAL

La prueba de atmósfera de sal (corrosión) o spray de sal (método 1009) determinan la resistencia de los dispositivos al ingreso a la solución de sal y la corrosión en la superficie expuesta y en el interior de la misma. Es más riguroso que la prueba de resistencia a la humedad, está simula las condiciones encontradas en la orilla o a bordo de un barco en el mar.

Los dispositivos a ser probados son suspendidos en una solución por 24 horas en una bruma de 20% de cloruro de sodio a 35° C, así que el líquido no puede acumularse en estos. El flujo de aire dentro de la cámara es ajustada así que el depósito de sal acumulado está en un rango de 10,000 a 50,000 miligramos por metro cuadrado por día.

Para concluir las pruebas, la muestras son enjuagadas en agua caliente y suavemente lavadas para remover la sal de los depósitos. Los dispositivos son entonces entregados para un exámen visual bajo microscopio para ver los signos de deterioración, así como la corrosión en los metales o la contaminación en la superficie.

5.10.9 CURVA DE LA FUNCIÓN DE RIESGO O FALLA

La alta mortalidad ha sido un continuo problema para la industria de los semiconductores desde los primeros días de los transistores. Un dispositivo puede pasar todas las pruebas eléctricas, ambientales y mecánicas y por varias razones falla después de horas o días de servicio.

La teoría y la experiencia muestra que la razón de fallas para los dispositivos semiconductores normalmente sigue una curva predecible, la famosa curva de baño para

la función de riesgo o falla (figura 5.1). Esta curva es normalmente dividida en 3 regiones para el análisis de la fiabilidad:

- 1) El período de la mortalidad infantil: Es una región provocada por defectos en la manufactura de los componentes, este tipo de falla representa promedios de falla muy altos.
- 2) El período de vida normal: Es una región de desempeño relativamente estable que representa la vida útil de el dispositivo. Un nivel bajo de fallas de cualquier naturaleza puede ocurrir en esta región de la curva.
- 3) Período de desgaste: Es la región que sigue al de la vida normal donde la razón de falla se incrementa rápidamente debido al desgaste.

El período de mortalidad infantil es típicamente de unas pocas semanas mientras que el de vida normal o estable podría ser de 20 años o más. Muchos circuitos semiconductores han sido reemplazados con nuevos diseños y tecnologías antes de que el período de desgaste llegue.

Muchos motivos han sido presentados para explicar la mortalidad infantil. Las razones típicamente expuestas incluyen defectos en los materiales y ensamblados, diseño marginal de el dispositivo o conjunto de fallas por pruebas de bandas. Muchas de estas fallas pueden ser detectadas durante los procesos de prueba de calidad de los fabricantes.

5.11 CONSUMACIÓN ESTÁTICA

Hay una amplia evidencia de que la mortalidad infantil puede ser reducida a menos de 1% con un prueba llamada de consumación o destrucción (método 1015). La consumación es realizada en la prueba de dispositivos en un ambiente de temperatura mínima de 125° C (257° F) con energía aplicada. Para los productos militares, una prueba del 100% está dada para 160 horas, para los productos comerciales, la misma prueba se lleva solamente 16 horas. La alta temperatura es mantenida durante la destrucción por control termostático en las cámaras.

5.12 DESTRUCCIÓN DINÁMICA

En esta pruebas, las señales de corriente alterna son aplicadas a la entrada de el dispositivo bajo prueba para simular las condiciones de operación.

Después de la destrucción, todas las muestras del dispositivo reciben una protección 100% funcional a 100° C. Porque las fallas de los dispositivos semidestruidos puede ser catastrófica, un continuo chequeo es generalmente dado para las partes después de probarlas para prevenir, en los dispositivos, cortos circuitos que dañen al circuito en prueba.

5.13 PRUEBAS MÉCICAS

La MIL-STD-883 incluye las pruebas mecánicas (tabla 5.4). Estas incluyen pruebas de aceleración constante, tensión mecánica, vibración, ruido y frecuencia variable. Una prueba de aceleración constante puede requerir que el dispositivo este sujeto a 30 kg. por 1 minuto en cada eje, para probar las conexiones internas de el dispositivo.

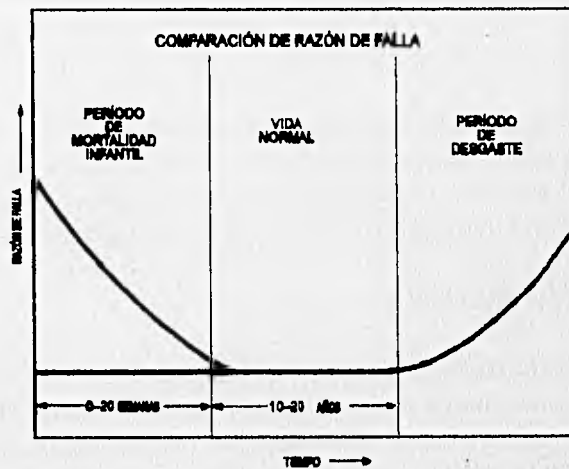


Figura 5.1 CURVA DE LA RAZÓN DE RIESGO DE LA TINA DE BAÑO para la comparación de la razón de falla en la prueba de fiabilidad de los dispositivos semiconductores

5.14 OTRAS PRUEBAS

Hay otros procedimientos para obtener la calificación para un dispositivo semiconductor, como la publicación MIL-M-38510. Hay dos clases que garantizan la disponibilidad de los productos para la M38510 (clase S y B).

Sin embargo, si un contratista militar/acroespacial desea usar una parte de la M38510 y no tiene la hoja de reducción de costos de la JAN (Joint Army Navy), el producto puede ser procesado por la MIL-STD-883, clase B, método 5004, y esta será probada electricamente 100% con las hojas de datos de la fábrica. Estos productos son identificados por el sufijo /883 en el número de parte. Mientras que las partes sometidas a inspecciones de conformidad de calidad por la MIL-STD-883, método 5005, son generalmente envasadas en cajas más caras de metal herméticamente selladas y también en envases cerámicos. En suma, para aceptar la estabilización de secado, los ciclos de temperatura, la aceleración constante, la inspección visual, la destrucción y otras pruebas, deben ser acompañadas por páginas de documentación fácil de seguir, esta es una de las razones por el cual el precio por unidad es alto.

Pruebas especiales han sido inventadas por encima y más allá de la MIL-STD-883 para aplicar a los dispositivos especiales, por ejemplo, las memorias para dispositivos electrónicos, deberán estar sujetas a ciclos de prueba de escritura y/o borrado, así como pruebas de deterioración de datos.

Los dispositivos de la JAN clase S destinados para usarse en lanzaderas espaciales, pruebas espaciales, satélites espía y otras aplicaciones críticas, son probadas más exhaustivamente que las parte de grado militar, por que probablemente estarán expuestas a la radiación.

Número del Método	Nombre de la Prueba
2001	Aceleración Constante.
2002	Tensión Mecánica.
2005	Vibración (Fatiga).
2006	Vibración (Ruido).
2007	Vibración (Frecuencia Variable).
2013	Radiografía.
2020	Pruebas de Detección de Ruido en Partículas Impactadas.

Tabla 5.4 Norma MIL-STD-883. Pruebas Mecánicas Para Semiconductores

**VI. CONCEPTOS FUNDAMENTALES DE
LA FIABILIDAD.**

La fiabilidad debe ser capaz de describir cuantitativamente que artículos realizan su función en un periodo de servicio específico, y ésta puede ser obtenida al observar el comportamiento de un gran número de artículos (idénticos), los cuales se ponen en servicio (o a prueba) al mismo tiempo. Supongamos que $N_0 = n(0)$, y sea el número de artículos puestos a prueba en el tiempo $t = 0$, y que $n(t)$, es el número de artículos que todavía funcionan adecuadamente en el tiempo t , figura 6.1.

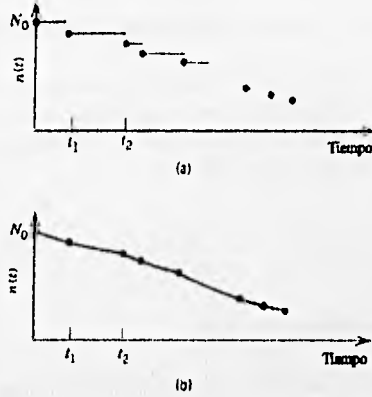


Figura 6.1 Función de sobrevivientes $n(t)$ para dos situaciones de monitoreo. a) monitoreo continuo y b) monitoreo esporádico.

A menudo es más conveniente trabajar con la razón o fracción de sobrevivientes (que todavía funcionan), definida como

$$R^*(t) = \frac{n(t)}{N_0} \tag{6.1}$$

La $R^*(t)$ es una función no creciente con $R^*(0) = 1$ y $R^*(\infty) = 0$. Si t_i representa el tiempo de falla de los componentes ($i = 1, \dots, N_0$), entonces $R^*(t_i)$ es continua a la derecha, de modo que

$$R^*(t_i) = \lim_{\epsilon \rightarrow 0^+} R^*(t_i + \epsilon) \tag{6.2}$$

y a $R^*(t)$ se le conoce como **la función de fiabilidad**.

Se puede considerar el incremento de la función de sobrevivencia como

$$-\Delta n = n(t) - n(t + \Delta t) \tag{6.3}$$

la cual es la cantidad de fallas en un intervalo Δt , y si esto lo dividimos por Δt obtenemos

$$\frac{n(t) - n(t + \Delta t)}{\Delta t} = \frac{-\Delta n}{\Delta t} \quad (6.4)$$

que es la cantidad de fallas por unidad de tiempo y por el número inicial de unidades, N_0 ,

$$f^*(t) = \frac{n(t_i) - n(t_i + \Delta t)}{\Delta t_{i+1} N_0} = \frac{-\Delta n_{i+1}}{\Delta t_{i+1} N_0} \quad t_i < t < t_{i+1} \quad (6.5)$$

a esto se le conoce como **la función de probabilidad de falla o densidad de falla** en un intervalo $(t, t + \Delta t)$.

La cantidad de fallas definida en la ecuación 6.3 o la cantidad de fallas por unidad de tiempo en la ecuación 6.4, puede ser tal vez más provechosamente comparada, no con la cantidad inicial (N_0) al principio de la prueba, sino con la cantidad inicial $n(t)$ al principio del intervalo de interés. Esto nos lleva a la función

$$h^*(t) = \frac{n(t_i) - n(t_i + \Delta t)}{\Delta t_{i+1} n(t_i)} = \frac{-\Delta n_{i+1}}{\Delta t_{i+1} n(t_i)} \quad t_i < t < t_{i+1} \quad (6.6)$$

la cual se conoce como **la función de riesgo**.

Por último, la cuarta función, $F^*(t) = 1 - R^*(t)$, es conocida como **la función de inestabilidad**. El uso de las funciones $R^*(t)$, $f^*(t)$, y $h^*(t)$, es de como los datos son reunidos y de como estos serán graficados. Hay dos casos a considerar, basados en como los datos son reunidos. El primer caso puede ser llamado de control continuo, cuando el número de unidades probadas es pequeña y el tiempo exacto de cada falla es registrada. Estos tiempos de falla serán empleados como tiempos de observación del sistema, designados como $\{t_i\}$, y la Δt_i serán los períodos entre fallas, como se indica en la figura 6.2. Específicamente, se define a Δt como

$$\Delta t_{i+1} = t_{i+1} - t_i \quad i = 0, 1, \dots$$

El incremento en el tiempo es señalado por el extremo de la derecha del intervalo. Es obvio que $-\Delta n = n(t_i) - n(t_{i+1}) = 1$ para esta situación. Teóricamente $R^*(t)$ es una constante por encima del intervalo $[t_i, t_{i+1})$ y debería parecerse a la figura 6.1a. De este modo la función $R^*(t)$ es conveniente definirla como en la ecuación 6.2, solamente para los puntos finales $t = t_i$, y como

$$R^*(t) = \frac{t_{i+1} - t}{\Delta t_{i+1}} R^*(t_i) + \frac{t - t_i}{\Delta t_{i+1}} R^*(t_{i+1}) \quad (6.7)$$

por encima del intervalo (t_i, t_{i+1}) . Como se puede ver es una fórmula de interpolación rectilínea entre los puntos $(t_i, R^*(t_i))$ y $(t_{i+1}, R^*(t_{i+1}))$, como se muestra en la figura 6.1b. El siguiente paso al problema es como graficar $f^*(t)$ y $h^*(t)$ para el caso 1. Podemos usar un histograma, una gráfica de barras, o podemos escoger el polígono de frecuencias de la gráfica donde la ordenada $f^*(t)$ o $h^*(t)$ es trazada junto al centro del intervalo Δt . Ambos métodos son ilustrados en el ejemplo 6.1. En cualquier prueba, las fórmulas 6.5 y 6.6 se reducen a

$$f^*(t) = \frac{1}{N_0 \Delta t_{i+1}}, \quad t_i < t < t_{i+1} \quad (6.8)$$

y

$$h^*(t) = \frac{1}{n(t_i) \Delta t_{i+1}}, \quad t_i < t < t_{i+1} \quad (6.9)$$

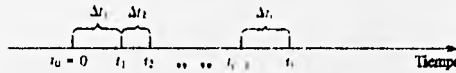


Figura 6.2 Relación entre t_i y Δt_i

Ejemplo 6.1

10 componentes electrónicos hipotéticos son colocados para una prueba de vida. Los tiempos de falla para los componentes son $\{5, 10, 17.5, 30, 40, 55, 67.5, 82.5, 100$ y 117.5 horas}.

- Trazar un histograma y una gráfica de polígonos para $f^*(t)$ y $h^*(t)$ para los datos.
- Graficar las funciones de fiabilidad e inestabilidad $R^*(t)$ y $F^*(t)$.

En el segundo caso, el monitoreo de las unidades no es continuo, sino que el sistema es observado de vez en vez en los tiempos $\{t_i\}$, y el número de sobrevivientes (que todavía funcionan) $n(t_i)$ es anotado. Las fórmulas 6.1, 6.5 y 6.6 son válidas. El caso 2 es ilustrado en el ejemplo 6.2

Número de falla	Tiempo de operación	Densidad de falla $f^*(t)$	Razón de riesgo $h^*(t)$
1	0 → 5	$1/(10 \times 5) = 0.0200$	$1/(10 \times 5) = 0.0200$
2	5 → 10	$1/(10 \times 5) = 0.0200$	$1/(9 \times 5) = 0.0222$
3	10 → 17.5	$1/(10 \times 7.5) = 0.0133$	$1/(8 \times 7.5) = 0.0167$
4	17.5 → 30	$1/(10 \times 12.5) = 0.0080$	$1/(7 \times 12.5) = 0.0114$
5	30 → 40	$1/(10 \times 10) = 0.0100$	$1/(6 \times 10) = 0.0167$
6	40 → 55	$1/(10 \times 15) = 0.0067$	$1/(5 \times 15) = 0.0133$
7	55 → 67.5	$1/(10 \times 12.5) = 0.0080$	$1/(4 \times 12.5) = 0.0200$
8	67.5 → 82.5	$1/(10 \times 15) = 0.0067$	$1/(3 \times 15) = 0.0220$
9	82.5 → 100	$1/(10 \times 17.5) = 0.0057$	$1/(2 \times 17.5) = 0.0286$
10	100 → 117.5	$1/(10 \times 17.5) = 0.0057$	$1/(1 \times 17.5) = 0.0570$

Tabla 6.1 Cálculos para el ejemplo 6.1

Ejemplo 6.2

Ochocientos componentes hipotéticos son colocados en pruebas de vida. El sistema es observado en 3, 6, ..., 30 horas y el número de sobrevivientes es anotado (tabla 6.2)

Intervalo de tiempo (Horas)	Número de fallas en el intervalo
0 → 3	185
3 → 6	42
6 → 9	36
9 → 12	30
12 → 15	17
15 → 18	8
18 → 21	14
21 → 24	9
24 → 27	6
27 → 30	3

	350 Total

Tabla 6.2 Datos de falla para 800 componentes hipotéticos

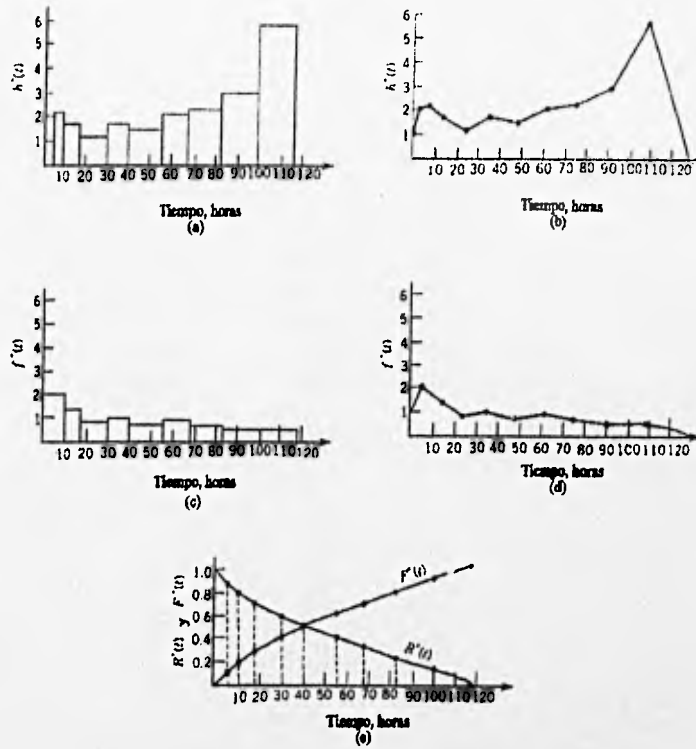


Figura 6.3 Gráficas para el ejemplo 6.1. a) histograma de $h^*(t)$, b) polígono de $h^*(t)$, c) histograma de $f^*(t)$, d) polígono de $f^*(t)$ y e) $R^*(t)$ y $F^*(t)$.

a) Calcular $f^*(t)$ y $h^*(t)$ para los datos dados.

b) Graficar las funciones de fiabilidad e inestabilidad $R^*(t)$ y $F^*(t)$.

Intervalo de tiempo (Horas)	Número de fallas en el intervalo	Densidad de falla $f^*(t)$	Razón de riesgo $h^*(t)$
0 → 3	185	$185/(800 \times 3) = 0.0771$	$185/(800 \times 3) = 0.0771$
3 → 6	42	$42/(800 \times 3) = 0.0175$	$42/(615 \times 3) = 0.0227$
6 → 9	36	$36/(800 \times 3) = 0.015$	$36/(573 \times 3) = 0.0209$
9 → 12	30	$30/(800 \times 3) = 0.0125$	$30/(537 \times 3) = 0.0186$
12 → 15	17	$17/(800 \times 3) = 0.0071$	$17/(507 \times 3) = 0.0112$
15 → 18	8	$8/(800 \times 3) = 0.0033$	$8/(490 \times 3) = 0.0054$
18 → 21	14	$14/(800 \times 3) = 0.0058$	$14/(482 \times 3) = 0.0097$
21 → 24	9	$9/(800 \times 3) = 0.00375$	$9/(468 \times 3) = 0.0064$
24 → 27	6	$6/(800 \times 3) = 0.0025$	$6/(459 \times 3) = 0.0044$
27 → 30	3	$3/(800 \times 3) = 0.0013$	$3/(453 \times 3) = 0.0022$

Tabla 6.3 Cálculos para el ejemplo 6.2

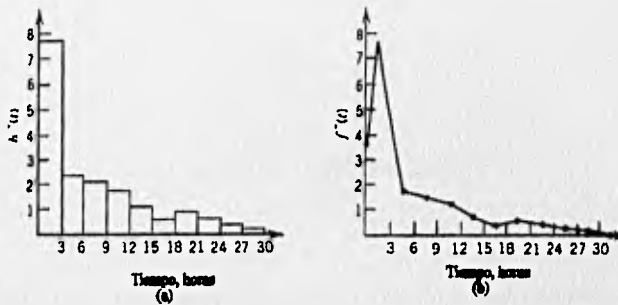


Figura 6.4 Gráficas para el ejemplo 6.2. a) histograma de $h^*(t)$, b) polígono de $h^*(t)$

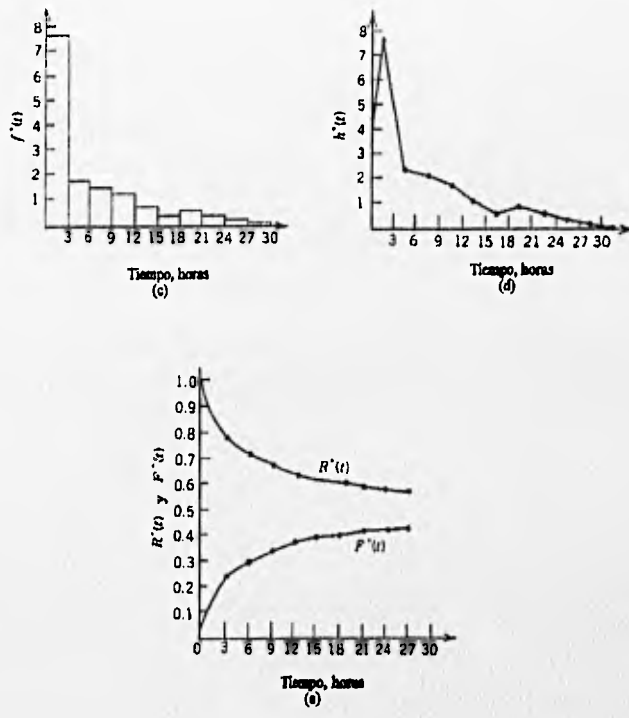


Figura 6.4 (continuación) c) histograma de $f^*(t)$, d) polígono de $f^*(t)$ y e) $F^*(t)$ y $R^*(t)$

DISTRIBUCIONES DE FIABILIDAD

6.1 FÓRMULAS BÁSICAS

Ya vimos cómo reunir datos y resumirlos en forma gráfica. Ahora veremos estas mismas ideas básicas en fórmulas más teóricas.

Supongamos que T sea una variable aleatoria continua no negativa que representa la vida (tiempo de vida o tiempo de falla) útil de un componente (unidad o pieza de un equipo). La ley de falla para un componente puede ser descrita en diferentes formas. Tal vez la fórmula más fundamental está en términos de $F(t)$, la **función de distribución acumulativa** (CDF) definida como la probabilidad de que la unidad "funcione" para la mayor parte del tiempo t , y se escribe como

$$F(t) = P(T \leq t) \quad (6.10)$$

también se le conoce como la **función de inestabilidad**. Un equivalente y algunas veces, una fórmula más útil es la **función de fiabilidad** $R(t)$, que es la probabilidad de que un componente funcione más que el tiempo t , la cual es designada como

$$\begin{aligned} R(t) &= P(T > t) \\ &= 1 - P(T \leq t) \\ &= 1 - F(t) \end{aligned} \quad (6.11)$$

Es tradicional, también, describir las leyes de falla en términos de la **función de densidad**

$$f(t) = F'(t) \quad (6.12)$$

la cual debe tener las siguientes propiedades

$$\begin{aligned} f(t) &\geq 0 \\ \int_0^{\infty} f(t) dt &= 1 \end{aligned} \quad (6.13)$$

resulta que la probabilidad de que el componente falle entre los tiempos t_1 y t_2 está dado por

$$\begin{aligned} P(t_1 < T \leq t_2) &= \int_{t_1}^{t_2} f(t) dt \\ &= F(t_2) - F(t_1) \end{aligned} \quad (6.14)$$

y que

$$F(t) = \int_0^t f(x) dx \quad (6.15)$$

si se asume que la variable al azar T está funcionando bien en el sentido de que $F(t)$ es continua. Como resultado de esta suposición, se tiene

$$P(T = t_0) = P(t_0 < T \leq t_0) = \int_{t_0}^{t_0} f(t) dt = 0 \quad (6.16)$$

y por lo tanto

$$\begin{aligned} P(t_1 \leq T < t_2) &= P(t_1 \leq T \leq t_2) \\ &= P(t_1 < T \leq t_2) \\ &= P(t_1 < T < t_2) \end{aligned} \quad (6.17)$$

Es obvio que de estas definiciones $F(t)$ es

$$\begin{aligned} F(0) &= 0 \\ F(\infty) &= 1 \end{aligned}$$

mientras $R(t)$ es

$$\begin{aligned} R(0) &= 1 \\ R(\infty) &= 0 \end{aligned}$$

Esto puede ser usado para calcular la probabilidad aproximada sobre un intervalo corto cuando el cálculo exacto es inconveniente o analíticamente intratable. Para ello se recurre al teorema del valor medio (MVT) cuyo estado para una función continua $f(t)$ se puede escribir $P(a < T \leq b)$ como

$$\int_a^b f(t) dt = (b-a)f(\xi) \quad (6.18)$$

donde ξ está en el intervalo (a,b) y puede de este modo ser escrita como $\xi = a + m(b-a)$, donde $m < 1$. La relación 6.18 es exacta para algún (probablemente desconocido) punto interior ξ (figura 6.5). Si la longitud del intervalo $b - a = \Delta t$ es pequeña, una aproximación bien razonable puede ser ejecutada usando el punto medio $t^* = (a + b)/2$ en lugar de la desconocida ξ . Entonces la ecuación 6.18 es reemplazada por

$$\int_a^b f(t) dt \approx (b-a)f(t^*) = f(t^*)\Delta t \quad (6.19)$$

para ilustrarlo se considera el siguiente ejemplo.

Ejemplo 6.3

Consideremos un componente cuya longitud de vida en horas está descrita por la función de densidad

$$f(t) = 0.02e^{-0.02t} \quad \text{para } t \geq 0$$

la probabilidad de falla entre las horas 510 y 515 puede ser obtenida aproximadamente como

$$f(512.5)(515-510) = .002e^{-.002(512.5)}(5) \\ = .00359$$

El valor exacto, obtenido por integración es

$$F(515) - F(510) = e^{-.002(510)} - e^{-.002(515)} = .00359$$

Hay todavía una cuarta fórmula para describir las leyes de falla en términos de la probabilidad condicional. Consideremos el siguiente ejemplo.

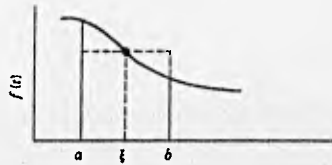


Figura 6.5 Ilustración del teorema del valor medio

Ejemplo 6.4

Una computadora tiene una vida útil bien descrita por la distribución normal $N(500, 100^2)$

- 1) ¿Cuál es la probabilidad de que dure al menos 600 horas?
- 2) Si ya ha funcionado por 500 horas, ¿Cuál es la probabilidad de que funcione al menos 100 horas más?

Estas dos preguntas pueden parecer lo mismo, pero no lo son. La probabilidad requerida para la pregunta 1 es

$$P(T > 600) = P\left(\frac{T-500}{100} > \frac{600-500}{100}\right) = P(Z > 1) \\ = 1 - .8413 = .1587$$

La respuesta a la pregunta 2, debemos recordar las reglas para la probabilidad condicional, donde

$$P(A|B) = \frac{P(A \text{ y } B)}{P(B)}$$

$$\begin{aligned}
 P(T > 600; T > 500) &= \frac{P(T > 600, T > 500)}{P(T > 500)} \\
 &= \frac{P(T > 600)}{P(T > 500)} = \frac{.1587}{.5} = .3174
 \end{aligned}$$

Como pudimos ver en este ejemplo, es conveniente introducir una función de densidad condicional, definida como la probabilidad de falla por unidad de tiempo en el tiempo t , dado que la falla todavía no ha ocurrido en el tiempo t . Esta función es llamada **razón de riesgo, función de riesgo, razón de falla instantánea**, o sencillamente **razón de falla** (opuesto a la densidad de falla) y es definida como

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{1-F(t)} \quad (6.20)$$

Lleva tiempo entender la diferencia entre $f(t)$ y $h(t)$. El ejemplo 6.5 es una buena ayuda. Aquí está otro ejemplo. Considerar la diferencia entre las siguientes preguntas teniendo en cuenta el nacimiento de un niño.

- 1) ¿Cuál es la probabilidad de que él muera a los seis años de edad?
- 2) ¿Cuál es la probabilidad de que él alcance los sesenta años de edad y muera en el siguiente año?

la pregunta 1 usa la función de densidad $f(t)$ y la pregunta 2 usa la función de riesgo $h(t)$.

Si alguna de las cuatro cantidades $f(t)$, $F(t)$, $R(t)$ y $h(t)$ son dadas, las otras tres son obtenidas de estas.

Caso 1

Asumimos que nos dan $f(t)$, entonces las otras tres funciones pueden ser calculadas por

$$F(t) = \int_0^t f(x) dx \quad (6.21a)$$

$$F(t) = \int_0^{\infty} f(x) dx = 1 - F(t) \quad (6.21b)$$

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (6.21c)$$

Caso 2

Asumimos que nos dan $F(t)$, entonces las otras tres funciones pueden ser calculadas como

$$f(t) = F'(t) \quad (6.22a)$$

$$R(t) = 1 - F(t) \quad (6.22b)$$

$$h(t) = \frac{F'(t)}{1-F(t)} \quad (6.22c)$$

Caso 3

Asumimos que nos dan $R(t)$, entonces las otras tres funciones son calculadas como

$$F(t) = 1 - R(t) \quad (6.23a)$$

$$f(t) = -R'(t) \quad (6.23b)$$

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{-R'(t)}{R(t)} \quad (6.23c)$$

Caso 4

El caso en el cual solamente $h(t)$ es dado, se requiere más trabajo. Empezaremos con la relación 6.23c. Tratandola como una ecuación diferencial para ser resuelta, multiplicando ambos lados por dt para obtener

$$\frac{R'(t)dt}{R(t)} = -h(t)dt \quad (6.24)$$

Esta es una ecuación diferencial de variables separables, y la solución puede ser obtenida usando la integral definida o la integral indefinida aproximada. La aproximación por integrales definidas es llevada por encima del rango de 0 a t . Esto necesita el uso de una variable falsa para la integración, ya que no es permitido usar la misma letra para ambos "al pasar variables" y en el punto final de la integral. De este modo describimos

$$\int_0^t \frac{R'(x)dx}{R(x)} = - \int_0^t h(x)dx$$

del lado izquierdo da

$$\ln R(x) \Big|_0^t = \ln R(t) - \ln R(0)$$

pero $R(0) = 1$, así $\ln R(0) = 0$, produciendo

$$\ln R(t) = - \int_0^t h(x)dx = -H(t)$$

o

$$R(t) = \exp \left[- \int_0^t h(x)dx \right] = e^{-H(t)} \quad (6.25a)$$

de esto obtenemos

$$F(t) = 1 - \exp\left[-\int_0^t h(x) dx\right] = 1 - e^{-H(t)} \quad (6.25b)$$

entonces $f(t) = h(t)R(t)$, continuando que

$$f(t) = h(t) \exp\left[-\int_0^t h(x) dx\right] = h(t)e^{-H(t)} \quad (6.25c)$$

la cantidad $H(t)$ se llama **la función de riesgo acumulada**. Para ilustrar el uso de la ecuación 6.25c, se presentará un ejemplo.

Ejemplo 6.5

Asumimos que $h(t) = \lambda$ (una constante) y encontrar $f(t)$, $F(t)$ y $R(t)$. calculamos

$$\int_0^t h(x) dx = \int_0^t \lambda dx = \lambda t$$

entonces para $t \geq 0$, las cuatro funciones son

$$h(t) = \lambda \quad (6.26a)$$

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (6.26b)$$

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (6.26c)$$

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (6.26d)$$

6.2 FUNCIÓN DE RIESGO

Aunque la distribución normal es teóricamente inapropiada para el trabajo de fiabilidad, es frecuentemente útil para describir el tiempo de vida de los componentes. Es tradicional presentar un modelo general de una función de riesgo como la curva de baño (figura 6.6). Una semejanza podría ser probablemente el cuerpo humano. La región A, corresponde al período de mortalidad infantil, es en esta edad en donde el cuerpo humano es más vulnerable a ser invadido por microorganismos debido a que todavía no se cuenta con los suficientes anticuerpos para repelerlos, y es la principal razón de que haya tantas muertes. El tiempo t_1 marca el comienzo de la juventud, cuando las muertes pueden ser atribuidas a todo tipo de causas. La región B, entonces, es llamada la región de falla de riesgo y se asocia con la constante de razón de falla (CFR) y por último el tiempo t_2 marca el comienzo de la edad avanzada, o agotamiento, período de región C.

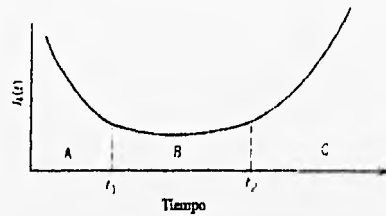


Figura 6.6 Curva de baño

Además de la cuatro funciones descritas para la regla de falla $f(t)$, $F(t)$, $R(t)$ y $h(t)$, es conveniente tener disponible la vida media y una medición de variabilidad. La vida media o tiempo medio de falla para un equipo no reparable (MTTF) es definida como

$$\mu = E(t) = \int_0^{\infty} t f(t) dt \quad (6.27)$$

y, para las mediciones de variabilidad, la varianza es

$$\sigma^2 = E(T - \mu^2) = \int_0^{\infty} (t - \mu)^2 f(t) dt \quad (6.28a)$$

$$= E(T^2) - \mu^2 \quad (6.28b)$$

la varianza tiene dimensiones (tiempo)², así, una medida más conveniente es σ , la desviación estandar, lo cual significa que la raíz cuadrada es la desviación estandar de los tiempos de falla, de las mediciones de la MTTF μ .

6.3 PROCESO DE POISSON

Hay ocasiones que se tienen que trabajar con la reanudación de procesos, como se representa en la siguiente situación. Consideremos un grupo de idénticas unidades para realizar algunas funciones. En el tiempo $t = 0$, una unidad del grupo se pone en servicio y se deja funcionando hasta que falla en el tiempo t_1 , entonces es instantáneamente reemplazado por otra unidad del mismo grupo, el cual vuelve a funcionar hasta que falla en el tiempo t_2 , después de lo cual es inmediatamente reemplazado y así sucesivamente. Esto se puede representar como una secuencia de fallas en el eje del tiempo como en la figura 6.7. Si $N(t)$ es la variable al azar entera que designa el número de llegadas (fallas) en un tiempo t , es evidente que $N(t + s) - N(t)$ es el número de llegadas que ocurre en un intervalo de longitud s empezando en el tiempo t . Se desea que la fórmula sea una expresión para

$$P_n(t) = P[N(t) = n] \quad (6.29)$$

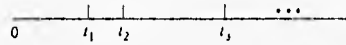


Figura 6.7 Secuencia de fallas

La probabilidad de n llegadas en un tiempo t . Es más común hacer suposiciones sobre los conjuntos de procesos que llegan y son llamados Postulados de Poisson

Postulado 1

$$P_0(0) = 1 \quad \text{o} \quad N(0) = 0 \quad (6.30)$$

en otras palabras, la cantidad es iniciada en cero en el tiempo cero

Postulado 2

Para un intervalo muy corto de tiempo $\Delta t (=h)$, es verdad que

$$P[N(t+h) - N(t) = 1] = \lambda h + o_1(h) \quad (6.31)$$

donde $o_1(h)$ es una diferencial de orden mayor, esto es, es una cantidad que se aproxima a cero mucho más rápido que h , cuando h se aproxima a cero. El postulado afirma que la probabilidad de un solo éxito en un intervalo corto de tiempo h es (casi) directamente proporcional a la longitud del intervalo, y λ es la constante de proporcionalidad, llamada la intensidad del proceso, o razón de éxito

Postulado 3

Para un intervalo corto de tiempo h , es verdad que

$$P[N(t+h) - N(t) \geq 2] = o_2(h) \quad (6.32)$$

donde $o_2(h)$ es otra vez una diferencial de orden mayor. El postulado afirma que en un intervalo muy corto hay esencialmente una probabilidad de cero para 2 o más éxitos; eso es, que los éxitos simultáneos son imposibles

Postulado 4

Para algunos tiempos t , t' y s es verdad que

$$P[N(t+s) - N(t) = n] = P[N(t'+s) - N(t') = n] \quad (6.33)$$

el postulado afirma que la probabilidad de que cualquier número dado de éxitos en cualquier período o longitud fija s es el mismo, no importa en que período empiece. En otras palabras, el proceso es estacionario fuera de tiempo. (El postulado no exige que el número actual de éxitos sea igual para diferentes períodos)

Postulado 5

Para algunos tiempos $t, s, t',$ y s' para cualquier $t' \geq t + s$, es verdad que

$$\text{cov}[N(t + s) - N(t), N(t' + s) - N(t')] = 0 \quad (6.34)$$

El postulado afirma que la cantidad de llegadas para cualquiera de los dos intervalos sin superposición son variables random independientes, lo que ocurre en un intervalo no tiene influencia en lo que suceda en algún otro intervalo subsecuente.

Los postulados 2 y 3 (ecuaciones 6.31 y 6.32) juntos suponen para un intervalo pequeño de h

$$P[N(t + h) - N(t) = 0] = 1 - \lambda h \quad (6.35)$$

(las cantidades $o_1(h)$ y $o_2(h)$ son ignoradas, ya que son esencialmente cero)

Ahora consideraremos un intervalo corto de tiempo h , empezando en el tiempo t , y considerando el estado del sistema (el número total de éxitos) al comienzo y al final del intervalo. Hay dos casos que considerar.

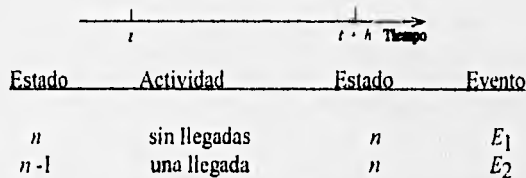


Figura 6.8 Estado de los eventos para el proceso de Poisson

Caso 1: Caso General

Como se representó en la figura 6.8 hay dos eventos separados, E_1 y E_2 , que puede resultar en tener n llegadas al final del intervalo; todas las otras posibilidades son gobernadas por el postulado 3. De este modo

$$\begin{aligned} P_n(t + h) &= P[E_1 \text{ o } E_2] \\ &= P[E_1] + P[E_2] \\ &= P[\text{la cantidad fué } n \text{ en el tiempo } t \text{ y no ocurrieron llegadas en el intervalo } h] \\ &\quad + P[\text{la cantidad fué } n - 1 \text{ en el tiempo } t, \text{ y no ocurrieron llegadas en el} \\ &\quad \text{intervalo } h] \end{aligned} \quad (6.36)$$

Por postulados 4 y 5, los eventos dentro de los corchetes en los dos términos son independientes, así la probabilidad del evento compuesto en cada corchete es simplemente el producto de las probabilidades asociadas. De este modo

$$P_n(t+h) = P[\text{la cantidad fue } n \text{ en el tiempo } t \mid P \text{ no ocurrieron llegadas en el intervalo } h] + P[\text{la cantidad fue } n-1 \text{ en el tiempo } t \mid P \text{ una llegada ocurrió en el intervalo } h]$$

De esta manera

$$P_n(t+h) = P_n(t)(1-\lambda h) + P_{n-1}(t)\lambda h \quad (6.37)$$

multiplicando los paréntesis del lado derecho, cruzando el resultado al primer término, y dividiendo la ecuación por h nos lleva

$$\frac{P_n(t+h) - P_n(t)}{h} = \lambda P_n(t) + \lambda P_{n-1}(t)$$

si el intervalo h se reduce a cero, vemos que el lado izquierdo define la derivada de la probabilidad con respecto al tiempo. El resultado es

$$\frac{dP_n(t)}{dt} = P'_n(t) = -\lambda P_n(t) + \lambda P_{n-1}(t), \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (6.38)$$

Caso 2: El caso del límite

Como se representa en la figura 6.9, hay una sola forma para que la suma sea cero en el tiempo $t+h$, y eso es para la suma que ha estado en cero en el tiempo t , sin llegadas durante el intervalo h . Esto da

$$\begin{aligned} P_0(t+h) &= P(E_3) \\ &= P[\text{la cantidad fue } 0 \text{ en el tiempo } t \text{ y no ocurrieron llegadas en } h] \\ &= P[\text{la cantidad fue } 0 \text{ en el tiempo } t] P[\text{no ocurrieron llegadas en } h] \end{aligned}$$

$$P_0(t+h) = P_0(t)(1-\lambda h)$$

cruzando el primer término, como antes, dividiendo por h y tomando el límite como $h \rightarrow 0$, obtenemos

$$\frac{dP_0(t)}{dt} = P'_0(t) = -\lambda P_0(t) \quad (6.39)$$

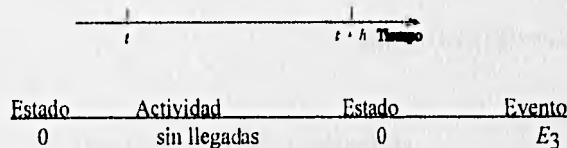


Figura 6.9 Estados del evento para un proceso de Poisson, caso del límite.

las ecuaciones 6.38 y 6.39 son ecuaciones diferenciales en $P_0(t), P_1(t), P_2(t), \dots$. Como el conjunto de ecuaciones diferenciales en diferencias es tedioso de resolver por métodos elementales, una solución a la ecuación 6.39 es por variables separables. El resultado de la solución

$$P_0(t) = e^{-\lambda t} \quad (6.40)$$

que puede ser insertado en (6.38) con $n = 1$, el resultado de la ecuación diferencial lineal

$$P'_1(t) + \lambda P_1(t) = \lambda e^{-\lambda t}$$

La cual puede ser resuelta sin mucha dificultad para $P_1(t)$. La expresión obtenida para $P_1(t)$ puede ser substituida en la ecuación 6.41 con $n = 2$, y así sucesivamente. Después de unos pocos pasos, el ejemplo se reduce a una forma general.

$$P_n(t) = \frac{e^{-\lambda t} (\lambda t)^n}{n!}, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (6.41)$$

Es bien conocido que la distribución de Poisson tiene media y varianza ambos iguales a sus parámetros. En el presente caso esto implica que si un proceso de Poisson con intensidad λ es observada por un largo tiempo t , la media y la varianza del número de llegadas $N(t)$ en ese intervalo son

$$E[N(t)] = \lambda t \quad (6.42)$$

y

$$\text{Var}[N(t)] = \lambda t \quad (6.43)$$

Ejemplo 6.6

Un proceso de Poisson tiene una intensidad (velocidad promedio de llegadas) $\lambda = 8$ llegadas por hora.

- ¿Cuál es la probabilidad que en la siguiente hora sean exactamente cinco llegadas?
- ¿Cuál es la probabilidad de que en la siguiente media hora haya como máximo tres llegadas?
- ¿Cuál es el número esperado en las siguientes dos horas? ¿en los siguientes 20 minutos?

Soluciones:

a) Tenemos $\lambda t = (8)(1) = 8$ entonces

$$P(5 \text{ llegadas}) = P_5(1) = \frac{e^{-8} 8^5}{5!} = 0.092$$

b) Para el periodo de media hora tenemos $\lambda t = (1/2)(8) = 4$

$$\begin{aligned}
 P(\text{al menos 3 llegadas}) &= P_0(1/2) + P_1(1/2) + P_2(1/2) + P_3(1/2) \\
 &= e^{-4} \left(1 + 4 + \frac{4^2}{2!} + \frac{4^3}{3!} \right) = 0.433
 \end{aligned}$$

c) Las respuestas son $\lambda t = 16$ en el primer caso y $\lambda t = 8/3$ en el segundo caso.

Otros ejemplos de procesos de tipo Poisson son:

- 1) El número de carros por unidad de tiempo pasando en un punto particular de observación
- 2) El número de clientes por unidad de tiempo entrando a una tienda de abarrotes, a una peluquería, etc..
- 3) El número de fallas por unidad de tiempo en un equipo.
- 4) El número de defectos por unidad de longitud de cable, cerea o tela.
- 5) El número de galaxias por unidad de volumen de espacio.

Consideramos el proceso de Poisson mostrada por el eje del tiempo que se enseña en la figura 6.10, con tiempo de llegadas t_1, t_2, t_3, \dots . El tiempo de llegada designado como $\{t_i\}$, son los tiempos que serían observados en un cronómetro empezando en algún instante etiquetado $t = 0$. Los periodos entre las llegadas de Poisson son tiempos que han transcurrido que deberían ser observados en un cronómetro puesto en cero para cada llegada de Poisson y se designará como $\{y_j\}$.

Dos observadores A y B están estacionados (en el tiempo $t = 0$) para observar el proceso de Poisson donde la intensidad es λ , hagamoslo continuo para observar hasta que la primera llegada ocurra en el tiempo $t_1 = y_1$, antes de que esto suceda en algún tiempo $t < t_1$ a cada observador se le preguntará para un reporte. Supongamos que A ha sido equipado con un cronómetro para registrar el tiempo de llegada. Si duda acerca del estado del sistema en el tiempo t , él podrá decidir "Desconozco cuál será el primer tiempo de intervalo, pero se que será mayor que el presente tiempo t ". En otra palabras, $Y > t$. El segundo observador B ha sido equipado con un contador: su trabajo es simplemente contar el número de llegadas en el tiempo t (antes de la primera llegada). Si duda acerca del estado del sistema, él podrá responder, "no he contado todavía algo", eso es, $N(t) = 0$, ahora estos enunciados

$$T > t$$

y

$$N(t) = 0$$

son simplemente dos descripciones del mismo evento, no hay llegadas para el tiempo t . Por lo tanto tienen la misma probabilidad y se escribe como

$$P(T > t) = P(N(t) = 0) \quad (6.44)$$

**ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

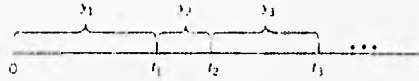


Figura 6.10 Proceso típico de Poisson y tiempo entre llegadas

En términos de Reglas de Probabilidad, el lado izquierdo de (6.44) es

$$P(T > t) = 1 - P(T \leq t) = 1 - F(t) \quad (6.45)$$

mientras el lado derecho para el proceso de Poisson de intensidad λ es

$$P[N(t) = 0] = P_0(t) = e^{-\lambda t} \quad (6.46)$$

de este modo el primer tiempo entre llegadas tiene la propiedad de la ecuación 6.45 y 6.46

$$1 - F(t) = e^{-\lambda t} \quad (6.47)$$

así

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (6.48)$$

debido al postulado 4 (el postulado estacionario), el segundo tiempo entre llegadas debe obedecer a las mismas reglas, como deberá el tercero, y así sucesivamente.

Otra importante característica de la distribución exponencial negativa puede ser discutida ahora. Imaginemos que una persona que pide aventones y que se posiciona al lado de una carretera solitaria donde el ha oído que el flujo de tráfico es una media de $\lambda = 6$ carros por hora. El entiende correctamente que en promedio un carro irá pasando cada 10 minutos. Después de estar de pie en el frío por 30 minutos, el puede pensar, "bien, no he visto algún carro durante mi larga espera, así por la ley del promedio hay una probabilidad extremadamente alta que un carro venga en los siguientes minutos o dos. ¿Está en lo correcto?". Desgraciadamente no. Veamos porque

Digamos, que la probabilidad de que deba esperar al menos 10 minutos más dado que ya ha esperado por 30 minutos. Si hacemos.

T = el tiempo de espera hasta el siguiente carro,

S = el tiempo que ya ha esperado,

t = el tiempo extra que el debe esperar, empezando ahora.

descamos conocer

$$P(T > t + S | T > S) \quad (6.49)$$

donde

$S = 30$ y $t = 10$. Recordando la regla para probabilidades condicionales, que

RECIBO EN SUJETO A LA LEY DE LA PROBABILIDAD

$$P(A|B) = \frac{P(A \cap B)}{P(B)}$$

escribimos (6.49) en la forma

$$\frac{P(T > t + S | T > S)}{P(T > S)} \quad (6.50)$$

ahora la intersección (y) de el evento $\{A: T > t + S\}$ con el evento $\{B: T > S\}$ es el evento $\{A: T > T + S\}$ si mismo. Por lo tanto la ecuación 6.50 puede ser escrita como

$$\frac{P(T > t + S)}{P(T > S)}$$

y aplicando la ecuación 6.47 para evaluar las probabilidades, obtenemos.

$$\begin{aligned} P(T > t + S | T > S) &= \frac{e^{-\lambda(t+s)}}{e^{-\lambda s}} \\ &= e^{-\lambda t} \end{aligned}$$

Esta ecuación puede ser puesta en las siguientes palabras. La posibilidad de esperar t minutos más, dado que allí ya ha ocurrido una espera de longitud S de algún tamaño (incluyendo cero), depende no del todo en la espera preliminar, sino solamente en el período adicional de interés. Esto no es falta de memoria, propiedad de la distribución exponencial negativa, es decir, que los componentes obedecen esta ley de falla "no tener historia"; ellos son siempre tan buenos como los nuevos hasta que fallan. Los fusibles trabajan como esto, ¿o no?. Cuando fallan, no es porque se hallan gastado, sino debido a un aumento de corriente, como una llegada de Poisson. Es por esta razón que la mitad de la porción (B) de la curva de la tina de baño en la figura 6.6 es correspondiente a un cambio de fallas. Componentes en esta parte de la curva fallarán, no porque se desgastaron, sino debido a influencias exteriores. La distribución normal considerada muestra una propiedad de memoria, entonces.

$$P(T > 100) \neq P(T > 600 | T > 500)$$

6.4 DISTRIBUCIÓN LOGARÍTMICA NORMAL

La distribución logarítmica normal es la distribución de una variable random cuyo logaritmo normal esta distribuida normalmente; en otras palabras, es la distribución normal con $\ln t$ como la variante. La función de densidad es

$$f(t) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln t - \mu}{\sigma}\right)^2\right] \quad \text{para } t \geq 0 \quad (6.51)$$

donde la media es

$$\exp\left(u + \frac{\sigma^2}{2}\right) \quad (6.52)$$

y la desviación estándar es

$$\left[\exp(2u + 2\sigma^2) - \exp(2u + \sigma^2)\right] \quad (6.53)$$

donde μ y σ son la media y la desviación estándar de $\ln t$

La distribución logarítmica normal es usada en el análisis de fiabilidad de la vida de los semiconductores y su fatiga de ciertos tipos de componentes. Su principal aplicación es realmente en el análisis de mantenibilidad.

6.5 DISTRIBUCIÓN EXPONENCIAL

Esta es probablemente la distribución más importante en el trabajo de la fiabilidad y es usada casi exclusivamente para la predicción de la fiabilidad de equipo electrónico. Esta describe la situación en donde la razón de riesgo es constante lo cual puede ser mostrado al ser generado por un proceso de Poisson. Esta distribución es de valor si es própiamente usada. Esta tiene la ventaja de :

- 1) Simple, parámetro fácilmente estimado (λ)
- 2) Matemáticamente muy manejable
- 3) Amplia aplicabilidad

Algunas aplicaciones particulares de este modelo incluyen:

- 1) Artículos cuya razón de falla no cambia significativamente con la edad.
- 2) Equipo complejo y reparable sin excesivas cantidades de redundancia

La función de densidad de falla es

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (6.54)$$

para $t > 0$, donde λ es la razón de falla, y la función de fiabilidad es

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (6.55)$$

la vida media (θ) = $1/\lambda$, y, para equipo reparable, la MTBF = $\theta = 1/\lambda$.

Ejemplo 6.7

Una computadora tiene una razón de error constante de un error cada 17 días de operación continua. ¿Cuál es la fiabilidad asociada con la computadora para resolver correctamente un problema que requiere cinco horas? Encontrar la razón de riesgo después de cinco horas de operación

$$\begin{aligned} \text{MTBF} &= (\theta) = 408 \text{ horas} \\ \lambda &= 1/\theta = 1/408 = 0.0024 \text{ fallas/hora} \\ R(5) &= e^{-\lambda t} = e^{-(0.0024)(5)} \\ &= e^{-0.012} = 0.99 \end{aligned}$$

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\lambda e^{-\lambda t}}{e^{-\lambda t}} = \lambda = 0.0024 \text{ fallas/horas}$$

6.6 DISTRIBUCIÓN GAMMA

La distribución gamma es usada en el análisis de fiabilidad para los casos en donde las fallas parciales pueden existir, esto es, cuando un número dado de fallas parciales deban ocurrir antes de que un artículo falle (por ejemplo, sistemas redundantes) o el tiempo para la segunda falla cuando el tiempo de falla es exponencialmente distribuido. La función de densidad de falla es

$$f(t) = \frac{\lambda}{\Gamma(\alpha)} (\lambda t)^{\alpha-1} e^{-\lambda t} \quad \text{para } t > 0 \quad (6.56)$$

donde

$$\mu = \frac{\alpha}{\lambda} \quad (6.57)$$

$$SD = \frac{\alpha^{1/2}}{\lambda} \quad (6.58)$$

y λ es la razón de falla (falla completa) y α el número de fallas parciales para fallas completas o eventos para generar una falla. $\Gamma(\alpha)$ es la función gamma

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} x^{\alpha-1} e^{-x} dx \quad (6.59)$$

la cual puede ser evaluada por medio de tablas estándar cuando $(\alpha - 1)$ es un entero positivo, $\Gamma(\alpha) = (\alpha-1)!$, la cual es generalmente el caso para muchos análisis de fiabilidad; por ejemplo, la situación de fallas parciales. Para este caso la función de densidad de falla es

$$f(t) = \frac{\lambda}{(\alpha - 1)} (\lambda t)^{\alpha - 1} e^{-\lambda t} \quad (6.60)$$

lo cual, para el caso de $\alpha = 1$ llega a ser la función de densidad exponencial. La distribución gamma puede también ser usada para describir un incremento o decremento en la razón de riesgo (falla). Cuando $\alpha > 1$, $h(t)$ incrementa; cuando $\alpha < 1$, $h(t)$ decrementa.

6.7 DISTRIBUCIÓN WEIBULL

La distribución de Weibull es particularmente útil en el trabajo de la fiabilidad y es una distribución general, la cual al ajustar los parámetros de distribución, puede ser hecha para modelar un amplio rango de características de vida para diferentes clases de artículos de ingeniería. La función de densidad de falla es

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t - \gamma}{\eta} \right)^{\beta - 1} \exp \left[- \left(\frac{t - \gamma}{\eta} \right)^{\beta} \right] \quad (6.61)$$

donde β es el parámetro de forma

η es el parámetro de escala o vida característica
(vida en la cual el 63.2% de la población habrá fallado)
 γ es la vida mínima

En muchas situaciones prácticas de fiabilidad, γ es a menudo cero (falla asumida para empezar en $t = 0$) y la función de densidad de falla es

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta} \right)^{\beta - 1} \exp \left[- \left(\frac{t}{\eta} \right)^{\beta} \right] \quad (6.62)$$

y las funciones de fiabilidad y de razón de falla son

$$R(t) = \exp \left[- \left(\frac{t}{\eta} \right)^{\beta} \right] \quad (6.63)$$

$$h(t) = \left(\frac{\beta}{\eta} \right) \left(\frac{t}{\eta} \right)^{\beta - 1} \quad (6.64)$$

dependiendo de el valor de β , la función de Weibull puede tomar la forma de las siguientes distribuciones:

$\beta < 1$ Gamma

$\beta = 1$ Exponencial

$\beta = 2$ Logaritmica Normal
 $\beta = 3.5$ Normal (aproximadamente)

Ejemplo 6.8

Los tiempos de falla en un equipo de transmisión en particular tienen los siguientes parámetros $\beta = 2$ y $\eta = 1000$ horas (considere a η algo relacionado a MTF). Encontrar la fiabilidad del equipo para una misión de tiempo de 100 horas, y la razón de riesgo después de que el equipo ha operado exitosamente 100 horas.

$$R(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right]$$

$$R(100) = \exp\left[-\left(\frac{100}{1000}\right)^2\right] = \exp^{-(0.1)^2} \approx 0.99$$

$$h(t) = \left(\frac{\beta}{\eta}\right)\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} = \left(\frac{2}{1000}\right)\left(\frac{100}{1000}\right)^{2-1} = 0.0002 \text{ fallas/hora}$$

6.8 DISTRIBUCIÓN BINOMIAL

La distribución binomial es usada para aquellas situaciones en las cuales hay solamente dos resultados, éxito o falla, y la probabilidad permanece siendo la misma para todas las pruebas. La función de densidad de la distribución binomial es

$$f(x) = \binom{n}{x} p^x q^{(n-x)} \quad (6.65)$$

$$f(x) = \binom{n}{x} = \frac{n!}{(n-x)!x!} \text{ y } q = 1 - p \quad (6.66)$$

$f(x)$ es la probabilidad de obtener exactamente x artículos buenos y $(n-x)$ artículos malos en una muestra de n artículos donde p es la probabilidad de obtener un buen artículo (éxito) y q o $(1 - p)$ es la probabilidad de obtener un mal artículo (falla). La función de distribución acumulativa (CDF), esto es, la probabilidad de obtener r o pocos éxitos en n llegadas, esta dado por

$$F(x; r) = \sum_{x=0}^r \binom{n}{x} p^x q^{(n-x)} \quad (6.67)$$

VII. CONFIGURACIONES BÁSICAS.

SISTEMAS MULTICOMPONENTES

DISEÑANDO PARA UNA MÁXIMA FIABILIDAD

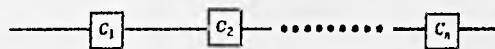
La simplificación en la operación y en el diseño de cualquier equipo son características fundamentales en el ingeniero. Esto no necesariamente significa reducir el número de componentes, sino que hay que reconsiderar las características del equipo con el objeto de eliminar casi todas las operaciones innecesarias para que el equipo realice su función. Con la eliminación de estas operaciones se creará un equipo menos complejo, el cual será más fácil de fabricar, de mantener y por lo tanto, más confiable.

LA FIABILIDAD A TRAVÉS DE LA REDUNDANCIA

Debido a que cada vez se requiere una fiabilidad más alta, se ha tenido que usar diferentes técnicas para mejorar el equipo, particularmente en los vehículos no tripulados o misiles guiados. Una técnica la cual está favoreciendo el incremento de la fiabilidad es el de la redundancia. Ésta técnica consiste esencialmente en el uso de elementos duplicados, en donde cada uno de los circuitos proporciona una función determinada. Generalmente los elementos están conectados en paralelo, así que cada elemento en paralelo puede funcionar independientemente de el otro y cada uno puede ejecutar la función deseada. En este arreglo de elementos, la falla de un solo elemento no constituye la falla del sistema.

7.1 SISTEMAS SERIE Y PARALELO

La configuración más simple y quizás la más común en el modelado de la fiabilidad es el **sistema serie**. Este sistema se caracteriza por el hecho de que todos sus componentes están relacionados de manera que el sistema completo deja de funcionar si alguno de sus componentes falla (figura 7.1).



donde C_1 es el primer componente.

C_2 es el segundo componente.

:

C_n es el n -ésimo componente.

Figura 7.1 Sistema serie

Los componentes C_1 y C_2 pueden ser subdivididos, si es necesario, en varias subdivisiones de más componentes.

La fiabilidad del sistema serie tiene la forma.

$$\begin{aligned}
 R_{\text{SYS}} &= P(\text{El sistema trabaja}) \\
 &= P(\text{Todos los componentes trabajan}) \\
 &= P(C_1 \text{ trabaja}) P(C_2 \text{ trabaja} \mid C_1 \text{ trabaja}) \dots P(C_n \text{ trabaja} \mid C_1, \dots, C_{n-1} \text{ trabaja})
 \end{aligned}
 \tag{7.1}$$

Es conveniente asumir la independencia entre varios componentes, esto puede algunas veces ser hecho apropiadamente, especialmente si los componentes que son probables a fallar son considerados como una simple unidad, es decir, que el rendimiento de cualesquiera de las partes no afecta la fiabilidad de las otras. Cuando la suposición de independencia es hecha, la ecuación 7.1 llega a ser

$$\begin{aligned}
 R &= R_{\text{SYS}} = P(C_1 \text{ trabaja}) P(C_2 \text{ trabaja}) \dots P(C_n \text{ trabaja}) \\
 &= R_1 R_2 \dots R_n \\
 &= \prod_{i=1}^n R_i(t)
 \end{aligned}
 \tag{7.2}$$

La ecuación 7.2 nos muestra que un sistema en serie es mucho menos confiable que algunos de sus elementos individuales. Por ejemplo, un sistema con 10 componentes equivalentemente confiables con una $R_1 = .99$, tiene una fiabilidad solamente de .90. Para 20 componentes la fiabilidad del sistema es solamente de .82.

Ejemplo 7.1

¿Qué tan buenos deben ser los componentes (individuales e idénticos) de un sistema serie de 6 componentes para que el sistema tenga una fiabilidad de al menos .95?

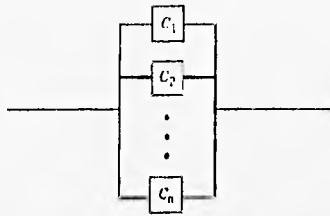
Solución:

$$(R_1)^6 \geq .95$$

resolviendo para R_1

$$R_1 \geq (.95)^{1/6} = .9915$$

Otra configuración es el **sistema paralelo** (figura 7.2), este sistema sólo deja de funcionar si todos sus componentes fallan.



donde C_1 es el primer componente.
 C_2 es el segundo componente.
 \vdots
 C_n es el n -ésimo componente.

Figura 7.2 Sistema paralelo

La independencia es otra vez asumida entre los componentes, así para $n = 1$, la fiabilidad del sistema es

$$R = R_{sys} = P(C_1 \text{ trabaja}) \\ = R_1$$

para $n = 2$, la fiabilidad del sistema es

$$R = R_{sys} = P(C_1 \text{ ó } C_2 \text{ trabajan}) \\ = R_1 + R_2 - R_1 R_2 \quad (7.3)$$

como se puede ver es una analogía del diagrama de Venn figura 7.3, para $n = 3$, la fiabilidad del sistema es

$$R = P(\text{al menos uno de los } C_1, C_2, C_3 \text{ trabaja}) \\ = R_1 + R_2 + R_3 - R_1 R_2 - R_1 R_3 - R_2 R_3 + R_1 R_2 R_3 \quad (7.4)$$

para $n = 4$ la fiabilidad del sistema es

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 - R_1 R_2 - R_1 R_3 - R_1 R_4 - R_2 R_4 - R_3 R_4 - R_2 R_3 + R_1 R_2 R_3 + \\ R_1 R_2 R_4 + R_1 R_3 R_4 - R_2 R_3 R_4 - R_1 R_2 R_3 R_4 \quad (7.5)$$

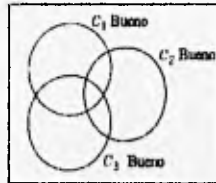


Figura 7.3 Diagrama de Venn para 3 componentes en paralelo

con un incremento de n , la expresión del sistema crece. De este modo es oportuno usar la forma de eventos complementarios. Así para $n = 2$ la fiabilidad del sistema es la probabilidad que ambos artículos no fallen simultáneamente, eso es

$$\begin{aligned}
 R &= 1 - P(\text{ambos fallan}) \\
 &= 1 - P(C_1 \text{ falla}) P(C_2 \text{ falla}) \\
 &= 1 - (1 - R_1)(1 - R_2)
 \end{aligned} \tag{7.6}$$

que es equivalente para la ecuación 7.3. Para $n = 4$ podríamos escribir

$$\begin{aligned}
 R &= 1 - P(\text{todos fallan}) \\
 &= 1 - P(C_1 \text{ falla}) \dots P(C_4 \text{ falla}) \\
 &= 1 - (1 - R_1)(1 - R_2)(1 - R_3)(1 - R_4)
 \end{aligned}$$

lo cual es equivalente para la ecuación 7.5. La expresión para n en general es

$$R_{sys} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i) \tag{7.7}$$

la cual es más fácil de usar.

Ejemplo 7.2

Una ama de casa necesita una caja de un cierto tipo de alimento para hacer una comida y esta no puede ser llevada por alguna tienda. Ella no tiene carro pero tiene dos niños con bicicletas, y hay dos tiendas de abarrotes. La tienda A tiene una probabilidad de .5 y la tienda B tiene una probabilidad de .7. Asumiendo que los niños son perfectamente confiables, ¿Cuál es la probabilidad de que ella pueda hacer la comida si ella envía a cada niño a una tienda?. Su situación es igual a un sistema paralelo $R_1 = .5$ y $R_2 = .7$, entonces

$$R_{sys} = .5 + .7 - (.5)(.7) = .85$$

o

$$R_{sys} = 1 - (1 - .5)(1 - .7) = .85$$

Hay que notar que el sistema en paralelo es más confiable que cualquiera de sus componentes individuales.

Ejemplo 7.3

¿Qué tan baja puede ser la fiabilidad de 5 componentes equivalentes en paralelo si el sistema debe tener una fiabilidad de al menos .95?

Solución:

$$R_{s,y} = 1 - (1 - R_i)^5 \geq .95$$

de modo que

$$R_i \geq 1 - (.05)^{1/5} = .45$$

También hay configuraciones mixtas. Ambas configuraciones se muestran en la figura 7.4. Puede ser considerado como diferentes formas de incorporar redundancia dentro del sistema más básico que originalmente consiste de C_1 y C_2 en serie. La pregunta es si los componentes C_1 y C_2 deberían ser protegidos por elementos individualmente redundantes como la figura 7.4.b o como un par figura 7.4.a.

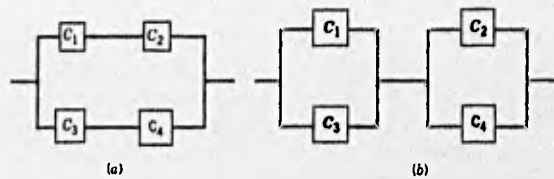


Figura 7.4 Configuraciones mixtas

La configuración (b) es de hecho la más fiable de las dos, considerando la diferencia de las dos fiabilidades del sistema $R_b - R_a$ cuya forma tiene

$$\begin{aligned} R_b - R_a &= (R_1 + R_3 - R_1R_3)(R_2 + R_4 - R_2R_4) - (R_1R_2 + R_3R_4 - R_1R_2R_3R_4) \\ &= R_1R_4 + R_2R_3 - R_1R_2R_4 - R_2R_3R_4 - R_1R_2R_3 - R_1R_3R_4 + 2R_1R_2R_3R_4 \quad (7.8) \\ &= R_1R_4(1 - R_2 - R_3 + R_2R_3) + R_2R_3(1 - R_4 - R_1 + R_1R_4) \\ &= R_1R_4(1 - R_2)(1 - R_3) + R_2R_3(1 - R_1)(1 - R_4) \quad (7.9) \end{aligned}$$

Entonces cada factor y por lo tanto cada término en la ecuación 7.9 es positivo, esto aparenta que $R_b - R_a > 0$ y que la configuración (b) sea más fiable que la configuración (a).

7.2 SISTEMAS NI EN SERIE NI EN PARALELO

Hay configuraciones de equipo que no caen dentro de los tipos mencionados en la sección 7.1. Estos son algunas veces llamados sistemas "complejos". Tal sistema es mostrado gráficamente en la figura 7.5. La regla del componente *C* es difícil definir excepto para decir que esta presencia parece incrementar la fiabilidad del sistema; la función del sistema obviamente funciona adecuadamente sin ésta.

Hay tres métodos para llegar a la fiabilidad del sistema. Estas son por Enumeración, Ruta delineada y condicionado a un elemento clave.

Método 1: Enumeración

Es conveniente usar la siguiente notación:

A = El evento del componente *A* es bueno.

\bar{A} = El evento del componente *A* está fallando.

$a = P(A)$.

$1-a = P(\bar{A})$.

Podemos usar una notación similar para los demás componentes. Entonces cada uno de los componentes puede tener uno de los 2 estados (funciona o falla) y hay 2^5 posibles configuraciones para el sistema listado en la tabla 7.1. Cada configuración es comparada con la figura 7.5 para ver si el sistema puede funcionar con esa configuración. Una marca al lado de la configuración, en la tabla 7.1, indica una condición satisfactoria. La fiabilidad del sistema puede ser escrita como

$$R = abcde + (1-a)bcde + a(1-b)cde + ab(1-c)de + abc(1-d)e + abcd(1-e) + (1-a)b(1-c)de + (1-a)bc(1-d)e + (1-a)bcd(1-e) + a(1-b)(1-c)de + a(1-b)c(1-d)e + a(1-b)cd(1-e) + ab(1-c)(1-d)e + ab(1-c)d(1-e) + a(1-b)(1-c)d(1-e) + (1-a)b(1-c)(1-d)e \quad (7.13)$$

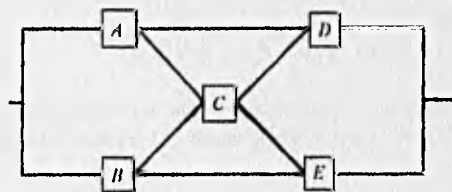


Figura 7.5 Sistema ni serie ni paralelo

después de la reducción algebraica, la ecuación 7.13 se reduce a

$$R = ad + be + ace + bed - acde - abcd - abde - abce - bcde + 2abcde \quad (7.14)$$

Es evidente que la construcción de la lista en la tabla 7.1 es una operación tediosa, llegando a ser imposible al aproximarse para $n > 5$. La alternativa, si el método de enumeración es usado, es desarrollar un programa de computadora para hacer la tabla. Empezando con el listado de los enteros de 0 a $2^n - 1$ en forma binaria, destacando los ceros en todas las n posiciones. De este modo para el ejemplo $n = 5$

decimal 0 es expresado 00000.
 decimal 1 es expresado 00001.
 :
 decimal 31 es expresado 11111.

$ABCDE$ ✓	$\bar{A}BCDE$	$AB\bar{C}DE$	$A\bar{B}\bar{C}DE$
	$\bar{A}\bar{B}CDE$ ✓	$A\bar{B}C\bar{D}E$	$\bar{A}\bar{B}CDE$
$\bar{A}BCDE$ ✓	$\bar{A}BC\bar{D}E$ ✓	$AB\bar{C}DE$ ✓	$\bar{A}\bar{B}\bar{C}DE$
$A\bar{B}CDE$ ✓	$\bar{A}\bar{B}CDE$ ✓	$A\bar{B}\bar{C}DE$	$\bar{A}\bar{B}\bar{C}\bar{D}E$
$AB\bar{C}DE$ ✓	$A\bar{B}\bar{C}DE$ ✓	$\bar{A}BC\bar{D}E$	$\bar{A}\bar{B}\bar{C}DE$
$ABC\bar{D}E$ ✓	$\bar{A}BC\bar{D}E$ ✓	$\bar{A}BCDE$	
$ABCDE$ ✓	$\bar{A}BCDE$ ✓	$\bar{A}\bar{B}CDE$ ✓	$\bar{A}\bar{B}\bar{C}DE$
	$AB\bar{C}\bar{D}E$ ✓	$\bar{A}\bar{B}CDE$	
	$AB\bar{C}DE$ ✓	$\bar{A}\bar{B}CDE$	
	$ABC\bar{D}E$	$\bar{A}\bar{B}\bar{C}DE$	

Tabla 7.1 Posibles estados para el sistema de la figura 7.5

La correspondencia uno a uno es establecido entre los componentes $\{A, B, C, D, E\}$ del diagrama y la posición i ($i = 1, \dots, 5$) del número binario, con un cero binario que indica que el componente es malo y un uno binario indica que el componente es bueno.

Por ejemplo, el número binario 1011 colocado para $\bar{A}B\bar{C}CDE$ y 11011 para $AB\bar{C}DE$. En la tabla 7.2 se muestra un extracto

Forma decimal	Forma binaria	Forma literal
0	0000	$\overline{A}\overline{B}\overline{C}\overline{D}\overline{E}$
1	0001	$\overline{A}\overline{B}\overline{C}D\overline{E}$
2	0010	$\overline{A}\overline{B}C\overline{D}\overline{E}$
3	0011	$\overline{A}\overline{B}CD\overline{E}$
4	0100	$\overline{A}B\overline{C}\overline{D}\overline{E}$
5	0101	$\overline{A}B\overline{C}D\overline{E}$
6	0110	$\overline{A}BC\overline{D}\overline{E}$
7	0111	$\overline{A}BCDE$
...
29	11101	$ABC\overline{D}E$
30	11110	$ABCD\overline{E}$
31	11111	$ABCDE$

Tabla 7.2 Correspondencia binaria a literal para la tabla 7.1

Método II: Ruta Delineada

Examinando otra vez la figura 7.5 vemos que el sistema funcionará si los siguientes componentes son buenos

$$\left. \begin{array}{l} A y D \\ A y C y E \\ B y C y D \\ B y E \end{array} \right\} \quad (7.15)$$

Claro, uno podría también listar las combinaciones

$A y C y D$
 $B y C y E$

Pero entonces hay subconjuntos de los primeros y de los últimos eventos en el evento 7.15. Esto puede ser visto como sigue. Supongamos que se coloca para el evento {Ambos, A y D son buenos}

Puede ser visto como

$$\begin{aligned} P &= [(A \text{ y } D \text{ funcionen}) \text{ o } (A \text{ y } C \text{ y } D \text{ funcionen})] \\ &= P(G \text{ o } GC) = P(G) + P(GC) - P(GGC) \end{aligned}$$

$$= P(G) + P(GC) - P(GC) = P(G) = P(A \text{ y } D \text{ funcionan}) \quad (7.16)$$

Usando la lista no redundante de la ecuación 7.15, la fiabilidad del sistema es

$$\begin{aligned} R &= P(AD \text{ o } ACE \text{ o } BCD \text{ o } BE) \\ &= P(AD) + P(ACE) + P(BCD) + P(BE) - P(ACDE) - P(ABCD) - P(ABDE) - P(ABCDE) \\ &\quad - P(ABCE) - P(BCDE) + P(ABCDE) + P(ABCDE) + P(ABCDE) + P(ABCDE) - \\ &\quad P(ABCDE) \end{aligned} \quad (7.17)$$

$$= P(AD) + P(ACE) + P(BCD) + P(BE) - P(ACDE) - P(ABCD) - P(ABDE) - P(ABCE) - P(BCDE) + 2P(ABCDE) \quad (7.18)$$

$$= ad + be + ace + bcd - acde - abcd - abde - abce - bcde + 2abcde \quad (7.19)$$

la cual coincide con la ecuación 7.14

Método III: Método del Elemento Clave

Con esta técnica escogemos un elemento "clave" para escribir las bases de algunos enunciados de probabilidad condicional. Es probablemente más provechoso escoger un elemento complicado, eso es, uno que prevenga al sistema de ser descompuesto dentro de sencillos subconjuntos en serie y paralelo, pero esto no es necesario. La técnica puede ser usada cuando no sea tan complicado y el elemento esté presente. En nuestro ejemplo el componente C es seleccionado como el elemento clave. Entonces, usando la regla de descomposición de probabilidad tenemos

$$\begin{aligned} R &= P(\text{el sistema funciona} | C)P(C) + P(\text{el sistema funciona} | \bar{C})P(\bar{C}) \\ &= P(AD \text{ o } BE \text{ o } AE \text{ o } BD)P(C) + P(AD \text{ o } BE)P(\bar{C}) \quad (7.20) \\ &= c(ad + be + ae + bd - abde - ade - abd - ahe - bde - abde + abde + abde + abde - abde) \\ &\quad + (1 - c)(ad + be - abde) \\ &= c(ad + be + ae + bd - ade - abd + abde - abe - bde) + (1 - c)(ad + be - abde) \\ &= ad + be + ace + bcd - acde - abcd - abce - bcde - abde + 2abcde \end{aligned} \quad (7.21)$$

lo cual es lo mismo que (7.14) y (7.19)

En el evento todos los componentes son equitativamente confiables, así que $a = b = c = d = e = r$, la fiabilidad del sistema se reduce a

$$R = 2r^2 + 2r^3 - 5r^4 + 2r^5 \quad (7.22)$$

Esta es una expresión interesante porque vemos una potencia muy alta en el polinomio que es de 5, el número de componentes en el sistema y la potencia más baja es de dos, el número mínimo de componentes que debe funcionar para que el sistema funcione.

Es importante convertir las configuraciones complejas en su equivalente serie y paralelo cada vez que sea posible, entonces estos equivalentes son mucho más fáciles de analizar. Algunas veces los métodos delta-estrella de la siguiente sección, pueden ser útiles.

Es fácil concebir un sistema cuya estructura que no esta en serie o paralelo no puede ser reducida y cuyo número de componentes proporciona un método no atractivo o no factible. Usaremos la configuración de la fig. 7.6, donde es más conveniente indicar los componentes como $\{C_1, C_2, C_3, C_4, C_5\}$. Los límites son obtenidos al calcular la fiabilidad del sistema que deberían ser formuladas usando todos los componentes del sistema en serie para el límite inferior y usando todos los componentes en paralelo para el límite superior. Como un conjunto de límites es tosco porque la falla considera la actual estructura de el sistema, los mejores límites pueden ser obtenidos aplicando los conceptos de rutas mínimas y cortes mínimos

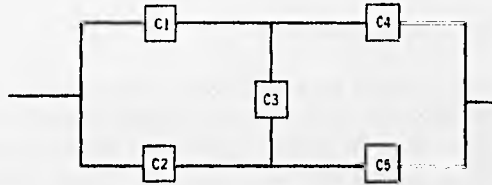


Figura 7.6 Red de puente simple

Una **ruta mínima** es un conjunto mínimo de componentes que asegura la funcionalidad de del sistema. La enumeración de varias rutas mínimas para el ejemplo fué realizado en la ecuación 7.17. Un **corte mínimo** es un conjunto mínimo de componentes cuyas fallas garantizan la falla del sistema. Para el ejemplo de la figura 7.6 las rutas y cortes mínimos son:

RUTAS MÍNIMAS

C_1, C_4
 C_2, C_5
 C_1, C_3, C_5
 C_2, C_3, C_4

CORTES MÍNIMOS

C_1, C_2
 C_4, C_5
 C_1, C_3, C_5
 C_2, C_3, C_4

Note que un conjunto de componentes puede constituir a ambos cortes y rutas mínimas. Basados en las rutas y cortes, dos sistemas auxiliares son construidos. La Red auxiliar N_1 , (figura 7.7a), está compuesta por una configuración en paralelo de todos los elementos de la ruta mínima en serie.

Esta fiabilidad R_{N_1} , es un **límite superior** para el sistema original, el valor es

$$R_{N1} = 1 - (1 - r_1 r_4)(1 - r_2 r_5)(1 - r_1 r_3 r_5)(1 - r_2 r_3 r_4) \quad (7.23)$$

la Red Auxiliar N_2 figura 7.7b está compuesta de la configuración serie de todos los elementos de corte mínimo en paralelo. Esta fiabilidad R_{N2} , es un límite inferior para el sistema original; el valor es

$$R_{N2} = [1 - (1 - r_1)(1 - r_2)][1 - (1 - r_4)(1 - r_5)][(1 - (1 - r_1)(1 - r_3)(1 - r_5))][1 - (1 - r_2)(1 - r_3)(1 - r_4)] \quad (7.24)$$

Ejemplo 7.4

Suponga que todos los componentes de la figura 7.6 son idénticos o que tienen una fiabilidad equivalente de .9. Tomando la ecuación 7.22, tenemos que la fiabilidad exacta del sistema es de $R = .97848$. El límite inferior $(.9)^5 = .590$ y el límite superior es $1 - (1 - .9)^5 = .99999$.

El límite superior mejorado usando la ecuación 7.23 es

$$R_U = 1 - (1 - .9^2)^2(1 - .9^3)^2 = .99735$$

y el límite inferior mejorado tomando la ecuación 7.24 es

$$R_L = [1 - (.1)^2]^2 [1 - (.1)^3]^2 = .97814$$

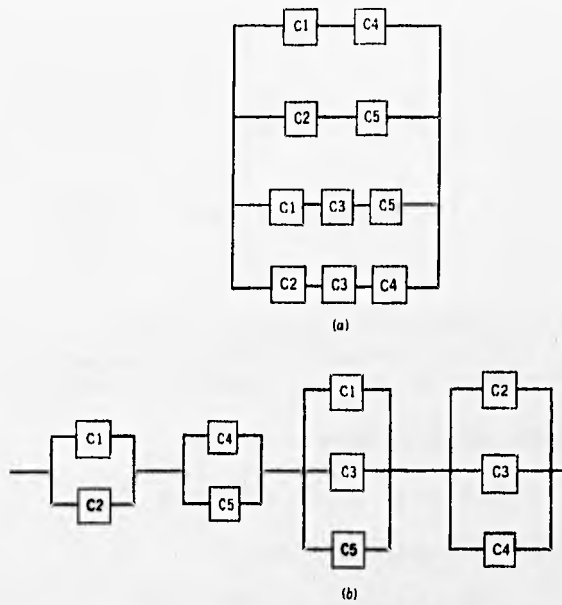


Figura 7.7 Configuración auxiliar para calcular los límites superior e inferior.
(a) Red N_1 , (b) Red N_2 .

7.3 CONFIGURACIONES DELTA Y ESTRELLA

Una técnica que algunas veces es útil para simplificar los cálculos de fiabilidad para los sistemas complejos, es convertir un conjunto de 3 componentes en configuración delta y a otro conjunto de 3 componentes en configuración estrella como se ve en la figura 7.8

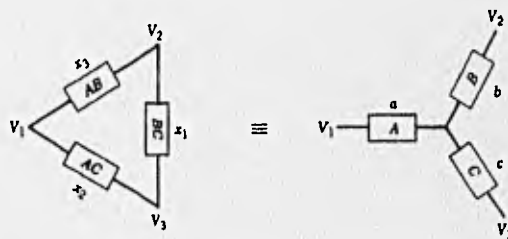


Figura 7.8 Equivalencia delta-estrella.

Las configuraciones delta y estrella son equivalentes, en lo que concierne a la fiabilidad si, dado los componentes delta AB , AC y BC , los correspondientes componentes estrella con elegidos apropiadamente, basados en el siguiente razonamiento. Para obtener el vértice V_1 al vértice V_3 de la delta, uno puede recorrer el elemento AC solamente, o ir a través de AB y entonces BC . En la estrella para obtener el vértice V_1 al vértice V_3 , uno debe recorrer el elemento A y entonces el elemento C . De este modo podemos afirmar que

Estrella : A y C en serie

es equivalente a

Delta (AB en serie con BC) paralelo con AC

Por lo tanto

$$R_A R_C = R_{AC} + R_{AB} R_{BC} \cdot R_{AB} R_{BC} R_{AC} \quad (7.25a)$$

y similarmente para el otro par de vértices (V_1 con V_2 y V_2 con V_3)

$$R_B R_C = R_{BC} + R_{AB} R_{AC} \cdot R_{AB} R_{BC} R_{AC} \quad (7.25b)$$

$$R_A R_B = R_{AB} + R_{AC} R_{BC} \cdot R_{AB} R_{BC} R_{AC} \quad (7.25c)$$

Es conveniente para simplificar la notación dejar

$$\begin{array}{lll} x_1 = R_{BC}, & x_2 = R_{AC}, & x_3 = R_{AB}, \\ a = R_A, & b = R_B, & c = R_C \end{array}$$

y ésta notación es indicada en las gráficas de la figura 7.8. Luego el conjunto de ecuaciones (7.25a-c) después de alguna reordenación.

$$bc = x_1 + x_2 x_3 - x_1 x_2 x_3 = E_1 \quad (7.26a)$$

$$ac = x_2 + x_1 x_3 - x_1 x_2 x_3 = E_2 \quad (7.26b)$$

$$ab = x_3 + x_1 x_2 - x_1 x_2 x_3 = E_3 \quad (7.26c)$$

Hay un conjunto de tres ecuaciones cuadráticas en a , b y c . La solución técnica involucra el truco de multiplicar las tres ecuaciones juntas para obtener

$$a^2 b^2 c^2 = E_1 E_2 E_3$$

así que

$$abc = \sqrt{E_1 E_2 E_3} = E_4 \quad (7.27)$$

y dividiendo la ecuación 7.27 y regresando cada conjunto de ecuaciones (7.26a-c) el resultado es

$$a = E_4 / E_1 \quad (7.28a)$$

$$b = E_4 / E_2 \quad (7.28b)$$

$$c = E_4 / E_3 \quad (7.28c)$$

Ejemplo 7.5

La confiabilidad del componente Delta es $x_1 = 0.7$, $x_2 = 0.8$, $x_3 = 0.9$. Entonces

$$E_1 = .7 + .72 - .504 = .916$$

$$E_2 = .8 + .63 - .504 = .926$$

$$E_3 = .9 + .56 - .504 = .956$$

$$E_4 = \sqrt{(.916)(.926)(.956)} = .900497$$

Por lo tanto las fiabilidades de los componentes estrella son:

$$a = .983\ 075\ 115$$

$$b = .972\ 458\ 753$$

$$c = .941\ 942\ 265$$

(obviamente es ridículo acarrear muchas cifras pero será necesario después para resolver el problema inversamente)

En el evento en que una estrella es dada y el delta correspondiente es deseado, el conjunto de ecuaciones 7.26a-c debería de ser resuelto para las x 's. El procedimiento es resolver cada miembro del conjunto de ecuaciones de 7.26a-c por uno de los desconocidos. Específicamente, tenemos

$$x_1 = \frac{bc - x_2x_3}{T - x_2x_3} \quad (7.29a)$$

$$x_2 = \frac{ac - x_1x_3}{T - x_1x_3} \quad (7.29b)$$

$$x_3 = \frac{ab - x_1x_2}{T - x_1x_2} \quad (7.29c)$$

Los valores de prueba x_2 y x_3 son introducidos a la ecuación 7.29a y la solución correspondiente x_1 , junto con los valores de prueba x_3 , son introducidos en la ecuación 7.29b para llegar a un valor mejorado x_2 , etcetera. El proceso del ciclo de iteraciones es repetido tan grande como se desea. Diez iteraciones son generalmente adecuadas para una precisión de cinco dígitos, no importa en que valores se comience a probar. Para demostrar la solución técnica, usamos los datos del ejemplo 7.5, empezando con a , b , c como valores dados, y con la solución correcta conocida (.7, .8, .9).

La tabla 7.3 muestra los resultados de tres iteraciones serie con valores de razonable comienzo (*, .6, .6), una con un valor pobre que comienza (*, .1, .1) y otra con la verdadera solución.

La mayor facultad de la delta-estrella es la utilidad de transformar sistemas complejos como el puente de la figura 7.9a. En la figura 7.9b la red a sido reetiquetada en reconocimiento de la formación delta de los elementos 1, 2 y 3, y en la figura 7.9c el delta es reemplazado por su correspondiente estrella. Las transformaciones de la ecuación 7.26 no son enteramente correctos, pues no produce los resultados correctos cuando la estrella y la delta son encajadas en un sistema con otros elementos. El ejemplo 7.6 ilustra la dificultad.

Iteración Número

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
x_1	*	.8687	.7149	.6886	.6918	.6957	.6979	.6990	.6995	.6998	.6999
x_2	.6	.8454	.8166	.8074	.8036	.8017	.8008	.8004	.8002	.8001	.8000
x_3	.6	.8343	.8943	.9009	.9009	.9005	.9003	.9001	.9001	.9000	.9000

Iteración Número

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
x_1	*	.9152	.7943	.6780	.6823	.6905	.6953	.6977	.6989	.6995	.6997
x_2	.1	.9185	.8383	.8160	.8078	.8038	.8019	.8009	.8004	.8002	.8001
x_3	.1	.7240	.8817	.9015	.9020	.9011	.9006	.9003	.9001	.9001	.9000

Iteración Número

	0	1
x_1	*	.700000000
x_2	.8	.800000000
x_3	.9	.900000000

Tabla 7.3 Soluciones al problema delta-estrella del ejemplo 7.5

Ejemplo 7.6

En la figura 7.9 tenemos las cinco fiabilidades de los componentes

$$r_1 = .90 \quad r_2 = .95 \quad r_3 = .99 \quad r_4 = .85 \quad r_5 = .93$$

! cuidado con la notación i , los componentes C_1 , C_2 y C_3 en la figura 7.9 corresponden a AB , AC y BC respectivamente en la figura. 7.8, de modo que r_3 debe ser usada como x_1 y r_1 como x_3 en (7.26). Los elementos de la configuración estrella tiene fiabilidades,

$$a = .995022$$

$$b = .999024$$

$$c = .999526$$

y la fiabilidad del sistema es entonces calculado como .984450. Pero si usamos la fórmula exacta dada por las ecuaciones 7.14 ó 7.19, tenemos un sistema con fiabilidad de .984433. El error es trivial en este problema en particular. Rosenthal derivó la fórmula exacta para el error en el evento en que todos los componentes tienen la misma fiabilidad. La fiabilidad exacta del puente de la red, de la ecuación 7.14 es

$$R_S = 2r^2 + 2r^3 - 5r^4 + 2r^5 \quad (7.30)$$

Expresando el conjunto de ecuaciones 7.26, 7.27 y 7.28 en términos de $x_1 = x_2 = x_3 = r$, es decir

$$\begin{aligned} E_1 = E_2 = E_3 &= r + r^2 - r^3 \\ E_4 &= (r + r^2 - r^3)^{3/2} \\ a = b = c &= (r + r^2 - r^3)^{1/2} = r_S \end{aligned} \quad (7.31)$$

la fiabilidad del sistema, hasta la sustitución sería entonces

$$r_S [2rr_S - r^2 r_S^2] = (r + r^2 - r^3)^{1/2} [2r(r + r^2 - r^3)^{1/2} - r^2 (r + r^2 - r^3)] \quad (7.32)$$

Es bastante evidente que las ecuaciones 7.30 y 7.32 no son iguales. ¿Cuál es la razón de esta discrepancia?. Esto parece que la fórmula simétrica del conjunto de ecuaciones 7.25 es la culpable, entonces no se toma en consideración la dirección en la cual "la energía está fluyendo" a través del sistema; eso es, ignorar cuales nodos de el delta y estrella son nodos de "entrada" y cuales son nodos de "salida". Gupta y Sharma resolvieron el problema. En primer lugar, la direccionalidad debe ser reconocida. Suponemos que el nodo V_1 es un nodo de entrada y que V_2 y V_3 son nodos de salida. Hay 3 eventos a considerar.

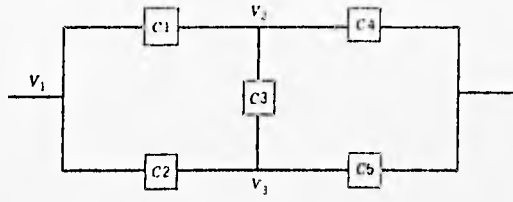
- H_1 : El flujo de energía a través de BC es de V_2 a V_3
- H_2 : El flujo de energía a través de BC es de V_3 a V_2
- H_3 : No hay flujo de energía a través de BC a todos.

Estos tres eventos pueden ser representados gráficamente como en la figura 7.10. En estos tres casos, el correspondiente comportamiento de el sistema puede ser representado como en la figura 7.11. La ecuación de la figura 7.11a es

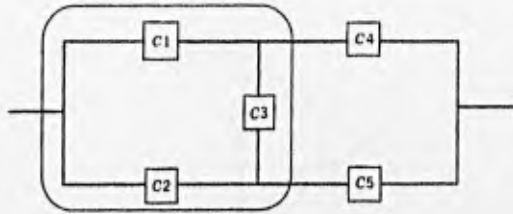
$$ac = x_2 + x_1 x_3 - x_1 x_2 x_3$$

y de la figura 7.11b

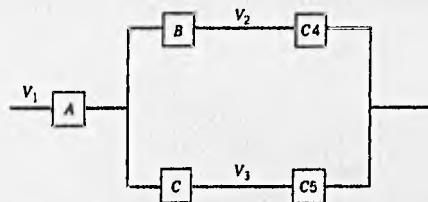
$$ab = x_3 + x_1 x_2 - x_1 x_2 x_3$$



a) Red de puente original

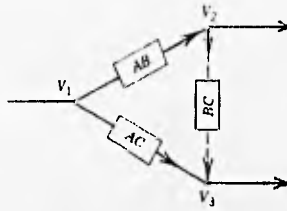


b) reconociendo y etiquetando el delta

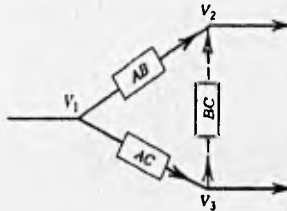


c) reemplazando el delta por su dual estrella

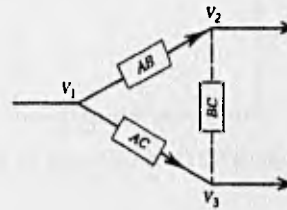
Figura 7.9 Reducción de una red con puente



a) flujo de energía a través de BC de V_2 a V_3 (Evento H_1)



b) flujo de energía a través de BC de V_3 a V_2 (Evento H_2)



c) no hay flujo de energía a través de BC (Evento H_3)

Figura 7.10 Descripción de los tres casos de "flujo de energía".

Estas ecuaciones se parecen a las ecuaciones 7.26b y 7.26c. La figura 7.11c puede ser interpretada como sigue. El delta truncado a la izquierda funcionará mientras AB o AC es bueno. Así

$$R(\text{delta}) = x_2 + x_3 - x_2x_3 \quad (7.33)$$

Esta expresión se parece como una configuración en paralelo. Similarmente, la estrella en el lado derecho de la figura 7.11 funcionará si A funciona y B o C funcionan. Esta función puede ser escrita como

$$R(\text{estrella}) = a(b + c - bc) \quad (7.34)$$

Esta expresión parece como un elemento A en serie con un par B y C en paralelo. La ecuación (7.33) con la (7.34) tenemos

$$a(b + c - bc) = x_2 + x_3 - x_2x_3 \quad (7.35)$$

La cual con las ecuaciones 7.26b y 7.26c, constituyen la necesidad de transformar el conjunto.

$$a(b + c - bc) = x_2 + x_1x_3 - x_2x_3 \quad (7.36a)$$

$$ac = x_2 + x_1x_3 - x_1x_2x_3 = E_2 \quad (7.36b)$$

$$ab = x_3 + x_1x_2 - x_1x_2x_3 = E_3 \quad (7.36c)$$

Si una forma más simétrica es deseada para la primera ecuación, esta puede ser obtenida restando la ecuación 7.36a de la suma de ecuaciones 7.36b y 7.36c. Esto da

$$abc = x_1x_2 + x_1x_3 + x_2x_3 - 2x_1x_2x_3 = F_1 \quad (7.37)$$

La fiabilidad del componente estrella es de esta manera obtenida como

$$a = E_2E_3/F_1 \quad (7.38a)$$

$$b = F_1/E_2 \quad (7.38b)$$

$$c = F_1/E_3 \quad (7.38c)$$

y el evento obtenido de $x_1 = x_2 = x_3 = r_1$, es entonces

$$E_2 = E_3 = r + r^2 - r^3$$

$$F_1 = 3r^2 - 2r^3$$

así que

$$a = \frac{(r + r^2 - r^3)^2}{3r^2 - 2r^3} = \frac{(1 + r - r^2)^2}{3 - 2r} \quad (7.39)$$

mientras

$$b = c = \frac{3r^2 - 2r^3}{r + r^2 - r^3} = \frac{r(3 - 2r)}{1 + r - r^2} = r_s \quad (7.40)$$

El puente entonces transformándolo en un sistema serie-paralelo de la figura 7.9c, con una confiabilidad dada por

$$R = a(2rr_s - r^2 r_s^2)$$

la cual se reduce a un valor correcto dado por la ec. 7.30

Ejemplo 7.7

Para la configuración delta del ejemplo 7.5, la ecuación exacta 7.36b-c y 7.37 conduce a

$$\begin{aligned} E_1 &= .902 \\ E_2 &= .926 \\ E_3 &= .956 \end{aligned}$$

asi la fiabilidad exacta de la configuración estrella es

$$\begin{aligned} a &= .981\ 436\ 807 \\ b &= .974\ 082\ 073 \\ c &= .943\ 514\ 644 \end{aligned}$$

7.4 RESUMEN

Las ecuaciones (7.2 y 7.7) resumen las principales bases implicadas en la combinación de elementos independientes. Gilmore y Levi de los E.U de la (Army Research and Development Laboratory) mostraron la aplicación de estas ecuaciones en forma gráfica (tabla 7.4 y figura 7.12). La ecuación (7.2) representa la probabilidad acumulada de los elementos en serie (figura 7.1) y la ecuación (7.7) representa la probabilidad acumulada de los elementos en paralelo (figura 7.2).

La tabla 7.4 ha sido formulada usando las ecuaciones 7.2 y 7.7, y en la cual se muestra una variedad de configuraciones redundantes, sus ecuaciones y sus probabilidades. Las ecuaciones son basadas sobre el uso de elementos comunes (que es general) combinados en una manera redundante, en donde cada una tiene la misma probabilidad de éxito. Las configuraciones redundantes ilustradas son dirigidas hacia el problema que surge cuando la función del sistema deseado requiere más de una serie de elementos (casos del 5-10 en la tabla 7.4). En suma, otras configuraciones son presentadas para dar una tendencia representativa del mejoramiento de la fiabilidad en relación con el número de elementos redundantes y de la utilización de elementos ramificados. El valor de $P = 0.8$ como un valor en un tiempo arbitrario que es sustituido en cada ecuación y la probabilidad resultante de cada sistema se da en la tercera columna de la tabla 7.4.

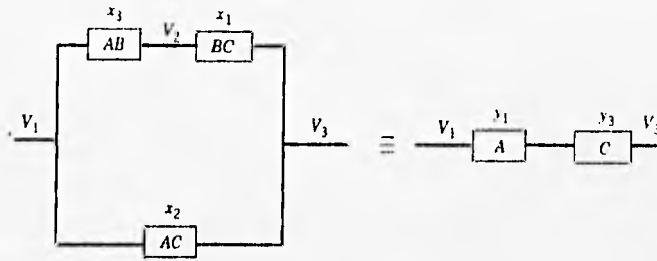
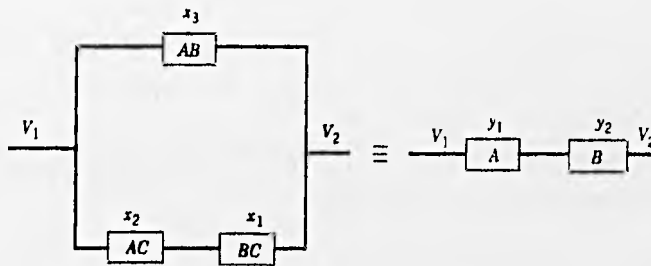
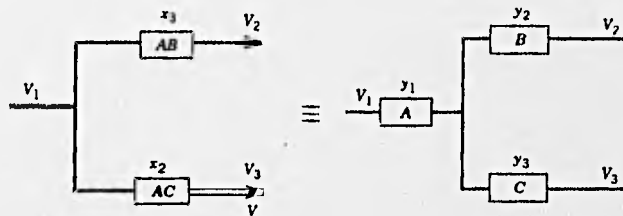
a) equivalencia del evento H_1 b) equivalencia del evento H_2 c) equivalencia del evento H_3

Figura 7.11 Gráficas de las equivalencias de eventos

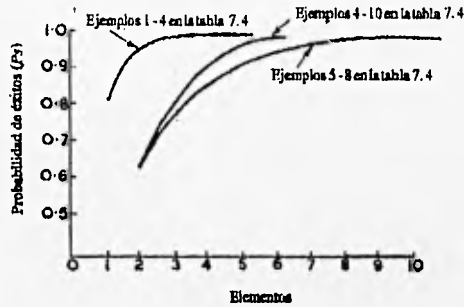


Figura 7.12 Probabilidad de éxitos y número de elementos

De la tabla 7.4 y de la figura 7.12, se sacan las siguientes conclusiones:

- 1) La técnica de redundancia ilustrada produce un sistema de mayor fiabilidad.
- 2) La probabilidad de éxito en un sistema con relación al número de duplicados o con el incremento de elementos paralelos es de manera exponencial.
- 3) Un mayor incremento en la fiabilidad es acompañada por la aplicación del principio redundante (ejemplo tabla 7.4: casos 2, 6 y 9).
- 4) Para cada diseño del proyecto hay un punto en donde aumenta al doble los elementos, con un elevado costo y de la complejidad del diseño, que no produce el suficiente incremento en la fiabilidad para merecer su uso.

Todos los elementos son idénticos $P_1 = P_2 = P_3 = \dots = P_n$

P_s (Es la probabilidad de éxito), si $P = 0.8$

1)



$$P_s = P$$

$$P_s = 0.8$$

2)



$$P_s = 1 - [(1 - P)^2]$$

$$P_s = 0.96$$

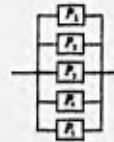
3)



$$P_s = 1 - [(1 - P)^3]$$

$$P_s = 0.992$$

4)



$$P_s = 1 - [(1 - P)^5]$$

$$P_s = 0.9997$$

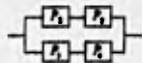
5)



$$P_s = P^2$$

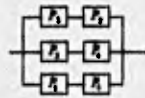
$$P_s = 0.64$$

6)



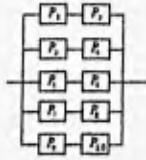
$$P_s = 1 - [(1 - P^2)^2] \quad P_s = 0.87$$

7)



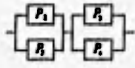
$$P_s = 1 - [(1 - P^2)^3] \quad P_s = 0.953$$

8)



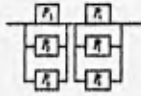
$$P_s = 1 - (1 - P)^5 \quad P_s = 0.994$$

9)



$$P_s = [1 - (1 - P)^2]^2 \quad P_s = 0.92$$

10)



$$P_s = [1 - (1 - P)^3]^2 \quad P_s = 0.984$$

Tabla 7.4 Configuraciones redundantes

VIII. PRUEBAS DE VIDA.

PRUEBAS DE VIDA

Mucha de la literatura para pruebas de vida están basadas en suposiciones de componentes CFR, por razones de maleabilidad matemática. Por lo tanto el modelo para la vida de un componente t es

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad \text{para } t \geq 0 \quad (8.1)$$

o

$$f(t) = \frac{1}{\theta} e^{-t/\theta} \quad \text{para } t \geq 0 \quad (8.2)$$

donde $\lambda = 1/\theta$ que es la razón de falla y θ la vida media o promedio. La meta de las pruebas de vida es encontrar una estimación de la vida media (θ).

8.1 PRUEBAS SIN REEMPLAZO CON TIEMPOS DE FALLA REGISTRADOS

Las pruebas sin reemplazo, con tiempos de falla no registrados, nos es familiar a través del estudio de la distribución binomial, donde n artículos son puestos a prueba por un tiempo predeterminado t_0 , y al final del período de prueba el número de fallas r es anotada. Un punto estimado de la fiabilidad es entonces

$$\hat{R}(t_0) = 1 - \frac{r}{n} = \frac{n-r}{n} \quad (8.3)$$

Para encontrar los límites de la probabilidad de falla, se contradicen las reglas de éxito y de fracaso, y se encuentra que un intervalo de confianza para $R(t_0)$ puede ser expresado por la relación

$$P(R_L \leq R(t_0) \leq R_U) = 1 - \alpha \quad (8.4)$$

donde el límite inferior de confianza R_L es

$$R_L = R_L(t_0) = \frac{1}{1 + \frac{r+1}{n-r} F_2} \quad (8.5)$$

con

$$F_2 = F_{\alpha/2}(2r+2, 2n-2r) \quad (8.6)$$

y el límite superior de confianza R_U es

$$R_U = R_U(t_0) = \frac{F_1}{F_1 + \frac{r}{n-r+1}} \quad (8.7)$$

con

$$F_1 = F_{\alpha/2}(2n-2r+2, 2r) \quad (8.8)$$

Por ejemplo, la cantidad $(n-r)/n$ de la ecuación 8.3 será una estimación de

$$R(t_0) = e^{-t_0/\theta} \quad (8.9)$$

entonces un punto estimado de θ es

$$\hat{\theta} = \frac{-t_0}{\ln[(n-r)/n]} \quad (8.10)$$

y un intervalo de confianza θ basado en las ecuaciones 8.3 y 8.7 es obtenido poniendo

$$R_L \leq R(t_0) \leq R_U$$

resolviendo para θ en $R(t_0) = e^{-t_0/\theta}$ da

$$\frac{-t_0}{\ln R_L} \leq \theta \leq \frac{-t_0}{\ln R_U} \quad (8.11)$$

Para misiones de duración distintas a t_0 , se puede escribir

$$\begin{aligned} \hat{R}(t) &= e^{-t/\hat{\theta}} \\ &= \left(e^{-t_0/\hat{\theta}} \right)^{t/t_0} \end{aligned} \quad (8.12)$$

$$= \left(\frac{n-r}{n} \right)^{t/t_0} \quad (8.13)$$

Ejemplo 8.1

Suponga que $n = 10$ unidades idénticas son puestas a prueba por una semana (168 horas). Al final de ese tiempo, $r = 2$ unidades han fallado, un punto estimado de $R(168)$ es $8/10$. El 90% de los límites de confianza en $R(168)$ son:

$$R_U = F_1(F_1 + 2/9)^{-1}$$

donde, por interpolación

$$F_1 = F_{05}(18,4) = 5.82$$

así que $R_U = 0.963$, similarmente a la ecuación 8.5 y $F_2 = F_{05}(6,16) = 2.74$, encontramos

$$R_L = [1 + (3/8)2.74]^{-1} = 0.492.$$

Un punto estimado de θ es

$$\hat{\theta} = -168(\ln 8/10)^{-1} = 752.9 \text{ horas}$$

y un 90% de intervalo de confianza es relativamente sin valor, así podemos replantear el problema usando $F_{.25}(v_1, v_2)$ en lugar de $F_{.05}(v_1, v_2)$. Esto produce el 50% de intervalos de confianza $0.645 \leq R(168) \leq 0.903$ y $383.1 \text{ horas} \leq \theta \leq 1646.5 \text{ horas}$.

8.2 PRUEBAS ESTÁNDARES, TIEMPOS DE FALLA ANOTADAS

El procedimiento estándar en la estadística es observar una muestra de n artículos y anotar el tiempo de vida de todos los productos. Asumimos que hay una estación de pruebas simple o "socket", y que las piezas bajo prueba son colocadas en secuencia hasta que ellas fallan. Si no se pierde tiempo en la estación de pruebas, eso es, si el remplazo de la pieza que falla es instantánea, un proceso de reanudación de Poisson es generado como se muestra en la figura 8.1. Un punto estimado de θ es

$$\hat{\theta} = \bar{t} = \left(\sum_{i=1}^n t_i \right) / n \quad (8.14)$$

Si en lugar de una sola estación de pruebas simple, todas las piezas pudieran ser probadas, la gráfica de tiempo se vería como en la figura 8.2. Claro, los datos serán disponibles mucho antes en este caso de múltiples sockets que en lugar de un sólo socket (figura 8.1) pero la fórmula 8.14 es todavía válida. La construcción de un intervalo de confianza para θ depende de conocer la distribución de $\hat{\theta}$, recordando que las t_j son realizaciones (observaciones muestra) de una variable al azar común \tilde{t} . Por lo tanto el tiempo total de la prueba es

$$\tilde{T} = \tilde{t} + \dots + \tilde{t}_n \quad (8.15)$$

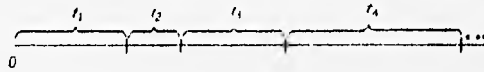


Figura 8.1 Prueba de un sólo socket

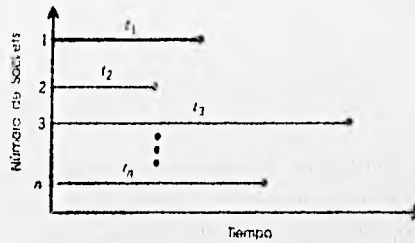


Figura 8.2 Prueba de múltiples sockets

Los límites de confianza para θ (θ_L, θ_U) están dados por

$$(\theta_L, \theta_U) = \left(\frac{2T}{\chi^2_{\gamma/2}(2n)}, \frac{2T}{\chi^2_{1-\gamma/2}(2n)} \right) \quad (8.16)$$

Generalmente es de más interés el límite de confianza inferior en θ dado por

$$\theta_L^* = \frac{2T}{\chi^2_{\gamma/2}(2n)} \quad (8.17)$$

El límite de confianza para $R(t)$ será

$$\hat{R}(t) = e^{-t/\hat{\theta}} \quad (8.18)$$

donde $\hat{\theta}$ es basado en 8.14. Se puede escribir

$$P[r_1(t) \leq R(t) \leq r_2(t)] = 1 - \gamma \quad (8.19)$$

donde $r_1(t)$ es

$$r_1(t) = e^{-t/\hat{\theta}_L} = \exp\left[\frac{-\chi_{\gamma/2}^2(2n)}{2T}\right] \quad (8.20)$$

y similarmente para $r_2(t)$

Ejemplo 8.2

10 artículos con una falla exponencial negativa son probados, produciendo tiempo de vida en horas {317, 735, 886, 5, 916, 1263, 100, 586, 636, 830}. El tiempo total en pruebas es $T = 7194$. El 95% de el límite de confianza mas bajo para θ es

$$\hat{\theta}_L = \frac{2(7194)}{\chi_{0.95}^2(20)} = \frac{2(7194)}{31.41} = 458.1 \text{ horas}$$

Si en una misión de 100 horas es contemplado, estimamos $R(100)$ por

$$\hat{R}(100) = e^{-100/719.4} = 0.87$$

y un 95% de el límite de confianza bajo $R(100)$ es

$$r_1^*(t) = e^{-t/\hat{\theta}_L} = e^{-100/458.1} = 0.804$$

8.3 TRUNCAMIENTO INDEXADO (CENSADO TIPO II); SIN REEMPLAZO

En esta sección se ve un método de finalizar las pruebas antes de que todos los elementos hayan fallado.

Regla: Poner n artículos a prueba en el tiempo $t = 0$ en estaciones de prueba separadas (sockets). Registrar los tiempos de falla. Terminar la prueba cuando r (un número predeterminado) de los artículos han fallado.

Esta regla es presentada en la figura 8.3. Para un observador los datos de falla se harán disponibles, no en el orden t_1, t_2, \dots, t_n , el cual corresponde al número de componente

como en la sección 8.2 sino en forma estadística. Para facilitar la notación se usarán los siguientes símbolos

$$z_1, z_2, \dots, z_r$$

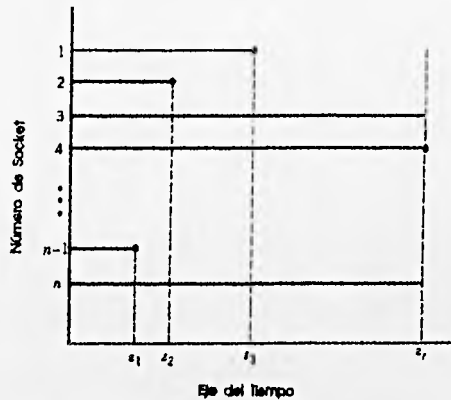


Figura 8.3 Censado Tipo II (Sin Reemplazo)

Tan pronto como la falla en el tiempo z_r , es observada, la prueba es terminada y hay $n - r$ artículos sin falla con una cantidad desconocida de vida (funcionamiento). ¿Cómo estos datos serán usados para construir una estimación de vida media?. El proceso es formar la función de densidad común de la primera r

$$g(z_1, \dots, z_r) = \frac{n!}{(n-r)!} f(z_1) f(z_2) \dots f(z_r) [1-F(z_r)]^{n-r} \quad (8.21)$$

$$= \frac{n!}{(n-r)!} \frac{e^{-z_1/\theta}}{\theta} \frac{e^{-z_2/\theta}}{\theta} \dots \frac{e^{-z_r/\theta}}{\theta} (e^{-z_r/\theta})^{n-r} \quad (8.22)$$

$$= \frac{n!}{(n-r)!} \theta^{-r} e^{-[z_1 + z_2 + \dots + z_r + (n-r)z_r]/\theta} \quad (8.23)$$

Ésta expresión asume la forma más simple si escribimos

$$T = z_1 + z_2 + \dots + z_r + (n-r)z_r \quad (8.24a)$$

$$= z_1 + z_2 + \dots + z_{r-1} + (n-r+1)z_r \quad (8.24b)$$

así que

$$g(z_1, \dots, z_r) = \frac{n!}{(n-r)!} \theta^{-r} e^{-T \cdot \theta} \quad (8.25)$$

La variable \tilde{T} es el tiempo de vida total de todos los artículos a prueba. Esto debe ser notado que aunque el tamaño de la derecha de la ecuación 8.25 es escrita en términos de T , esto de hecho no es la función de densidad de \tilde{T} , pero es todavía la densidad común $\tilde{z}_1, \dots, \tilde{z}_r$. Sin embargo, esta puede ser considerada como una función de probabilidad para θ en la actual situación de prueba, así

$$L(\theta) = \frac{n!}{(n-r)!} \theta^{-r} e^{-T \cdot \theta} \quad (8.26)$$

La función logarítmica de probabilidad es

$$\ln L = \ln n! - \ln (n-r)! - r \ln \theta - T/\theta \quad (8.27)$$

$$\frac{d \ln L}{d \theta} = \frac{-r}{\theta} + \frac{T}{\theta^2} \quad (8.28)$$

cuando es igualada a cero, se produce la probabilidad máxima estimada

$$\hat{\theta} = \frac{T}{r} \quad (8.29a)$$

$$= \frac{z_1 + \dots + z_r + (n-r)z_r}{r} \quad (8.29b)$$

Es importante encontrar la función de densidad para la variable random \tilde{T} , y para esto un cambio de variable es necesario; la antigua variable puesta z_1, \dots, z_r es reemplazada por una nueva variable colocada w_1, \dots, w_r definida como sigue. Dejando

$$\left. \begin{aligned} w_1 &= n z_1 \\ w_2 &= (n-1)(z_2 - z_1) \\ w_3 &= (n-2)(z_3 - z_2) \\ &\vdots \\ w_{r-1} &= (n-r+2)(z_{r-1} - z_{r-2}) \\ w_r &= (n-r+1)(z_r - z_{r-1}) \end{aligned} \right\} \quad (8.30)$$

Entonces $z_1 \leq z_2 \leq z_3 \leq \dots \leq z_r$, las w 's son todas positivas. Ellas representan "vidas parciales": todas los n componentes fueron puestos a prueba y todos funcionaron hasta el tiempo z_1 , así nz_1 es la vida acumulada del grupo hasta z_1 . Después de la primera falla, solamente $n-1$ componentes fueron activos y ellos funcionaron $z_1 - z_2$, horas adicionales hasta la segunda falla. Por lo tanto, la vida acumulada del grupo sobre el segundo intervalo es $(n-1)(z_1 - z_2)$. Razonamiento similar se tiene para el resto de el conjunto. Note que si todos las ecuaciones del conjunto 8.30 son añadidas, el tamaño de la letra derecha suma

$$z_1 + z_2 + \dots + z_{r-1} + (n-r+1)z_r = T$$

y de este modo

$$T = w_1 + w_2 + \dots + w_r \quad (8.31)$$

La transformación inversa debería se obtenida de la ecuación 8.30, esto es hecho en una manera secuencial. El procedimiento es resolver la primera ecuación en el conjunto (8.30) para z_1 , dando $z_1 = w_1/n$. Resolviendo la ecuación en el grupo 8.30 para z_2 así que

$$z_2 - z_1 = \frac{w_2}{n-1}$$

$$z_2 = z_1 + \frac{w_2}{n-1}$$

$$= \frac{w_1}{n} + \frac{w_2}{n-1}$$

La repetición inversa de esta técnica conduce a la solución inversa del grupo

$$\left. \begin{aligned} z_1 &= \frac{w_1}{n} \\ z_2 &= \frac{w_1}{n} + \frac{w_2}{n-1} \\ &\vdots \\ z_r &= \frac{w_1}{n} + \frac{w_2}{n-1} + \dots + \frac{w_r}{n-r+1} \end{aligned} \right\} \quad (8.32)$$

Ejemplo 8.3

15 productos son puestos a prueba en el tiempo $t = 0$ y la prueba es terminada tan pronto como la quinta falla ocurre ($r = 5$). Los tiempo de falla observados son 17.5, 18.8, 21, 31 y 42.3 horas. Construir un punto estimado y un 50% de intervalo de confianza para θ , tan bien como para $R(20)$.

Solución:

La vida total es

$$T = 17.5 + 18.8 + 21.0 + 31.0 + 42.3 + 10(42.3) = 553.6$$

y $\hat{\theta} = T/r = 553.6/5 = 110.7$. Entonces $\chi_{25}^2(10) = 12.5$ y $\chi_{75}^2(10) = 6.74$, el 50% del intervalo de confianza es

$$\frac{2(553.6)}{12.5} \leq \theta \leq \frac{2(553.6)}{6.74}$$

o

$$P(88.6 \leq \theta \leq 164.3) = 0.50$$

El punto estimado para $R(20)$ es

$$\hat{R}(20) = e^{-20/110.7} = 0.835$$

y con 50% de confianza podemos afirmar que

$$e^{-20/88.6} = 0.80 \leq R(20) \leq 0.89 = e^{-20/164.3}$$

Es interesante comparar la duración esperada de la prueba truncada ($r < n$) con eso de la prueba completa ($r = n$). La notación a ser usada es

ETT_m = Tiempo de prueba esperada cuando n artículos son puestos a prueba y todos son permitidos para que fallen.

ETT_m = Tiempo de prueba esperada cuando n artículos son puestos a prueba y solamente r permitidos a fallar.

obviamente $ETT_m = E(Z_r)$ pueden ser obtenidos como el valor esperado de la r -ésima, pero el cálculo es difícil, así que es mucho mejor usar

$$\begin{aligned} z_r &= z_1 + (z_2 - z_1) + \dots + (z_{r-1} - z_{r-2}) + (z_r - z_{r-1}) \\ &= \frac{w_1}{n} + \frac{w_2}{n-1} + \frac{w_3}{n-2} + \dots + \frac{w_r}{n-r+1} \end{aligned} \quad (8.33)$$

Pero

$$E(\bar{w}_1) = E(\bar{w}_2) = \dots = E(\bar{w}_r) = \theta$$

así que

$$ETT_m = E(z_r) = \theta \left(\frac{1}{n} + \frac{1}{n-1} + \dots + \frac{1}{n-r+1} \right) \quad (8.34)$$

La fórmula contiene r términos igual al número de productos que son permitidos a fallar. La tabla 8.1 muestra los valores de ETT_m para $\theta = 1$, y estos pueden ser usados como múltiplos para otros valores de θ . Vale comparar el tiempo de prueba esperado del caso truncado con el tiempo de prueba esperado para pruebas no truncadas en dos diferentes formas. Esto es hecho en las tablas 8.2 y 8.3. En la tabla 8.2, se asume que un número fijo de n productos es puesto a prueba y se ve como varios valores de r incrementan la prueba del tiempo. Por ejemplo, para $n = 10$ se ve que si se resuelve para $r = 1$, se necesita esperar solamente 3.4% de tiempo como si esperamos para que todos los 10 artículos fallaran.

Si podemos probar para $r = 5$, necesitamos esperar 22.1% de tiempo como si esperamos para que todos los 10 artículos fallen. Pero este conocimiento no será de interés si en este ya ha sido decidido que, el orden para alcanzar un cierto nivel de "validez", el valor r debe ser fijado en ($r = 4$). Entonces deberíamos ver la columna $r = 4$ de la tabla 8.3. Allí veremos que 4 de cada 4 requiere más de dos tiempos de vida. Esos 4

de cada 10 requerirá solamente 23% tantas pruebas de tiempo como 4 de cada 4, y así sucesivamente.

Se ha asumido en la anterior discusión que los n productos han sido puestos a prueba en n sockets, pero esto puede ser porque los productos han sido puestos en servicio y que los tiempos de falla son datos reunidos incidentalmente durante un período de uso. Los tiempos $\{z_j\}$ no son tiempos de llegada de Poisson porque el principio del período de observación hay n productos en servicio así la razón de falla del grupo es $n\lambda$ y, por lo tanto, el primer tiempo de falla z_1 es distribuido NGEX($n\lambda$). Después de la primera falla hay solamente $n - 1$ productos en servicio así la razón de falla del grupo es $(n - 1)\lambda$ y el tiempo de entre intervalos $(z_2 - z_1)$ es distribuido NGEX $[(n - 1)\lambda]$. De igual manera, después de i fallas que han ocurrido, hay $n - i$ productos todavía en servicio y los tiempos entre fallas $(z_{i+1} - z_i)$ es distribuido NGEX $[(n - i)\lambda]$

Ejemplo 8.4

Un nuevo tipo de unidades esta siendo producido, para el cual es esperado que la vida media será de 2,000 horas. Acelerar la prueba si es posible, por lo cual los resultados pueden ser obtenidos en una quinta parte del tiempo "del mundo real". 10 unidades pueden ser dispuestas para los procedimientos de prueba y hay suficientes sockets para acomodarlos. ¿Cuál debería ser el índice de truncamiento r si la administración desea que los resultados de la prueba esten en una semana (168 horas)?.

Solución:

Si θ es realmente cercano a 2000 horas, podemos tratarlo como si estuviera 400 horas bajo pruebas aceleradas. Deseamos encontrar r para $(n = 10)$ así que $ETT_{r,10} = 168/400 = 0.420$. Tabla 5.1 da $ETT_{3,10} = 0.336$ y $ETT_{4,10} = 0.479$, así r de 3 ó 4 se harán.

Como se ha visto las pruebas sin reemplazo tratados en esta sección es bastante ineficiente. Sería mucho mejor reemplazar cada producto fallado inmediatamente y mantener los sockets completos en todos los tiempos; este procedimiento es considerado más adelante. Pero hay, tal vez, situaciones en la cual la toma de muestras sin reemplazo es más barato, si los tiempos de falla pueden ser registrados automáticamente, las pruebas de laboratorio pueden ser dejadas sin atender excepto para chequeos ocasionales para ver si las r fallas han ocurrido.

$n \backslash r$	1	2	3	4	5	10	15	20	25
1	1.000								
2	0.500	1.500							
3	0.333	0.833	1.833						
4	0.250	0.583	1.083	2.083					
5	0.200	0.450	0.783	1.283	2.283				
10	0.100	0.211	0.336	0.479	0.646	2.929			
15	0.067	0.138	0.215	0.298	0.389	1.035	3.318		
20	0.050	0.103	0.158	0.217	0.280	0.669	1.314	3.598	
25	0.040	0.082	0.125	0.171	0.218	0.489	0.887	1.533	3.816

$ETT_{0.50} = 4.499$
 $ETT_{00.100} = 5.187$

Tabla 8.1 Tiempo de prueba esperado ETT_{rn} para $\theta = 1$

$n \backslash r$	1	2	3	4	5	10	15	20	25
1	1.000								
2	0.333	1.000							
3	0.182	0.455	1.000						
4	0.120	0.280	0.520	1.000					
5	0.088	0.197	0.343	0.562	1.000				
10	0.034	0.072	0.115	0.164	0.221	1.000			
15	0.020	0.042	0.064	0.090	0.117	0.312	1.000		
20	0.014	0.029	0.044	0.060	0.078	0.186	0.365	1.000	
25	0.010	0.021	0.033	0.045	0.057	0.131	0.232	0.402	1.000

Tabla 8.2 ETT_{rn}/ETT_{nn} , Ahorro de tiempo relativo para la prueba de índice-truncado con n fijo

n	r									
	1	2	3	4	5	10	15	20	25	
1	1.000									
2	0.500	1.000								
3	0.300	0.555	1.000							
4	0.250	0.389	0.591	1.000						
5	0.200	0.300	0.427	0.616	1.000					
10	0.100	0.141	0.183	0.230	0.283	1.000				
15	0.067	0.092	0.117	0.143	0.170	0.353	1.000			
20	0.050	0.069	0.086	0.104	0.123	0.228	0.396	1.000		
25	0.040	0.055	0.069	0.082	0.095	0.170	0.267	0.426	1.000	

Tabla 8.3 ETT_{rr}/ETT_{rr} , Ahorro de tiempo relativo para pruebas de índice-truncado con r fijo

8.4 TRUNCAMIENTO INDEXADO (CENSADO TIPO II); CON REEMPLAZO

Consideremos la situación en la cual hay n sockets, así que n productos son puestos a prueba con tiempo $t = 0$. Los productos que fallen son reemplazados inmediatamente, así que el banco de pruebas está completo en todos los tiempos. Esto es representado gráficamente en la figura 8.4. La suposición, como antes, es que la prueba es terminada en la r -ésima falla, con r como número predeterminado.

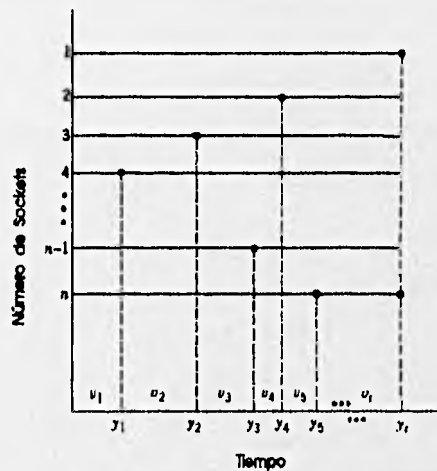


Figura 8.4 Censado Tipo II con reemplazo

Bajo la suposición de componentes CFR, cada socket es un proceso de reanudación de Poisson, con intensidad $\lambda = 1/\theta$. Hagamos que $N_i(t)$ sea la cantidad de falla en el i -ésimo socket por el tiempo t . En el eje del tiempo, la cantidad de fallas observadas en el tiempo t serán

$$N(t) = N_1(t) + \dots + N_n(t) \quad (8.35)$$

y esta es una variable de Poisson con intensidad $n\lambda = n/\theta$. Los puntos y_1, y_2, \dots, y_r son tiempos de llegada de Poisson, y los tiempos entre intervalos serán

$$\left. \begin{aligned} w_1 &= y_1 \\ w_2 &= y_2 - y_1 \\ &\vdots \\ w_r &= y_r - y_{r-1} \end{aligned} \right\} \quad (8.36)$$

Si ahora definimos

$$\left. \begin{aligned} w_1^* &= nw_1 = ny_1 \\ w_2^* &= nw_2 = n(y_2 - y_1) \\ &\vdots \\ w_r^* &= nw_r = n(y_r - y_{r-1}) \end{aligned} \right\} \quad (8.37)$$

vemos que w_1^*, \dots, w_r^* son las vidas parciales para todos los componentes sobre los intervalos $(0, y_1), (y_1, y_2), \dots, (y_{r-1}, y_r)$.

Si

$$\bar{T} = w_1^* + \dots + w_r^*$$

la vida total trabajada por todos los componentes es,

$$\begin{aligned} T &= w_1^* + \dots + w_r^* \\ &= nw_1 + \dots + nw_r \\ &= ny_1 + n(y_2 - y_1) + \dots + n(y_r - y_{r-1}) \\ &= ny_r \end{aligned} \quad (8.38)$$

El tiempo de prueba estimado es

$$ETT_m^* = E(\bar{T})$$

$$\begin{aligned}
 &= E[(\bar{y}_1) + (\bar{y}_2 - \bar{y}_1) + \dots + (\bar{y}_r - \bar{y}_{r-1})] \\
 &= E\left(\frac{w_1^*}{n} + \dots + \frac{w_r^*}{n}\right) \\
 &= \frac{r\theta}{n} \tag{8.39}
 \end{aligned}$$

merece la pena comparar el factor r/n donde hay reemplazo con el factor $[1/n + 1/(n-1) + \dots + 1/(n-r+1)]$ cuando no hay reemplazo, para ver como demasiado tiempo puede ser ahorrado manteniendo las estaciones de prueba completas en todos los tiempos. Esto es hecho para seleccionar los valores en la tabla 8.4

Hay que notar que en la situación de reemplazo, el número total de productos que la prueba recibe es $n + r - 1$. Algunas veces es difícil saber como designar una muestra en estas situaciones. En la toma de muestras tradicional (n ó $n + r - 1$ en nuestro caso) es el poder determinar una prueba, o el ancho de banda de confianza. En esta situación de prueba de vida, la cantidad de falla r es determinada, así que es tentador hablar de r como el tamaño de la muestra. En su lugar, lo llamaremos el índice de destrucción o el número de finalización.

Otra razón para la espera es tratar r como un tamaño de la muestra, entonces en las pruebas de vida estamos hablando acerca de las pruebas destructivas, sin importar cuantos productos son puestos a prueba, solo r productos son destruidos. Los restantes $n - r$ (ó $n - 1$) productos pueden ser regresados al inventario "tan buenos como nuevos", debido a la propiedad de olvido de la distribución exponencial.

$n \backslash r$	1	2	3	4	5	10	15	20	25
1	1.000								
2	1.000	.667							
3	1.000	.800	.546						
4	1.000	.858	.692	.480					
5	1.000	.889	.766	.624	.438				
10	1.000	.948	.893	.835	.774	.341			
15	1.000	.966	.930	.895	.857	.644	.301		
20	1.000	.971	.949	.922	.893	.747	.571	.278	
25	1.000	.976	.960	.936	.917	.803	.676	.522	.262

Tabla 8.4 Ahorro en tiempo ($ETT_{r,n}^* \div ETT_{r,n}$)

Ejemplo 8.5

La dirección esta dispuesta a permitir la destrucción de solamente $r = 7$ unidades para una prueba de vida. Si la prueba es hecha secuencialmente (solamente un socket usado), el tiempo de prueba esperado es 70. Si la prueba puede ser hecha simultáneamente con siete sockets, el tiempo de la prueba esperado es reducido a $70(1 + \dots + 1/7) = 2,5930$. Cuando la prueba es hecha con todos los siete sockets, este debe ser sin reemplazo, entonces no hay piezas de repuesto para reemplazar las unidades que fallaron ¿Habría alguna desventaja en usar menos sockets (digamos $n = 4$) y hacer la prueba?

Con semejante número limitado de unidades disponibles, no hay forma que podamos continuar con todos los sockets completamente hasta la séptima falla, así la fórmula $ETT = rD/n$, no tiene sentido aquí. Ver la figura 8.5 donde 4 artículos fueron colocados a prueba en el tiempo $t = 0$, la quinta unidad en el tiempo $t = y_1$, la sexta en el tiempo $t = y_2$ y la séptima en el tiempo $t = y_3$.

Esta situación enfatiza el hecho que si la muestra reemplazada es llevada a cabo en n sockets, debe ser $n + r - 1$ unidades disponibles. O, expuesto en otra forma, si n' unidades son disponibles para usarse, de las cuales solamente r pueden ser reservadas para destruirse, la prueba de reemplazo puede ser llevada a cabo sólo si el número de sockets usados no es mayor que $n' - r + 1$. Si podemos persuadir a la administración que nos preste unidades extra, para ser regresados "tan bien como nuevas", entonces con todos los n sockets funcionando completamente, el tiempo de la prueba esperada es reducida como se muestra en la tabla 8.5

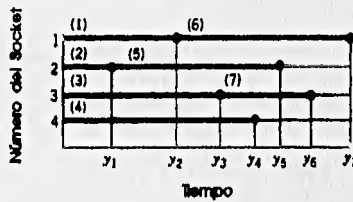


Figura 8.5 Un intento fallado en prueba con reemplazo ($n = 4$, $r = 7$).

n	$ETT_{7,n}^*$	n	$ETT_{7,n}^*$
1	7.00 θ	8	0.88 θ
2	3.50 θ	9	0.78 θ
3	2.33 θ	10	0.70 θ
4	1.75 θ	11	0.64 θ
5	1.40 θ	12	0.58 θ
6	1.17 θ	13	0.54 θ
7	1.00 θ	14	0.50 θ

Tabla 8.5 Reducción en pruebas de tiempo para n sockets ocupados

8.5 TIEMPO DE TRUNCAMIENTO (CENSADO TIPO II); CON REEMPLAZO

Con la toma de muestras con reemplazo, cada socket es la localización de un proceso de Poisson con intensidad λ , y un observador en el eje del tiempo parece un proceso de Poisson con intensidad λn . El experimento es llevado a cabo para un período fijo de tiempo t_0 , así la variable random es $N(t)$, el número total de fallas de todos los sockets. Se puede escribir

$$P[N(t_0) = r] = \frac{e^{-n\lambda t_0} (n\lambda t_0)^r}{r!}, \quad r = 0, 1, 2, \dots \quad (8.40)$$

Para un simple experimento la cantidad de fallas r es la Probabilidad máxima estimada (MLE) de un parámetro de Poisson $n\lambda t_0$, así

$$n\hat{\lambda} \cdot t_0 = r$$

$$\hat{\lambda} = \frac{r}{nt_0}$$

o

$$\hat{\theta} = \frac{nt_0}{r}$$

reconociendo que $nt_0 = T$ es la vida total de todos los artículos a prueba, entonces

$$\hat{\theta} = \frac{T}{r}$$

y los límites de confianza para θ son:

$$\theta_1 = \frac{2nt_0}{x_{\alpha/2}^2(2r+2)} \quad (8.41)$$

$$\theta_2 = \frac{2nt_0}{x_{1-\alpha/2}^2(2r)} \quad (8.42)$$

En los siguientes enunciados se resume que:

De (8.41) si $N(t_0) \leq r$ hay una probabilidad pequeña ($< \alpha/2$) que θ es menor que θ_1 .

De (8.42) si $N(t_0) \geq r$ hay una probabilidad pequeña ($< \alpha/2$) que θ excede θ_2 .

Si $N(t_0) = r$, entonces ambos enunciados deben ser verdad. Por lo tanto, un $100(1-\alpha)$ por ciento del porcentaje del intervalo de confianza para θ es de la forma

$$\theta_L = \frac{2nt_0}{x_{\alpha/2}^2(2r+2)} \leq \theta \leq \frac{2nt_0}{x_{1-\alpha/2}^2(2r)} = \theta_U \quad (8.43)$$

si solamente un límite bajo es deseado, este puede ser tomado como

$$\theta_L^* = \frac{2nt_0}{x_{\alpha/2}^2(2r+2)} \quad (8.44)$$

Es interesante notar que (8.44) puede ser usado aún aunque no ocurran fallas durante la prueba.

Ejemplo 8.6

10 sockets son usados en una prueba de vida con recemplazo, y la prueba continúa por una semana (168 horas). Durante este período hay (a) 3 fallas, (b) ninguna falla. Encontrar el punto estimado y 50% de intervalo de confianza en los dos casos.

Solución:

a) Tenemos

$$\hat{\theta} = (10)(168)/3 = 560 \text{ horas y}$$

$$\theta_L = \frac{2(10)(168)}{x_{.25}^2(8)} = \frac{3360}{10219} = 328.8 \text{ horas}$$

$$\theta_U = \frac{2(10)(168)}{x_{.75}^2(6)} = \frac{3360}{3.455} = 972.5 \text{ horas}$$

b) Ningún punto estimado es posible ni es un límite superior cuando $r = 0$, pero un 50% de límite de confianza inferior es

$$\hat{\theta}_L = \frac{3360}{s_3^2(2)} = \frac{3360}{1386} = 2424.2 \text{ horas}$$

¿Qué pasa si los tiempos de falla anotados hubiesen incrementado la validez de las estimaciones?. Se demostrará el resultado de ambos métodos con un ejemplo.

Ejemplo 8.7

20 artículos fueron puestos a prueba por un período de 75 horas. Los artículos fallados no fueron reemplazados.

Las fallas ocurrieron en 17, 25, 37, 30, 50, 66 horas.

Construir un punto estimado y un 90% de confianza estimada de θ , asumiendo que los componente son CFR.

Solución:

Método A: usando el método de la sección 8.1 (con $n = 20$, $r = 6$), tenemos

$$\hat{\theta} = \frac{-75}{\ln(14/20)} = 210.28$$

Para el límite inferior encontramos de la ecuación 8.5

$$R_L = (1 + 7F_2/14)^{-1} = 0.492$$

entonces $F_2 = F_{0.5}(14, 28) = 2.07$. De la ecuación 8.10 tenemos el límite más bajo

$$\theta_L = \frac{-75}{\ln(0.492)} = 105.74$$

similarmente, el límite alto es obtenido usando (8.7), por lo cual

$$R_U = 2.47(2.47 + 6/15)^{-1} = 0.861$$

entonces $F_1 = F_{0.5}(30,12) = 2.47$. Entonces de (8.10)

$$\theta_U = \frac{-75}{\ln(0.861)} = 501.13$$

Método B: usando el método de ésta sección, la cual será una aproximación, obtenemos

$$\hat{\theta} = \frac{T}{r} = \frac{17+25+27+30+50+66+14(75)}{6} = \frac{1265}{6} = 210.83$$

entonces $\chi_{05}^2(14) = 23.685$ y $\chi_{95}^2(12) = 5.226$, tenemos

$$\theta_L = \frac{2(1265)}{23.685} = 106.82$$

y

$$\theta_U = \frac{2(1265)}{5.226} = 484.12$$

para comparar los resultados más fácilmente, se resumen éstas en la tabla 8.6

Estadística	A. Método Exacto (Sec. 8.2)	B. Método Aprox. (Sec 8.6)
$\hat{\theta}$	210.28 hrs.	210.83 hrs.
θ_L	105.74	106.82
θ_U	501.13	484.12
	Alguna información ignorada	Toda la información usada

Tabla 8.6 Comparación de dos métodos de estimación

Vemos aquí que los dos puntos estimados son casi idénticos. Los límites de confianza inferior θ_L son muy cercanos. El intervalo de confianza el método B es más estrecho. Generalmente, "mientras más estrecho es mucho mejor" donde los intervalos de confianza son relacionados, pero aquí no sabemos si el mejoramiento es real.

8.6 PRUEBA DE HIPÓTESIS PARA COMPONENTES CFR Y CENSADO TIPO II

En las anteriores secciones, el énfasis fué en forma estimada, punto o intervalo en la vida media θ de un componente CFR. En ésta sección el énfasis será en un aspecto diferente del mismo problema, esto es, decir si la vida media de un producto es lo suficiente bueno. La notación que se usará es

θ_0 = Vida media aceptable,

θ_1 = Vida media inaceptable ($< \theta_0$),

α = La probabilidad (baja) de rechazar el producto de vida media θ_0 ,
= "Riesgo del fabricante",

β = La probabilidad (baja) de aceptar el producto con vida media θ_1 ,
= "Riesgo del consumidor",

C = Una constante de aceptación escogida.

La prueba del procedimiento es como sigue:

El número de artículos a ser puestos a prueba es n . Tan pronto como r de ellos han fallado, la vida media de la muestra es calculada. Si $\hat{\theta} \geq C$, el lote es aceptado. Si $\hat{\theta} < C$, el lote es rechazado.

Dejando $P_a(\theta) = P(\text{aceptar el lote} \mid \theta) = P(\hat{\theta} \geq C \mid \theta)$, se seleccionan los detalles de la prueba de modo que

$$\left. \begin{aligned} P_a(\theta_0) &= 1 - \alpha \\ P_a(\theta_1) &= \beta \end{aligned} \right\} \quad (8.45)$$

La gráfica de $P_a(\theta)$ contra θ es llamado **curva característica de operación (CCO)**, y los requerimientos de (8.45) son equivalentes al construir la CCO para pasar a través de los puntos $(\theta_0, 1 - \alpha)$ y (θ_1, β) . Si no es posible forzar la CCO exáctamente a través de estos dos puntos, debido a la diferencia de algunas cantidades. Es tradicional reemplazar (8.45) con

$$\left. \begin{aligned} P_a(\theta_0) &= 1 - \alpha \\ P_a(\theta_1) &\leq \beta \end{aligned} \right\} \quad (8.57)$$

Por supuesto, el procedimiento de prueba puede también ser expresado como

$$\begin{aligned} H_0: & \theta = \theta_0 \\ H_1: & \theta = \theta_1 \end{aligned}$$

con $\alpha = P(\text{Error Tipo I}) = P(\text{rechazar } H_0 \mid H_0 \text{ verdadero})$ y $\beta = P(\text{Error tipo II}) = P(\text{rechazar } H_0 \mid H_1 \text{ verdadero})$. La CCO ideal es una función de paso (figura 8.6a), pero como la curva obviamente no puede ser obtenida a través del muestreo; la mejor forma que puede ser realizada es como en la figura 8.6b. Las preguntas a ser hechas son

- ¿Cómo el criterio del valor C será escogida?
- ¿Cuántas unidades serán observadas ($n = ?$)?, y
- ¿Cuántas unidades serán destruidas ($r = ?$)?

La respuesta al inciso a) depende al nivel escogido α , entonces

$$\begin{aligned} \alpha &= P(\text{rechazar } H_0 \mid H_0 \text{ verdadero}) \\ &= P(0 < C \mid H_0 \text{ verdadero}) \\ &= P\left(\frac{T}{r} < C \mid H_0 \text{ verdadero}\right) \\ &= P(T < rC \mid H_0 \text{ verdadero}) \\ &= P\left(\frac{2T}{\theta} < \frac{2rC}{\theta} \mid H_0 \text{ verdadero}\right) \\ &= P\left[\chi^2(2r) < \frac{2rC}{\theta} \mid \theta = \theta_0\right] \\ &= P\left[\chi^2(2r) < \frac{2rC}{\theta}\right] \end{aligned}$$

entonces debe ser escogida de modo que

$$\frac{2rC}{\theta_0} = \chi_{1-\alpha}^2(2r) \quad (8.47)$$

$$C = \theta_0 \frac{\chi_{1-\alpha}^2(2r)}{2r} \quad (8.48)$$

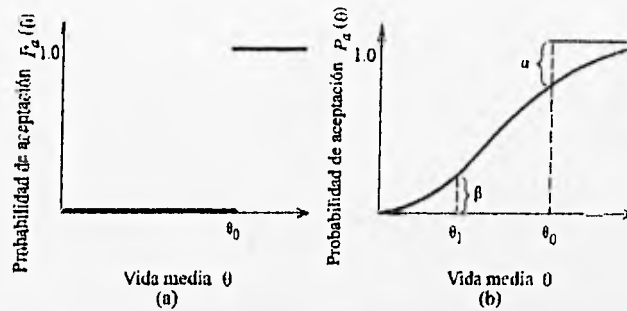


Figura 8.6. Curvas características de operación (CCO): a) ideal, b) actual

Note que C depende solamente de θ_0 , α , y el número de finalización r , y no del todo θ_1 , β , o del tamaño de la muestra n . La independencia de (8.48) de θ_1 y β significa, por supuesto, que el mismo valor de C puede ser usado por

$$H_0: \theta = \theta_0$$

$$H_1: \theta < \theta_0$$

La CCO a través de el punto (θ_1, β) requiere que

$$\beta = P(\text{aceptar } H_0 \mid H_1 \text{ verdadero})$$

$$= P(\hat{\theta} \geq C \mid H_1 \text{ verdadero})$$

$$= P\left[\chi^2(2r) \geq \frac{2rC}{\theta} \mid \theta = \theta_1\right]$$

$$= P\left[\chi^2(2r) \geq \frac{2rC}{\theta_1}\right] \quad (8.49)$$

De este modo, es requerido que C sea escogido para que

$$\frac{2rC}{\theta_1} = \chi^2_{\beta}(2r) \quad (8.50)$$

y significa que

$$C = \theta_1 \frac{\chi_{\beta}^2(2r)}{2r} \quad (8.51)$$

Igualando esta ecuación con (8.48), tenemos el requerimiento que r debe ser escogido para satisfacer la condición

$$\frac{\theta_0}{\theta_1} = \theta_0 \frac{\chi_{\beta}^2(2r)}{\chi_{1-\alpha}^2(2r)} \quad (8.52)$$

Si la relación no puede ser exactamente satisfecha y generalmente no puede ser, la igualdad sería reemplazada por la desigualdad

$$\frac{\theta_0}{\theta_1} > \frac{\chi_{\beta}^2(2r)}{\chi_{1-\alpha}^2(2r)} \quad (8.53)$$

Para evaluar $P_{\alpha}(\theta)$ para otros valores de θ_0 y θ_1 , se usa

$$= \sum_{k=0}^{r-1} p_{oi} \left(k \mid \frac{rC}{\theta} \right) \quad (8.54)$$

Ejemplo 8.8

La administración desea aceptar con probabilidad 0.95 algún producto con vida media de 10,000 horas y ha decidido que $r = 5$ artículos pueden ser reservados para destruirse. ¿Cómo la prueba debe ser realizada? ¿Cuál es la probabilidad de aceptar el producto con una vida media de solamente de 4,000 horas?

Solución:

Calculamos $C = [10,000 \chi_{.95}^2(10)]/10 = 1000(3.940) = 3.940$. Algunos lotes con una muestra de vida media al menos tan grandes como 3940 horas será aceptada. Para $\theta_1 = 4,000$ tenemos

$$P_c(4000) = P[T \leq 5(3940)] = P[T \leq 19,700]$$

$$= \sum_{k=0}^4 p_{oi} \left(k; \frac{19,700}{4,000} \right) = \sum_{k=0}^4 p_{oi}(k; 4.925)$$

$$= e^{-4.925} \left[1 + 4.925 + \frac{(4.925)^2}{2} + \frac{(4.925)^3}{6} + \frac{(4.925)^4}{24} \right]$$

$$\approx 0.4538$$

IX. MANEJO DE LA MIL-H108.

INTRODUCCIÓN

La teoría fundamental del desarrollo de pruebas de vida, que incluyen las Curvas Características de Operación (CCO), asume que las medidas de duración de vida son dibujadas de una distribución exponencial.

Es importante hacer notar que los planes de toma de muestras para pruebas de vida no deben ser usadas indiscriminadamente, simplemente porque es posible obtener datos de prueba de vida.

La MIL-STD-H108 está dividida en dos capítulos. El primer capítulo es una introducción general muy breve y el segundo capítulo está compuesto por procedimientos y tablas y se divide en cuatro secciones:

- La sección A describe los procedimientos generales y la descripción de toma de muestras para pruebas de vida.
- La sección B describe los procedimientos específicos y aplicaciones de toma de muestras cuando las pruebas de vida son terminadas en un número prefijado de fallas. Ésta sección a su vez es dividida en tres partes:
 - Procedimientos de aceptación.
 - Duración esperada de las pruebas de vida y consideraciones de costo en la elección de los tamaños de las muestras.
 - Planes de prueba de vida para ciertos valores específicos de α , β , θ_1/θ_0 .
- La sección C proporciona los planes de toma de muestras cuando las pruebas de vida son terminadas en un tiempo prefijado, y también se divide en tres partes:
 - Procedimientos de aceptación.
 - Planes de prueba de vida para ciertos valores específicos de α , β , θ_1/θ_0 y T/θ_0 .
 - Planes de prueba de vida basados en proporción al tiempo especificado antes de la falla del lote.
- La sección D describe los planes de toma de muestras para pruebas de vida secuencial.

Las Curvas Características de Operación para las pruebas de vida de la sección B, parte I, sección C, parte I y sección D son mostradas en la tabla 9A-2 (tabla 2A-2). Las CCO de la tabla 9A-2 (tabla 2A-2) han sido calculadas para las pruebas de vida de la sección B, parte I, pero son igualmente aplicables para los planes de muestreo de la sección C, parte I y sección D.

Los procedimientos descritos están basados en la premisa de que las pruebas de vida son monitoreadas continuamente. Si las pruebas son monitoreadas periódicamente, los valores obtenidos de las tablas y curvas son solamente aproximaciones.

SECCIÓN A

DESCRIPCIONES GENERALES PARA LOS PLANES DE TOMA DE MUESTRAS PARA LAS PRUEBAS DE VIDA

A1 ALCANCE

A1.1 Propósito. Este manual establece los Planes de Toma de Muestras para la Prueba de Vida para determinar la aceptabilidad de un producto cuando las muestras son sacadas al azar de una distribución exponencial. Antes de empezar con las pruebas de vida debemos conocer algunas notaciones que se usan en este manual.

A1.2 Especificación de la Vida Media Aceptable. θ_0 es el valor de la vida media aceptable, debe ser especificado excepto cuando se usen los procedimientos de la sección C, parte III.

A1.3 Especificación de la Vida Media Inaceptable. θ_1 es el valor de la vida media inaceptable y debe ser especificado con anticipación para las pruebas de vida cuando se usen los procedimientos de la sección B, parte III y sección C, parte II.

A1.4 Especificación de la Parte Aceptable del Lote que Falla Antes del Tiempo Especificado. p_0 es el valor aceptable de que el lote falle antes del tiempo especificado, para ser usado en la prueba de vida debería ser especificado con anticipación para los procedimientos de la sección C, parte III.

A1.5 Especificación de la Parte Inaceptable del Lote que Falla Antes del Tiempo Especificado. p_1 es el valor inaceptable de que el lote falle antes del tiempo especificado, debería ser especificado con anticipación en las pruebas de vida cuando se usen los procedimientos de la sección C, parte III.

A2 RIESGOS PARA LA TOMA DE MUESTRAS

A2.1 Riesgo del Fabricante (α). Es la probabilidad de rechazar los lotes con vida media θ_0 . Para los procedimientos de la sección C, parte III, el riesgo del fabricante puede ser también definido como la probabilidad de rechazar los lotes con p_0 como la parte

aceptable de que el lote falle antes del tiempo especificado. Diferentes valores numéricos se resumen abajo para α y las tablas maestras de muestreo en las cuales son dadas.

Procedimientos para	Riesgo del productor	Tabla
Sección B, parte I.....	0.01, 0.05, 0.10, 0.25, 0.50.....	B-1
Sección B, parte III.....	0.01, 0.05, 0.10, 0.25,	B-5
Sección C, parte I.....	0.01, 0.05, 0.10, 0.25, 0.50.....	C-1, C-2
Sección C, parte II.....	0.01, 0.05, 0.10, 0.25,	C-3, C-4
Sección C, parte III.....	0.01, 0.05, 0.10,	C-5
Sección D.....	0.01, 0.05, 0.10, 0.25, 0.50.....	D-1

A2.2 Especificaciones del Riesgo del Fabricante. El valor particular de α a ser usado en las pruebas de vida deberían ser seleccionadas entre los diferentes valores numéricos dados en el párrafo A2.1 y especificados con anticipación en las pruebas de vida.

A2.3 Riesgo del Consumidor (β). Es la probabilidad de aceptar los lotes con una vida media θ_1 . Para los procedimientos de la sección C, parte III, el riesgo del consumidor puede también ser definido como la probabilidad de aceptar los lotes con p_1 como la parte inaceptable de que el lote falle antes del tiempo especificado. Diferentes valores numéricos se resumen abajo para β y las tablas maestras de muestreo en las cuales son dadas.

Procedimientos para	Riesgo del consumidor	Tabla
Sección B, parte I.....	0.10.....	B-1
Sección B, parte III.....	0.01, 0.05, 0.10, 0.25,	B-5
Sección C, parte I.....	0.10.....	C-1, C-2
Sección C, parte II.....	0.01, 0.05, 0.10, 0.25,	C-3, C-4
Sección C, parte III.....	0.01, 0.05, 0.10,	C-5
Sección D.....	0.10.....	D-1

El valor más pequeño de β , mayor es la protección en contra de aceptar lotes con vida media baja o de alta razón de falla.

A2.4 Especificaciones del Riesgo del Consumidor. El valor particular de β a ser usado en las pruebas de vida deberían ser seleccionadas entre los diferentes valores numéricos dados en el párrafo A2.3 especificados con anticipación en las pruebas de vida.

A3 CURVAS CARACTERÍSTICAS DE OPERACIÓN (CCO)

A3.1 Curva Característica de Operación. La CCO de un plan de toma de muestras para pruebas de vida, es la curva que muestra la probabilidad de un lote sometido con vida media dada que cumplirá el criterio de aceptabilidad en base al plan de toma de muestras. Las CCO dadas en la tabla 9A-2 (tabla 2A-2) son igualmente aplicables para las pruebas de muestreo de la sección B, parte I; sección C, parte I y sección D. Más aún, las Curvas son también aplicables para ambos procedimientos de muestreo, con o sin reemplazo. Las abscisas de las CCO son expresadas como la razón θ/θ_0 en la tabla 9A-2 (tabla 2A-2), así que el mismo conjunto de CCO son aplicables a pesar de los valores especificados de la vida media aceptable θ_0 .

A3.2 Código de Designación para la Toma de Muestras. Las toma de muestras de prueba de vida de la sección B, parte I; sección C, parte I; y sección D, junto con las CCO asociadas, son designadas por código de letras y números. Los códigos de muestreo están dados en la tabla 9A-1 (tabla 2A-1) y es determinado por los valores de α , β , θ_1/θ_0 . Las CCO de todas las toma de muestras, designados por el mismo código pasan a través de dos puntos $(1, 1-\alpha)$ y $(\theta_1/\theta_0, \beta=0.10)$. Así, todos los planes para la toma de muestras las cuales son designadas por el mismo código, ofrecen esencialmente la misma protección.

A3.3 La Razón θ_1/θ_0 Como Medición de Protección Ofrecida por la Toma de Muestras. El riesgo de consumidor β ha sido definido en el párrafo A2.3 como el riesgo de aceptar lotes con vida media θ_1 . Porque las CCO son dibujadas con abscisas de θ/θ_0 , la razón de θ_1/θ_0 es también una medida de la vida media la cual es aceptada con una probabilidad β . La razón de θ_1/θ_0 debe ser mayor que cero pero menor que la unidad. Si α , β , θ_0 son constantes, θ_1/θ_0 se incrementa, la protección ofrecida por los planes de toma de muestras en contra de aceptar lotes con vida media baja también se incrementa. Así la tabla 9A-1 (tabla 2A-1) permite comparaciones de la cantidad de protección ofrecida por diversos planes de muestreo, para alguna columna, la protección se incrementa como θ_1/θ_0 se incrementa.

Table 8A-1

Life Test Sampling Plan Code Designation

Index of Life Test Sampling Plans of section 2B, part I; section 2C, part 1, and section 2D.
OC curves are given for these sampling plans in table 2A-2

$\alpha=0.01$ $\beta=0.10$		$\alpha=0.05$ $\beta=0.10$		$\alpha=0.10$ $\beta=0.10$		$\alpha=0.20$ $\beta=0.10$		$\alpha=0.50$ $\beta=0.10$	
Code	A/L	Code	A/L	Code	A/L	Code	A/L	Code	A/L
A-1	0.004	B-1	0.022	C-1	0.046	D-1	0.125	E-1	0.301
A-2	.038	B-2	.091	C-2	.131	D-2	.247	E-2	.423
A-3	.082	B-3	.184	C-3	.267	D-3	.325	E-3	.502
A-4	.123	B-4	.265	C-4	.381	D-4	.379	E-4	.550
A-5	.160	B-5	.346	C-5	.504	D-5	.421	E-5	.584
A-6	.193	B-6	.428	C-6	.640	D-6	.455	E-6	.611
A-7	.221	B-7	.512	C-7	.770	D-7	.483	E-7	.633
A-8	.247	B-8	.598	C-8	.906	D-8	.506	E-8	.652
A-9	.270	B-9	.681	C-9	.118	D-9	.526	E-9	.667
A-10	.291	B-10	.767	C-10	.138	D-10	.544	E-10	.681
A-11	.311	B-11	.856	C-11	.157	D-11	.560	E-11	.700
A-12	.328	B-12	.947	C-12	.171	D-12	.560	E-12	.710
A-13	.340	B-13	.100	C-13	.187	D-13	.560	E-13	.711
A-14	.346	B-14	.111	C-14	.194	D-14	.563	E-14	.710
A-15	.354	B-15	.125	C-15	.206	D-15	.577	E-15	.721
A-16	.361	B-16	.140	C-16	.225	D-16	.581	E-16	.728
A-17	.363	B-17	.157	C-17	.243	D-17	.580	E-17	.736
A-18	.367	B-18	.175	C-18	.274	D-18	.574	E-18	.742

Producer's risk α is the probability of rejecting lots with mean life μ_0 .
Consumer's risk β is the probability of accepting lots with mean life μ_1 .

Tabla 9A-1 (Tabla 2A-1)

Designación de los Planes de Código Para la Toma de Muestra de Pruebas de Vida.

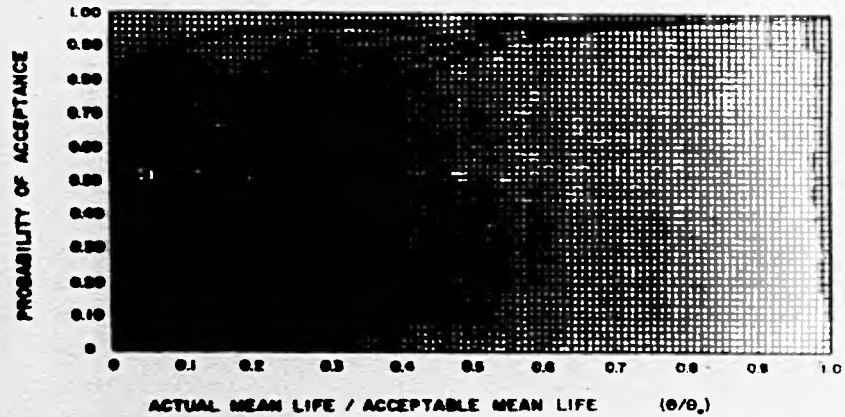
Tablas 9A-2 (Tabla 2A-2)

Curvas Características de Operación para los Planes de Toma de Muestras para Pruebas de Vida de la sección B parte I; sección C, parte I; y sección D.

TABLE 2A-2

OPERATING CHARACTERISTIC CURVES FOR LIFE TESTS TERMINATED
UPON OCCURRENCE OF PRE-ASSIGNED NUMBER OF FAILURES

(Curves for sequential plans and tests terminated at pre-assigned time are essentially equivalent.)



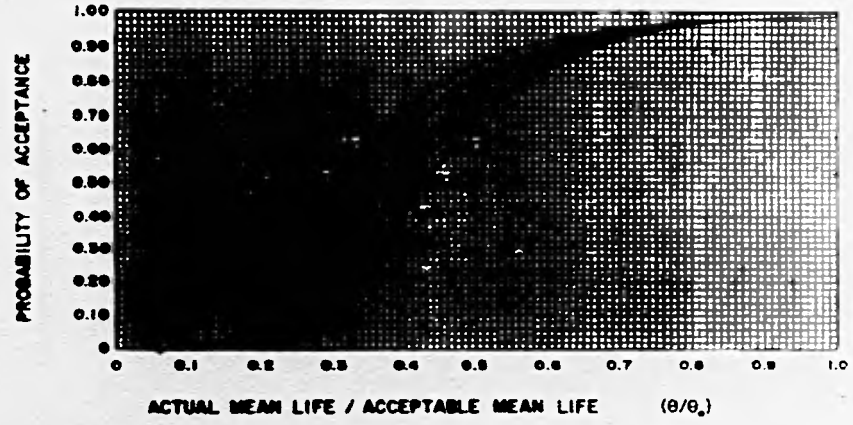
These curves are valid only when
sampling from an exponential
distribution.

Note: Notations on curves are as given.

TABLE 2A-2

OPERATING CHARACTERISTIC CURVES FOR LIFE TESTS TERMINATED UPON OCCURRENCE OF PRE-ASSIGNED NUMBER OF FAILURES

(Curves for sequential plans and tests terminated at pre-assigned time are essentially equivalent.)



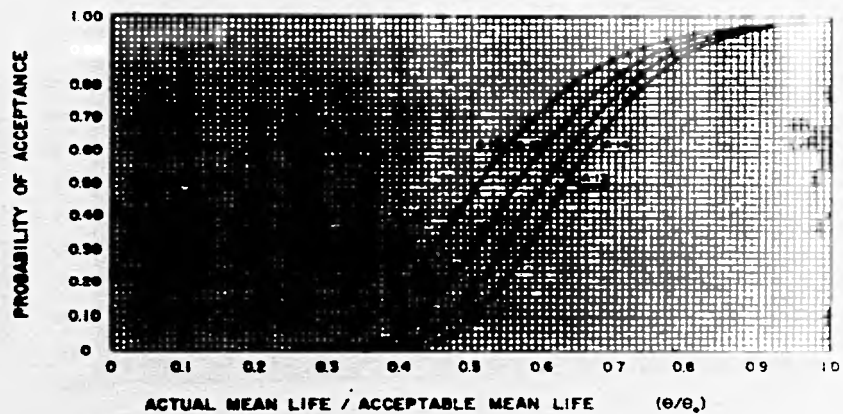
These curves are valid only when sampling from an exponential distribution.

Note: Notations on curves are sample plan code designation.

TABLE 2A-2

**OPERATING CHARACTERISTIC CURVES FOR LIFE TESTS TERMINATED
UPON OCCURRENCE OF PRE-ASSIGNED NUMBER OF FAILURES**

(Curves for sequential plans and tests terminated at pre-assigned time are essentially equivalent.)



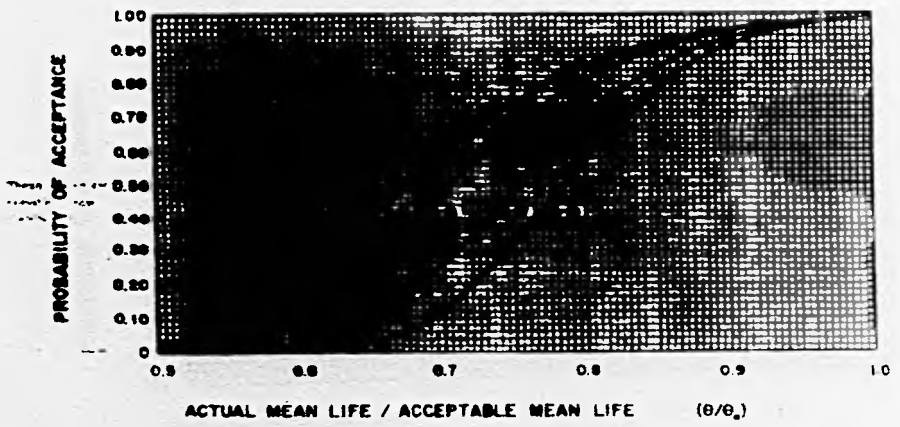
These curves are valid only when
sampling from an exponential
distribution.

Note: Notations on curves are sample plan code designation.

TABLE 2A-2

OPERATING CHARACTERISTIC CURVES FOR LIFE TESTS TERMINATED UPON OCCURRENCE OF PRE-ASSIGNED NUMBER OF FAILURES

(Curves for exponential plots and tests terminated at pre-assigned time are essentially equivalent)



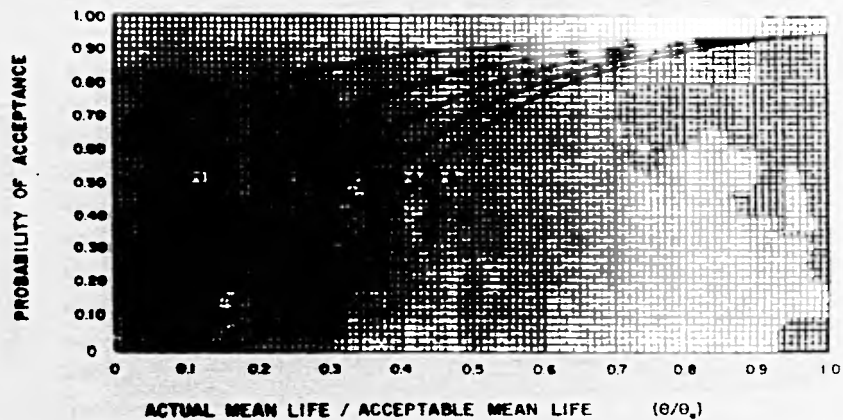
These curves are valid only when sampling from an exponential distribution.

Note: Notations on curves are sample plan code designation.

TABLE 2A-2

OPERATING CHARACTERISTIC CURVES FOR LIFE TESTS TERMINATED
UPON OCCURRENCE OF PRE-ASSIGNED NUMBER OF FAILURES

(Curves for sequential plans and tests terminated at pre-assigned time are essentially equivalent)



These curves are valid only when
sampling from an exponential
distribution.

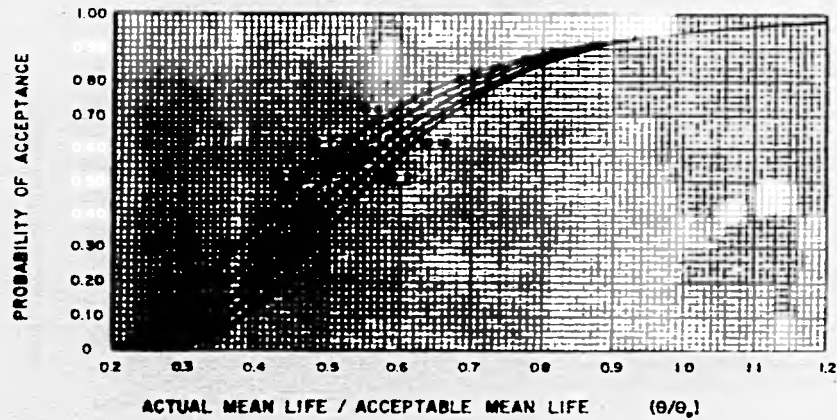
Note: Notations on curves are sample plan code designation.

TABLE 2A-2

151

**OPERATING CHARACTERISTIC CURVES FOR LIFE TESTS TERMINATED
UPON OCCURRENCE OF PRE-ASSIGNED NUMBER OF FAILURES**

(Curves for sequential plans and tests terminated at pre assigned time are essentially equivalent.)



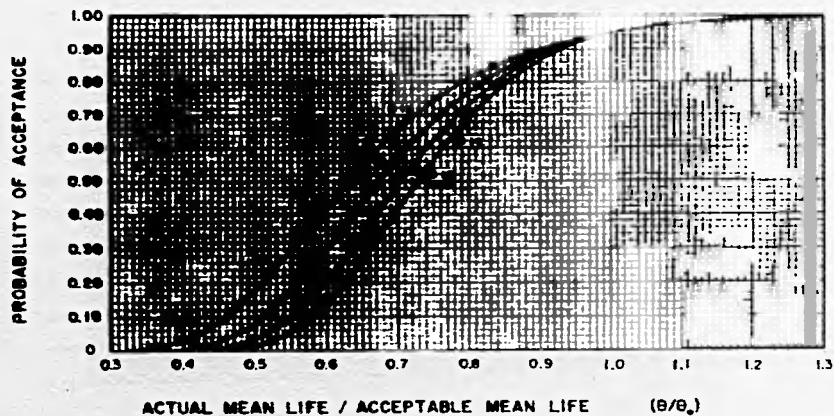
These curves are valid only when sampling from an exponential distribution.

Note: Notations on curves are sample plan code designation.

TABLE 2A-2

OPERATING CHARACTERISTIC CURVES FOR LIFE TESTS TERMINATED
UPON OCCURRENCE OF PRE-ASSIGNED NUMBER OF FAILURES

(Curves for sequential plans and tests terminated at pre-assigned time are essentially equivalent.)



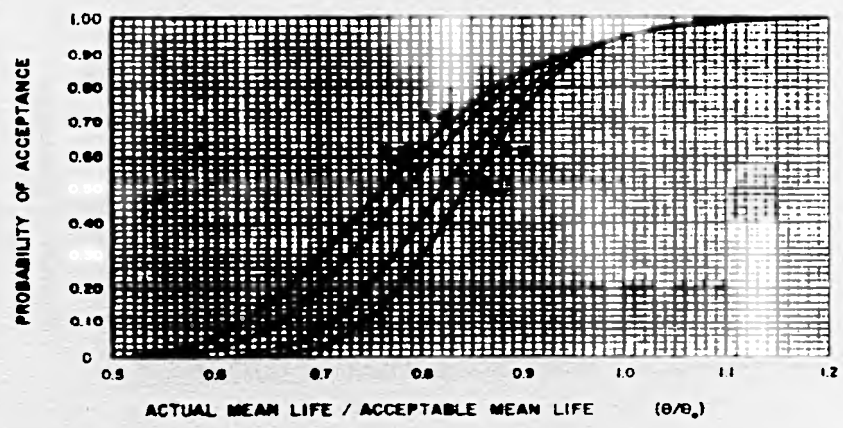
These curves are valid only when
sampling from an exponential
distribution.

Note: Notations on curves are sample plan code designation.

TABLE 2A-2

**OPERATING CHARACTERISTIC CURVES FOR LIFE TESTS TERMINATED
UPON OCCURRENCE OF PRE-ASSIGNED NUMBER OF FAILURES**

(Curves for sequential plans and tests terminated at pre-assigned time are essentially equivalent)



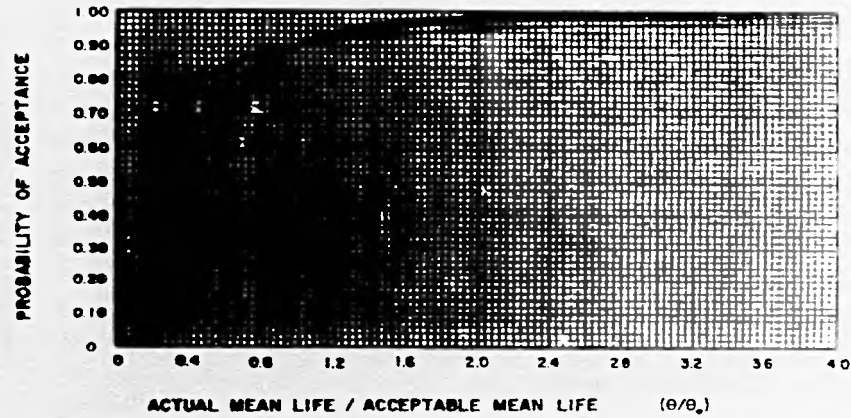
These curves are valid only when sampling from an exponential distribution.

Note: Notations on curves are sample plan code designation.

TABLE 2A-2

**OPERATING CHARACTERISTIC CURVES FOR LIFE TESTS TERMINATED
UPON OCCURRENCE OF PRE-ASSIGNED NUMBER OF FAILURES**

(Curves for sequential plans and tests terminated at pre-assigned time are essentially equivalent)



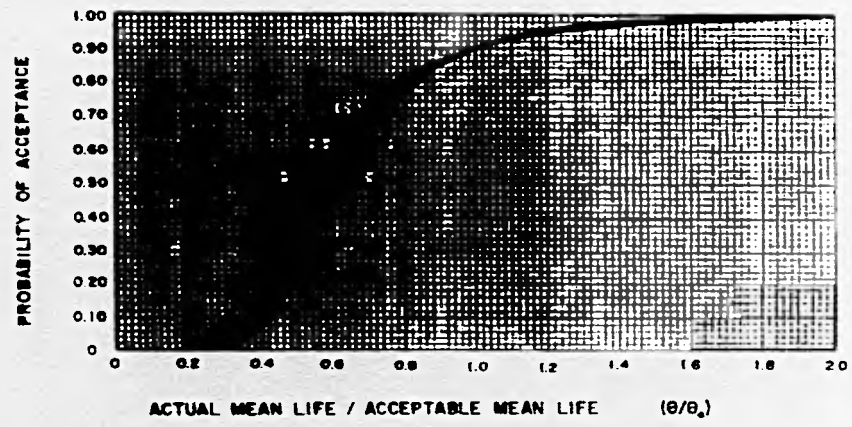
These curves are valid only when
sampling from an exponential
distribution.

Note: Notations on curves are sample size and acceptance number.

TABLE 2A-2

**OPERATING CHARACTERISTIC CURVES FOR LIFE TESTS TERMINATED
UPON OCCURRENCE OF PRE-ASSIGNED NUMBER OF FAILURES**

(Curves for sequential plans and tests terminated at pre-assigned time are essentially equivalent)



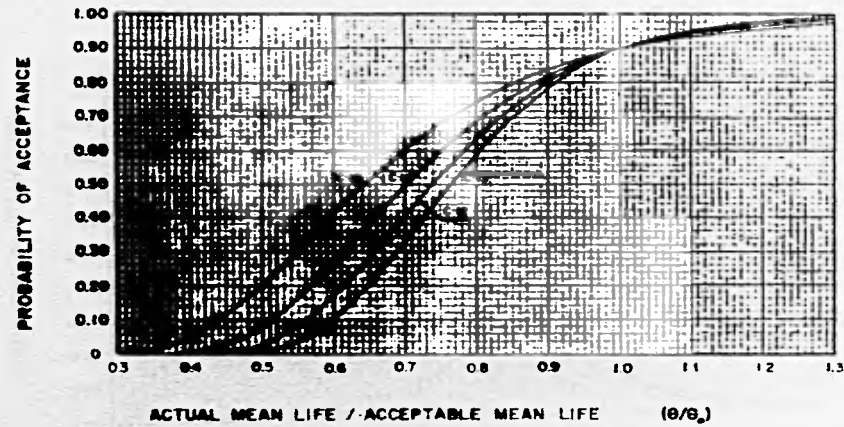
These curves are valid only when sampling from an exponential distribution.

Note: Notations on curves are simple plan code designation

TABLE 2A-2

OPERATING CHARACTERISTIC CURVES FOR LIFE TESTS TERMINATED
UPON OCCURRENCE OF PRE-ASSIGNED NUMBER OF FAILURES

(Curves for sequential plans and tests terminated at pre-assigned time are essentially equivalent)



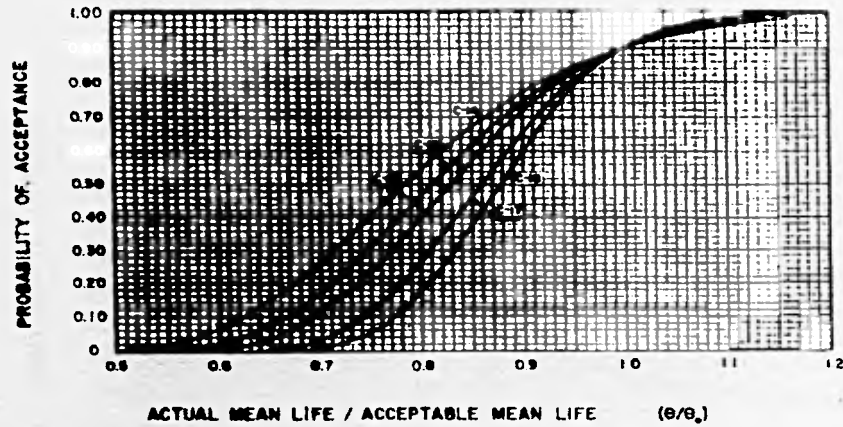
These curves are valid only when
sampling from an exponential
distribution.

Note: Notations on Curves are sample size and number of failures.

TABLE 2A-2

**OPERATING CHARACTERISTIC CURVES FOR LIFE TESTS TERMINATED
UPON OCCURRENCE OF PRE-ASSIGNED NUMBER OF FAILURES**

(Curves for sequential plans and tests terminated at pre-assigned time are essentially equivalent.)



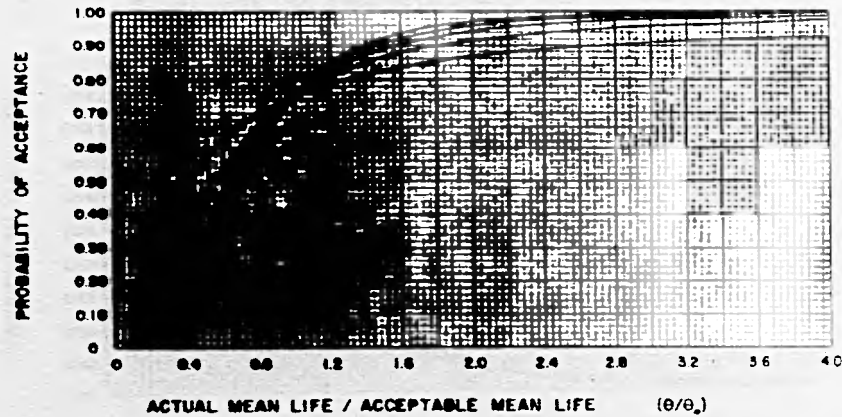
These curves are valid only when sampling from an exponential distribution.

Note: Notations on curves are sample size designation.

TABLE 2A-2

OPERATING CHARACTERISTIC CURVES FOR LIFE TESTS TERMINATED
UPON OCCURRENCE OF PRE-ASSIGNED NUMBER OF FAILURES

(Curves for sequential plans and tests terminated at pre-assigned time are essentially equivalent.)



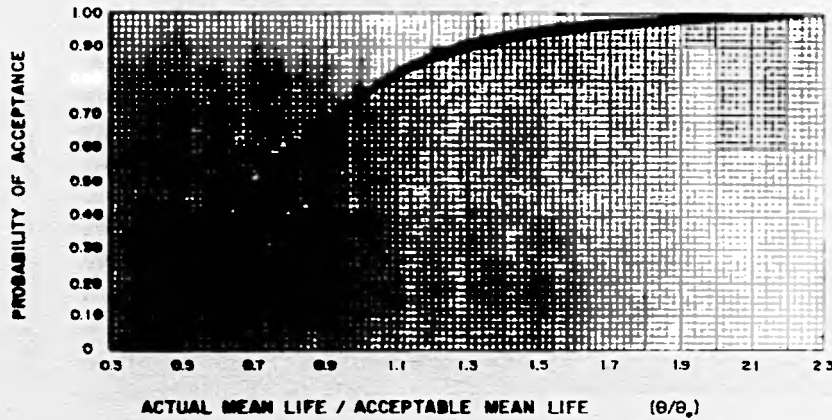
These curves are valid only when
sampling from an exponential
distribution.

Note: Notations on curves are sample plan code designation.

TABLE 2A-2

OPERATING CHARACTERISTIC CURVES FOR LIFE TESTS TERMINATED
UPON OCCURRENCE OF PRE-ASSIGNED NUMBER OF FAILURES

[Curves for sequential plans and tests terminated at pre-assigned time are essentially equivalent.]



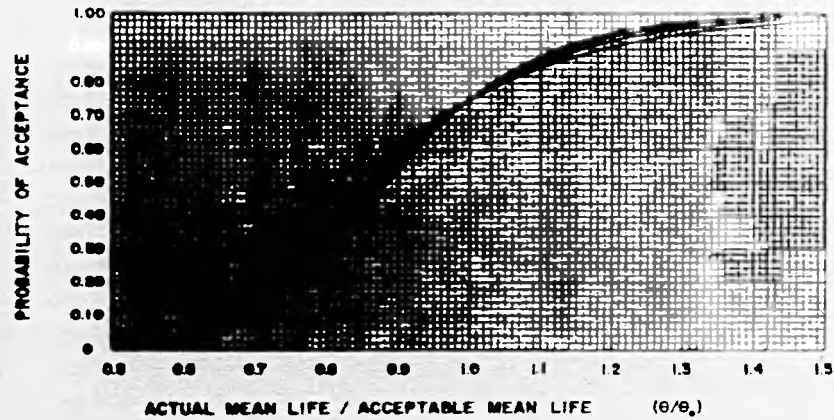
These curves are valid only when sampling from an exponential distribution.

Note: Notations on curves are sample plan code designation.

TABLE 2A-2

**OPERATING CHARACTERISTIC CURVES FOR LIFE TESTS TERMINATED
UPON OCCURRENCE OF PRE-ASSIGNED NUMBER OF FAILURES**

(Curves for sequential plans and tests terminated at pre-assigned time are essentially equivalent.)



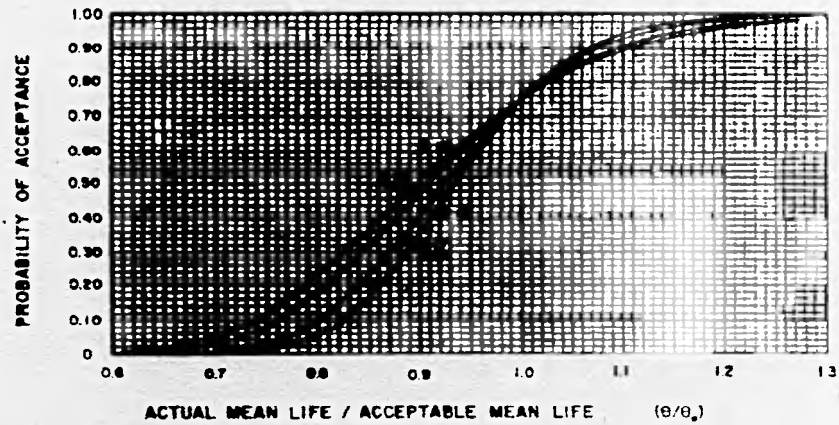
These curves are valid only when sampling from an exponential distribution.

Note: Notations on curves are sample plan code designation.

TABLE 2A-2

**OPERATING CHARACTERISTIC CURVES FOR LIFE TESTS TERMINATED
UPON OCCURRENCE OF PRE-ASSIGNED NUMBER OF FAILURES**

(Curves for sequential plans and tests terminated at pre-assigned time are essentially equivalent.)



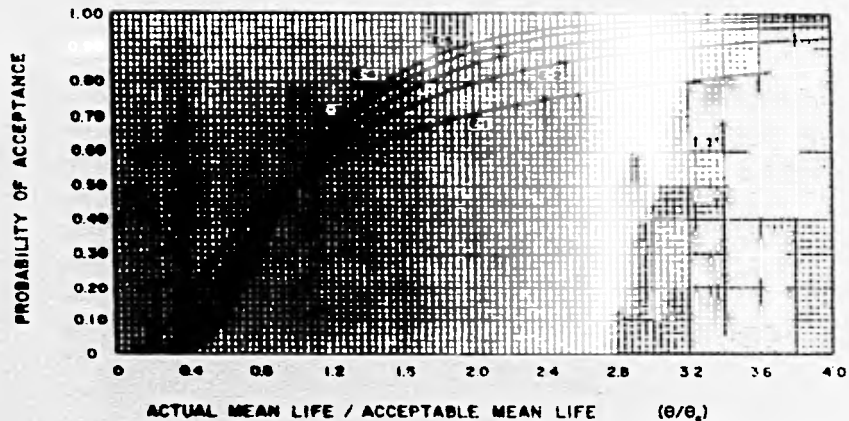
These curves are valid only when sampling from an exponential distribution.

Note: Notations on curves are sample plan code designations.

TABLE 2A-2

OPERATING CHARACTERISTIC CURVES FOR LIFE TESTS TERMINATED
UPON OCCURRENCE OF PRE-ASSIGNED NUMBER OF FAILURES

[Curves for sequential plans and tests terminated at pre-assigned time are essentially equivalent.]



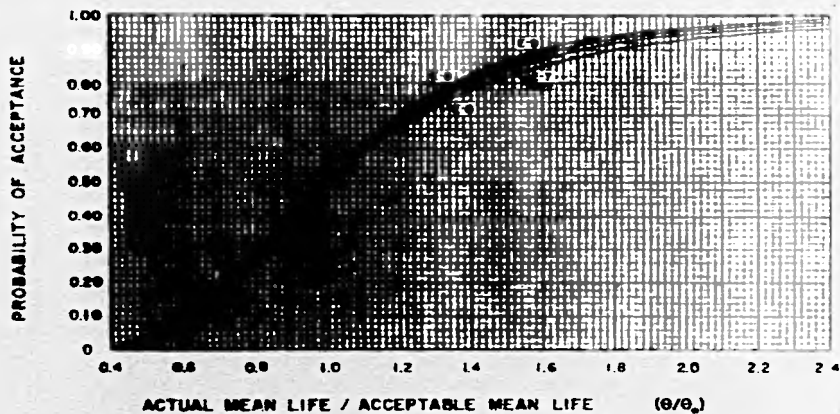
These curves are valid only when
sampling from an exponential
distribution.

Note: Notations on curves are sample size n and number of failures r .

TABLE 2A-2

OPERATING CHARACTERISTIC CURVES FOR LIFE TESTS TERMINATED UPON OCCURRENCE OF PRE-ASSIGNED NUMBER OF FAILURES

(Curves for sequential plans and tests terminated at pre-assigned time are essentially equivalent.)



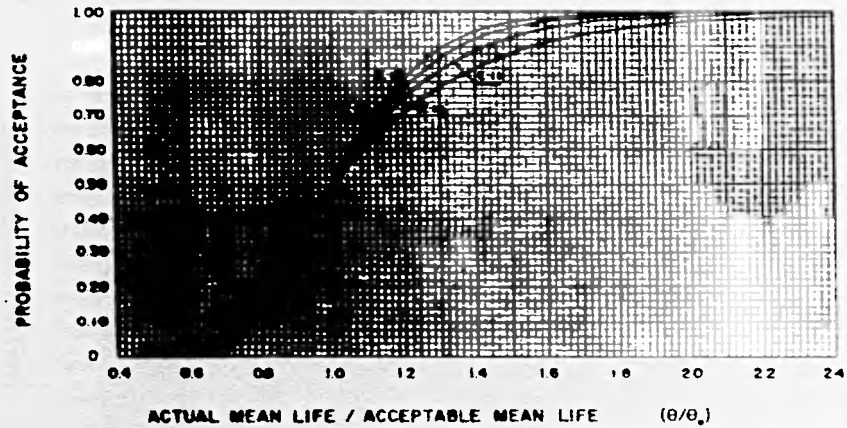
These curves are valid only when sampling from an exponential distribution.

Note: Notations on curves are sample size designation.

TABLE 2A-2

OPERATING CHARACTERISTIC CURVES FOR LIFE TESTS TERMINATED
UPON OCCURRENCE OF PRE-ASSIGNED NUMBER OF FAILURES

(Curves for sequential plans and tests terminated at pre-assigned time are essentially equivalent.)



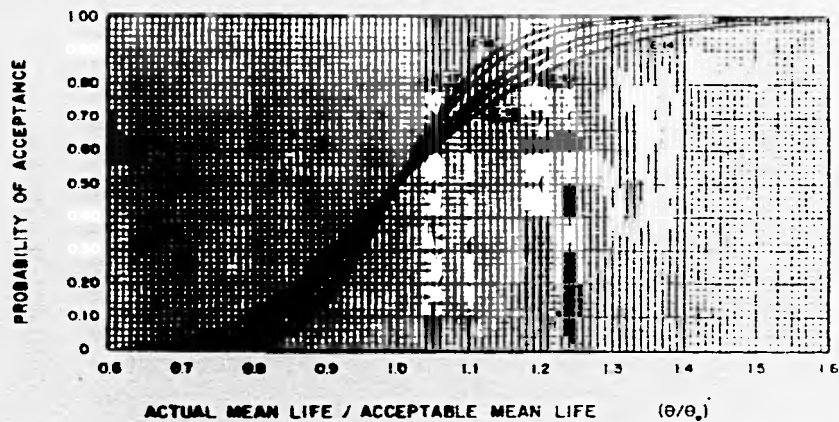
These curves are valid only when
sampling from an exponential
distribution.

Note: Notations on curves are sample plan code designation.

TABLE 2A-2

**OPERATING CHARACTERISTIC CURVES FOR LIFE TESTS TERMINATED
UPON OCCURRENCE OF PRE-ASSIGNED NUMBER OF FAILURES**

(Curves for sequential plans and tests terminated at pre-assigned time are essentially equivalent.)



These curves are valid only when sampling from an exponential distribution.

Note: Notations on curves are sample n on line designator.

A4 ESPECIFICANDO LOS PROCEDIMIENTOS DE ACEPTACIÓN

Para identificar completamente los planes de muestreo a ser usados, los siguientes deben ser especificados para las tomas de muestras de:

seccion B, parte I..... α, r, θ_0 o el código de muestreo, θ_0
 seccion B, parte III..... $\alpha, \beta, \theta_0, \theta_1$
 seccion C, parte I..... θ_0, r, α, n o el código de muestreo, n, θ_0
 seccion C, parte II..... $\alpha, \beta, \theta_0, \theta_1, T$
 seccion C, parte III..... $\alpha, \beta, p_1, p_0, T$ o $\alpha, \beta, G_1, G_0, T$
 seccion D.....código de muestreo, θ_0

además, el uso de pruebas de vida con o sin reemplazo pueden ser especificados, excepto cuando se usen las pruebas de muestreo de la sección C, parte III.

SECCIÓN B

PRUEBAS DE VIDA TERMINADAS EN PRESENCIA DE UN NÚMERO
PREFIJADO DE FALLAS

PARTE I

PROCEDIMIENTOS DE ACEPTACIÓN

BI MUESTREO PARA LAS PRUEBAS DE VIDA

Esta parte del manual describe los procedimientos para el uso con pruebas de vida que son terminadas al ocurrir un número prefijado de fallas. Aquí se dan 2 procedimientos de aceptación 1) cuando la prueba es sin reemplazo, y 2) cuando la prueba es con reemplazo.

BI.1 Uso de las Muestras para las Pruebas de Vida. Para determinar si el lote cumple con el criterio de aceptabilidad con respecto al promedio de la duración de vida, el muestreo debería ser usado de acuerdo con la sección A.

B2 SELECCIONANDO EL PLAN DE TOMA DE MUESTRA PARA LA PRUEBA DE VIDA

B2.1 Tablas Maestras de Muestreo. Las tablas maestras de muestreo para la toma de muestras de pruebas de vida de esta parte del manual es la tabla 9B-1 (tabla 2B-1).

B2.2 Obtención de la Toma de Muestras. Está consiste de un número de muestras, un número de terminación o finalización y una constante de aceptabilidad asociada, y es obtenida de la tabla 9B-1 (tabla 2B-1).

B2.2.1 Tamaño de la Muestra. Para los procedimientos de la sección B, parte I, la constante de aceptabilidad y las CCO no dependen de el número de unidades colocado a prueba. El tamaño de la muestra depende del costo relativo de colocar un número grande de unidades del producto a prueba y que el tiempo esperado para la prueba de vida deba continuar. El tamaño de la muestra puede ser seleccionado usando los procedimientos de la sección B, parte II.

B2.2.2 Número Final o de Terminación (r). Este puede ser seleccionado de entre la tabla 9B-1 (tabla 2B-1), y especificado antes de iniciar la prueba de vida. El escoger este número debería ser dependiente de el grado de protección deseado en contra de la aprobación del material con vida media inaceptable. El número de finalización más

grande, más grande es la razón de θ_1/θ_0 y, como se mencionó en el párrafo A3.3, más grande es la confianza en contra de aceptar el material con vida media inaceptable.

B2.2.3 Constante de Aceptabilidad (C). La constante de aceptabilidad C corresponde al número de finalización aplicable r y al riesgo del fabricante α , que es obtenido de la tabla maestra multiplicando el valor de la tabla por la vida media aceptable θ_0 .

B3 PROCEDIMIENTO DE ACEPTABILIDAD DEL LOTE CUANDO LA PRUEBA ES SIN REEMPLAZO.

B3.1 Vida Media Estimada. La aceptabilidad de un lote, cuando usamos una prueba de vida de esta parte del manual, debería ser calculada por la cantidad $\hat{\theta}_{r,n}$.

B3.2 Cálculos. La siguiente cantidad debería ser calculada de los resultados de la pruebas:

$$\hat{\theta}_{r,n} = \frac{1}{r} \left[\sum_{i=1}^r x_{i,n} + (n-r)x_{r,n} \right]$$

donde $\hat{\theta}_{r,n}$ es la vida media estimada del lote,

r es el número de terminación o finalización,

n es el tamaño de la muestra,

$x_{i,n}$ es el tiempo cuando la i -ésima falla ocurre $i=1, 2, \dots, r$.

B3.3 Criterio de Aceptabilidad. Compare la cantidad $\hat{\theta}_{r,n}$ con la constante de aceptabilidad C , mencionada en el párrafo B2.2.3. Si $\hat{\theta}_{r,n}$ es igual o mayor que C , el lote cumple con el criterio de aceptabilidad. Si $\hat{\theta}_{r,n}$ es menor que C , entonces el lote no cumple con el criterio de aceptabilidad.

B4 PROCEDIMIENTO DE ACEPTABILIDAD DEL LOTE CUANDO LA PRUEBA ES CON REEMPLAZO.

B4.1 Vida Media Estimada. La aceptabilidad de un lote, cuando usamos una prueba de vida de esta parte del manual, debería ser calculada por la cantidad $\hat{\theta}_{r,n}$.

B4.2 Cálculos. La siguiente cantidad debería ser calculada de los resultados de la prueba:

$$\hat{\theta}_{r,n} = nx_{r,n}/r$$

donde $\hat{\theta}_{r,n}$ es la vida media estimada del lote,

r es el número de terminación o finalización,

n es el tamaño de la muestra,

$X_{r,n}$ es el tiempo cuando ocurre la r -ésima falla.

B4.3 Criterio de Aceptabilidad. Comparar la cantidad $\hat{\theta}_{r,n}$ con la constante de aceptabilidad C , mencionada en el párrafo B2.2.3. Si $\hat{\theta}_{r,n}$ es igual o mayor que C , el lote cumple con el criterio de aceptabilidad; Si $\hat{\theta}_{r,n}$ es menor que C , entonces el lote no cumple con el criterio de aceptabilidad.

Ejemplo B-1 (Uso de la tabla 9B-1 (tabla 2B-1)).

Ejemplo: Encontrar los planes de prueba de vida la cual es detenida al ocurrir la quinta falla y aceptar un lote teniendo una vida media aceptable de 1,000 hrs. con probabilidad de 0.90.

Solución: Usando la notación antes mencionada, $\theta_0 = 1,000$, $\alpha = 0.10$ y $r = 5$. En caso de que la prueba sea sin reemplazo, la ecuación es

$$\hat{\theta}_{r,n} = \frac{1}{5} [x_{1,n} + x_{2,n} + x_{3,n} + x_{4,n} + x_{5,n} + (n-5)x_{5,n}]$$

y en el caso de que la prueba sea con reemplazo

$$\hat{\theta}_{r,n} = nx_{5,n}/5$$

El criterio de aceptabilidad es, aceptar el lote si

$$\hat{\theta}_{5,n} \geq C \\ \geq \theta_0(C/\theta_0) = (1,000)(0.487) = 487.$$

La cantidad $C/\theta_0 = 0.487$ es obtenida de la tabla 9B-1 (tabla 2B-1). En otras palabras, colocar n piezas a prueba. Esperar hasta que las primeras cinco fallas ocurran. Calcular $\hat{\theta}_{5,n}$. Aceptar el lote si $\hat{\theta}_{5,n} \geq 487$; rechazar el lote de otra manera.

Comentario 1: La designación de código para el plan de toma de muestras de arriba es obtenido de la tabla 9B-1 (tabla 2B-1) como C-5. De la tabla 9A-2 (tabla 2A-2), la probabilidad de aceptar un lote con vida media de, digamos, 500 horas puede ser obtenido encontrando la ordenada de la CCO etiquetada como C-5 en el punto donde la abscisa $\theta/\theta_0 = 500/1000 = 0.5$. La probabilidad es cercana a 0.47.

$\theta =$ es la vida media o vida promedio del producto.

Comentario 2: En este ejemplo, si el número de finalización o terminación ha sido seleccionado como 6 en lugar de 5, la probabilidad de aceptar un lote con vida media de 500 horas es obtenido de la CCO como C-6. La probabilidad es cercana a 0.41. Esto ilustra el comentario hecho en el parrafo B2.2.2 que el número de finalización más grande, más alta es la probabilidad de rechazar los lotes con vida media inaceptable.

Ejemplo B-2 (Cálculo de la prueba sin reemplazo).

Ejemplo: Supongamos que en la prueba de vida del ejemplo B-1, 10 unidades de un cierto producto han sido colocadas a prueba. Si las unidades que fallaron no fueron reemplazadas y el tiempo de las primeras cinco fallas fueron 50, 75, 125, 250 y 300, determinar si el lote cumplió el criterio de aceptabilidad.

Solución: En este caso

$$\hat{\theta}_{5,10} = \frac{50+75+125+250+300+5(300)}{5} = 460$$

entonces $460 < 487$, el lote no cumplió con los criterios de aceptabilidad.

Ejemplo B-3 (Cálculo de la prueba con reemplazo).

Ejemplo: Usando otra vez el ejemplo B-1, las 10 unidades han sido colocadas a prueba, si las unidades que fallaron fueron reemplazadas inmediatamente y los tiempos de las primeras cinco fallas fueron 56, 128, 176, 276 y 442, determinar si el lote cumple con el criterio de aceptabilidad.

Solución: En este caso

$$()_{5, 10}^{\wedge} = 10(442)/5 = 884$$

entonces $884 > 487$, el lote cumplió con el criterio de aceptabilidad.

*Table 9B-1
Master Table for Life Tests Terminated upon Occurrence of Preassigned Number of Failures*

r	Fisher's test table									
	0.05		0.05		0.10		0.25		0.50	
	Code	Cn	Code	Cn	Code	Cn	Code	Cn	Code	Cn
1	A-1	0.010	B-1	0.032	C-1	0.106	D-1	0.205	E-1	0.403
2	A-2	.074	B-2	.178	C-2	.266	D-2	.481	E-2	.636
3	A-3	.166	B-3	.272	C-3	.367	D-3	.576	E-3	.691
4	A-4	.266	B-4	.342	C-4	.436	D-4	.624	E-4	.719
5	A-5	.366	B-5	.394	C-5	.487	D-5	.674	E-5	.694
6	A-6	.466	B-6	.436	C-6	.536	D-6	.703	E-6	.644
7	A-7	.566	B-7	.466	C-7	.536	D-7	.736	E-7	.643
8	A-8	.666	B-8	.466	C-8	.536	D-8	.744	E-8	.660
9	A-9	.766	B-9	.522	C-9	.604	D-9	.760	E-9	.663
10	A-10	.812	B-10	.543	C-10	.622	D-10	.773	E-10	.667
15	A-11	.666	B-11	.616	C-11	.667	D-11	.816	E-11	.670
20	A-12	.554	B-12	.663	C-12	.736	D-12	.843	E-12	.666
25	A-13	.594	B-13	.666	C-13	.784	D-13	.866	E-13	.667
30	A-14	.633	B-14	.736	C-14	.774	D-14	.873	E-14	.666
40	A-15	.666	B-15	.755	C-15	.803	D-15	.866	E-15	.666
50	A-16	.701	B-16	.778	C-16	.824	D-16	.861	E-16	.663
75	A-17	.731	B-17	.818	C-17	.844	D-17	.890	E-17	.666
100	A-18	.782	B-18	.841	C-18	.874	D-18	.931	E-18	.667

Fisher's test is the probability of rejecting lots with mean life μ_0 .
Acceptance criterion: Accept lot if $r \leq Cn/C_0$.
*For combinations of the code, see part 9B-3 and table 9A-1.

Tabla 9B-1 (tabla 2B-1). Tablas Maestras para Pruebas de Vida Terminadas al Ocurrir un Número Preasignado de Fallas.

**PRUEBAS DE VIDA TERMINADAS EN PRESENCIA DE UN NÚMERO
PREFIJADO DE FALLAS**

PARTE II

**TIEMPO DE ESPERA SUPUESTO DE LAS PRUEBAS DE VIDA Y
CONSIDERACIONES DE COSTO EN LA SELECCIÓN DEL TAMAÑO DE LAS
MUESTRAS**

B5 TAMAÑO DE LA MUESTRA

Las características de Operación de los planes de toma de muestra para la sección B parte I, son independientes de el número de unidades puesto a prueba. De este modo, todas las pruebas basadas en valores comunes del número de finalización r y los riesgos del fabricante α son igualmente buenos y la selección del tamaño de la muestra n depende solamente del costo relativo de colocar un número grande de unidades a prueba y en el tiempo de espera supuesto requerido para la decisión.

Para r y α fijos, e incrementando n deseado, por un lado, se reduce el tiempo de espera supuesto; pero por otro lado, conseguimos incrementar el costo al colocar más unidades del producto a prueba. Esta parte del manual proporciona procedimientos para determinar el tamaño óptimo de la muestra basada en consideraciones de costo.

B5.1 Tiempo de Espera Supuesto. La vida promedio del lote y, como se anotó en el párrafo B5, el tamaño de la muestra sacada del lote afecta al tiempo de espera supuesto requerido para observar la r -ésima falla en una muestra de tamaño n . La r -ésima falla es esperada para que ocurra más rápidamente en muestras sacadas de los lotes con bajos valores de vida media. Los valores de tiempo supuesto, divididos por la vida media del lote cuando la prueba es sin reemplazo, son dados en las tablas 9B-2(a) (tabla 2B-2(a)) y 9B-2(b) (tabla 2B-2(b)). Los valores correspondientes para las pruebas con reemplazo no son presentados pero pueden ser calculados dividiendo el número de finalización r por el tamaño de la muestra n , por ejemplo,

$$\frac{\text{Tiempo de Espera Supuesto}}{\text{Vida Media del Lote}} = \frac{r}{n}$$

B5.2 Ahorro Relativo en Tiempo Incrementando el Tamaño de la Muestra Cuando la Prueba es sin Reemplazo. Cuando la prueba es sin reemplazo, el tiempo de espera supuesto requerido para observar la r -ésima falla en una muestra de tamaño n , ($n \geq r$), puede ser obtenido de la 9B-2(a) (tabla 2B-2(a)) ó 9B-2(b) (tabla 2B-2(b)) multiplicando el dato presentado en la tabla por la vida media del lote. Dividiendo el tiempo de espera supuesto cuando n unidades son colocadas a prueba por solamente r unidades colocadas a prueba, la vida media del lote se anula y la razón

$$\frac{\text{Tiempo de Espera Supuesto para } r \text{ Fallas en una Muestra de } n}{\text{Tiempo de Espera Supuesto para } r \text{ Fallas en una Muestra de } r}$$

es una medida de ahorro relativo esperado en tiempo debido al colocar más unidades a prueba. Una breve tabla de estas razones es dada en la tabla 9B-3 (tabla 2B-3).

B5.3 Ahorro Relativo en Tiempo Incrementando el Tamaño de la Muestra Cuando la Prueba es con Reemplazo. Cuando la prueba es con reemplazo el tiempo de espera supuesto requerido para observar la r -ésima falla en una muestra de tamaño n es igual a la cantidad $r\theta/n$. Dividiendo el tiempo de espera supuesto cuando n unidades son colocadas a prueba por solamente r unidades colocadas a prueba, la vida media de el lote se anula y la razón

$$\text{Ahorro Relativo} = r\theta/n\theta = r/n.$$

es una medida de ahorro relativo esperado en tiempo debido al usar muestras de tamaño más grandes.

B5.4 Ahorro Relativo en Tiempo Comparando las Pruebas con y sin Reemplazo. Cuando la prueba es con reemplazo, el tiempo de espera supuesto requerido para observar la r -ésima falla en una muestra de tamaño n ($n \geq r$) es igual a la cantidad $r\theta/n$. Cuando la prueba es sin reemplazo, este tiempo de espera supuesto puede ser obtenido de la 9B-2(a) (tabla 2B-2(a)) ó 9B-2(b) (tabla 2B-2(b)) multiplicando el dato de la tabla por la vida promedio de el lote θ . Dividiendo estos dos tiempos de espera supuestos, la vida promedio de el lote se cancela y la razón

$$\frac{\text{Tiempo de Esp. Sup. para } r \text{ Fallas en una Mues. de } n \text{ Cuando la Prueba es con Reemplazo}}{\text{Tiempo de Esp. Sup. para } r \text{ Fallas en una Mues. de } n \text{ Cuando la Prueba es sin Reemplazo}}$$

es una medida de ahorro relativo supuesto en tiempo debido a la toma de muestras con reemplazo. Una breve tabla de estas razones es dada en la tabla 9B-4 (tabla 2B-4).

Ejemplo B-4 (Ahorro en tiempo incrementando el tamaño de la toma de muestreo cuando la prueba es sin reemplazo).

Ejemplo: Comparar la duración promedio de tiempo necesaria para observar la falla de las 2 primeras de cada 5 unidades bajo prueba con una duración promedio de tiempo requerido para observar la falla de 2 de cada 2 unidades cuando la prueba es sin reemplazo.

Solución: De la tabla 9B-2(a) (tabla 2B-2(a)), es visto que para $r = 2$ y $n = 2$, el tiempo de espera supuesto es 1.5000θ ; y que para $r = 2$ y $n = 5$, el tiempo de espera supuesto es 0.4500θ . Así, el ahorro relativo en tiempo al colocar cinco unidades a prueba es $(0.4500 \theta) / (1.5000 \theta) = 0.300$. Esta cifra puede ser obtenida directamente de la tabla 9B-3 (tabla 2B-3). Por lo tanto, el tiempo promedio requerido cuando 5 unidades son colocadas es del 30% de el tiempo promedio requerido cuando solamente 2 unidades son usadas.

Ejemplo B-5 (Ahorro en tiempo incrementado el tamaño de la toma de muestreo cuando la prueba es con reemplazo).

Ejemplo: Hacer la misma comparación como en el ejemplo B-4 si la prueba ha sido con reemplazo.

Solución: Para $r = 2$ y $n = 2$, el tiempo de espera supuesto es θ y para $r = 2$ y $n = 5$ es $r\theta/n = 2\theta/5 = 0.4\theta$. Así el ahorro relativo en tiempo colocando 5 unidades a prueba es $0.4\theta/\theta = 0.4$. Por lo tanto, el tiempo promedio requerido cuando cinco unidades son colocadas a prueba es del 40% de el tiempo promedio requerido cuando solamente 2 unidades son usadas.

Ejemplo B-6 (Ahorro en tiempo con pruebas con reemplazo).

Ejemplo: Comparar la duración promedio del tiempo necesario para observar las fallas de las 5 primeras de cada 5 unidades bajo prueba cuando la prueba es con reemplazo con duración promedio de tiempo necesario cuando la prueba es sin reemplazo.

Solución: Cuando la prueba es con reemplazo, para $r = 5$ y $n = 5$, el tiempo de espera supuesto es θ . Cuando la prueba es sin reemplazo, la tabla 9B-2(a) (tabla 2B-2(a)) y 9B-2(b) (tabla 2B-2(b)) muestra que el tiempo de espera supuesto es 2.2833θ . Así el ahorro

relativo en tiempo con la prueba con reemplazo es $0/2.2833$, es decir, $\theta \approx 0.438$; o el tiempo promedio requerido para una decisión, reemplazando las unidades falladas, es 43.8% del tiempo requerido cuando las unidades que fallaron no son reemplazadas. Esta cifra puede también ser obtenida directamente de la tabla 9B-4 (tabla 2B-4).

B5.5 Consideración de Costos al Escoger el Tamaño de la Muestra: Los métodos para encontrar el tamaño óptimo de la muestra basados en consideraciones de costos son dados en esta sección.

B5.5.1 Costos Cuando la Prueba es sin Reemplazo: El costo total esperado de alguno de los planes de prueba de vida de la sección B, parte I, es cuando la prueba es sin reemplazo, y esta dada por

$$c_1\theta_0\left(\frac{1}{n} + \frac{1}{n-1} + \dots + \frac{1}{n-r+1}\right) + c_2n$$

donde c_1 es el costo de espera por unidad de tiempo.

c_2 es el costo de colocar una unidad de producto en prueba.

θ_0 es la vida media aceptable.

r es el número de finalización.

n es el tamaño de la muestra.

B5.5.2 Tamaño Óptimo de la Muestra Cuando la Prueba es sin Reemplazo. El valor de n el cual minimiza el costo total, como se determinó en el párrafo B5.5.1; es el tamaño óptimo de la muestra. Un método general para obtener el óptimo n es usar la tabla 9B-2(a) (tabla 2B-2(a)) ó 9B-2(b) (tabla 2B-2(b)). La n más pequeña es escogida tal que la diferencia entre el tiempo de espera supuesto para la r -ésima falla cuando ese número de unidades son colocadas a prueba y que cuando $n+1$ unidades son colocadas a prueba, es menor que la cantidad $c_2/c_1\theta_0$.

Ejemplo B-7 (Prueba de vida terminada al ocurrir un número prefijado de prueba de fallas sin reemplazo para calcular el costo).

Ejemplo: Considerar el caso donde $r = 10$, $\theta_0 = 1000$ horas, $c_1 = \$1$ por hora y $c_2 = \$100$ por unidad probada. Usando la fórmula de costo total, determinar el tamaño óptimo de la muestra si las unidades que fallan no son reemplazadas.

Solución: Usando la fórmula del párrafo B5.5.1, el costo para varios valores de n son:

n	Costo Supuesto Debido al Tiempo	Costo de las Unidades Probadas	Costo Total
10	2929	1000	3929
11	2020	1100	3120
12	1603	1200	2803
13	1346	1300	2646
14	1168	1400	2568
15	1035	1500	2535
16	931	1600	2531
17	847	1700	2547

El tamaño óptimo de la muestra es de esta manera $n = 16$.

Ejemplo B-8 (Prueba de vida terminada en presencia de un número prefijado de fallas sin reemplazo obteniendo el tamaño óptimo de la muestra con tiempo de espera supuesto).

Ejemplo: Usar la tabla 9B-2(a) (tabla 2B-2(a)) para determinar el tamaño óptimo de la muestra para el problema del ejemplo B-7.

Solución: La cantidad $c_2/c_1\theta_0$ es igual a 0.1 y de la tabla 9B-2(a) (tabla 2B-2(a)), los tiempos de espera supuestos son:

Tiempo de Espera
Supuesto para Observar la
10a falla

n	en n	en $n + 1$	Diferencia
10	2.9290	2.0199	0.9091
11	2.0199	1.6032	0.4167
12	1.6032	1.3468	0.2564
13	1.3468	1.1682	0.1786
14	1.1682	1.0349	0.1333
15	1.0349	0.9307	0.1042
16	0.9307	0.8467	*0.0840
17	0.8467	0.7773	0.0694

* El tamaño óptimo de la muestra es $n = 16$, como se vio en el ejemplo B-7, entonces ese es el tamaño de la muestra más pequeño para la cual la diferencia en el tiempo de espera supuesto es menor que $c_2/c_1\theta_0$ ó 0.1

B5.5.3 Costos Cuando la Prueba es con Reemplazo: El costo total esperado de alguno de los planes de prueba de vida de la sección B, parte I, cuando la prueba es con reemplazo, está dada por

$$c_1 \theta_0 \frac{r}{n} + c_2 (n+r-1)$$

donde c_1 el costo de espera por unidad de tiempo.

c_2 el costo de colocar una unidad de producto a prueba.

θ_0 es la vida media aceptable.

r es el número de finalización.

n es el tamaño de la muestra.

B5.5.4 Tamaño Óptimo de la Muestra Cuando la Prueba es con Reemplazo. El valor de n el cual minimiza el costo total, como se determinó en el párrafo B5.5.3, es el tamaño óptimo de la muestra. En general, el óptimo n para el caso de la prueba con reemplazo es el entero más cercano a

$$\sqrt{\frac{c_1 \theta_0 r}{c_2} + \frac{1}{4}}$$

Ejemplo B-9 (Prueba de vida finalizada al ocurrir un número prefijado de pruebas de falla con reemplazo para el cálculo de costo).

Ejemplo: Considerar el problema B-7, esto es, $r = 10$, $\theta_0 = 1000$, $c_1 = \$1$ y $c_2 = \$100$. Usar la fórmula de costo total y determinar el tamaño óptimo de la muestra si las unidades que fallaron fueron reemplazadas.

Solución: Usando la fórmula del párrafo B5.5.3, los costos para varios valores de n son:

n	Costo Supuesto Debido al Tiempo	Costo de las Unidades Probadas	Costo Total
9	1111	1800	2911
10	1000	1900	2900
11	909	2000	2909

El tamaño óptimo para la muestra es de esta manera $n = 10$.

Ejemplo B-10 (Prueba de vida finalizada al ocurrir un número prefijado de prueba de fallas con reemplazo obteniendo el tamaño óptimo de la muestra por fórmula)

Ejemplo: Usando el método del párrafo B5.5.4 para determinar el tamaño óptimo de la muestra para el problema del ejemplo B-9.

Solución: El entero más cercano a

$$\sqrt{\frac{k(1000)(10)}{100} + \frac{1}{4}} = 10.012$$

es 10. Esto es, el tamaño óptimo para la muestra como fué vista en el ejemplo B-9.

**PRUEBAS DE VIDA FINALIZADAS EN PRESENCIA DE UN NÚMERO
PREFIJADO DE PRUEBAS DE FALLA SIN REEMPLAZO**

Tabla 2B-2(a)

Expected Waiting Time

Values of: $\frac{\text{Expected waiting time for } r \text{ failures in a sample of } n}{\text{Mean life of lot}}$

In the table $r=1(1)n$ and $n=1(1)20(3)30(10)100$

$r \backslash n$	1	2	3	4	5	6
1	1.0000	0.5000	0.3333	0.2500	0.2000	0.1667
2		1.5000	0.8333	0.7500	0.6500	0.5667
3			1.6333	1.6667	1.4833	1.3167
4				2.0833	1.9833	1.8000
5					2.3833	2.1667
6						2.4667

Tabla 9B-2(a) (Tabla 2B-2(a))

Table 2b-2g Continued

1	0.1429	0.1250	0.1111	0.1000	0.0909	0.0833
2	0.3095	0.2679	0.2364	0.2111	0.1909	0.1742
3	0.5095	0.4345	0.3790	0.3361	0.3020	0.2742
4	0.7595	0.6345	0.5456	0.4790	0.4270	0.3853
5	1.0020	0.8845	0.7456	0.6456	0.5695	0.5104
6	1.5929	1.2179	0.9956	0.8156	0.7065	0.6332
7	2.5929	1.7179	1.3290	1.0656	0.9365	0.8199
8		2.7179	1.8290	1.4290	1.1865	1.0199
9			2.8290	1.9290	1.5199	1.2699
10				2.9290	2.0199	1.6032
11					3.0199	2.1032
12						3.1032

	13	14	15	16	17	18
1	0.0769	0.0714	0.0667	0.0625	0.0588	0.0556
2	0.1603	0.1484	0.1381	0.1292	0.1213	0.1144
3	0.2512	0.2317	0.2150	0.2006	0.1880	0.1769
4	0.3512	0.3226	0.2984	0.2778	0.2594	0.2435
5	0.4623	0.4226	0.3893	0.3609	0.3363	0.3150
6	0.5873	0.5337	0.4893	0.4518	0.4197	0.3919
7	0.7301	0.6587	0.6004	0.5518	0.5106	0.4752
8	0.8989	0.8016	0.7294	0.6629	0.6106	0.5661
9	1.0969	0.9682	0.8682	0.7878	0.7217	0.6661
10	1.3468	1.1682	1.0349	0.9307	0.8467	0.7773
11	1.6601	1.4182	1.2349	1.0974	0.9896	0.9023
12	2.1801	1.7516	1.4849	1.2674	1.1862	1.0451
13	3.1801	2.2516	1.8182	1.5474	1.3862	1.2116
14		3.2516	2.3182	1.8807	1.6662	1.4116
15			3.3182	2.3807	1.9396	1.6616
16				3.3807	2.4396	1.9951
17					3.4396	2.4951
18						3.4951

n=19

r	r	r	r		
1	0.0526	7	0.4445	14	1.2644
2	0.1062	8	0.5279	15	1.4944
3	0.1670	9	0.6100	16	1.7144
4	0.2296	10	0.7100	17	2.0477
5	0.2962	11	0.8299	18	2.5477
6	0.3878	12	0.9549	19	3.5477
		13	1.0977		

Table 2B-2(a) - Continued

n = 20

1	0.0500	6	0.3162	11	0.7637	16	1.5144
2	0.1026	7	0.4176	12	0.8799	17	1.7644
3	0.1582	8	0.4943	13	1.0049	18	2.0977
4	0.2170	9	0.5779	14	1.1477	19	2.5977
5	0.2795	10	0.6688	15	1.3144	20	3.5977

n = 25

1	0.0400	8	0.3764	15	0.8870	22	1.9826
2	0.0817	9	0.4352	16	0.9870	23	2.3160
3	0.1251	10	0.4977	17	1.0981	24	2.8160
4	0.1706	11	0.5644	18	1.2231	25	3.8160
5	0.2182	12	0.6358	19	1.3660		
6	0.2682	13	0.7127	20	1.5326		
7	0.3209	14	0.7961	21	1.7326		

n = 30

1	0.0333	11	0.4472	21	1.1660
2	0.0678	12	0.4999	22	1.2771
3	0.1035	13	0.5554	23	1.4021
4	0.1406	14	0.6143	24	1.5450
5	0.1790	15	0.6768	25	1.7117
6	0.2190	16	0.7434	26	1.9117
7	0.2607	17	0.8149	27	2.1417
8	0.3042	18	0.8918	28	2.4040
9	0.3496	19	0.9751	29	2.6940
10	0.3972	20	1.0660	30	3.0260

n = 40

1	0.0250	11	0.3169	21	0.7308	31	1.4496
2	0.0506	12	0.3814	22	0.7834	32	1.5607
3	0.0770	13	0.4571	23	0.8390	33	1.6857
4	0.1040	14	0.5441	24	0.8978	34	1.8285
5	0.1318	15	0.6426	25	0.9603	35	1.9893
6	0.1603	16	0.7528	26	1.0270	36	2.1692
7	0.1897	17	0.8743	27	1.0984	37	2.3683
8	0.2200	18	0.9977	28	1.1753	38	2.5785
9	0.2513	19	1.1332	29	1.2587	39	2.7985
10	0.2836	20	1.2808	30	1.3496	40	3.0285

Table 2B-2(a)---Continued

n = 50

1	0.0200	14	0.3246	27	0.7649	40	1.5702
2	0.0404	15	0.3524	28	0.8084	41	1.6702
3	0.0612	16	0.3810	29	0.8538	42	1.7813
4	0.0825	17	0.4104	30	0.9015	43	1.9063
5	0.1043	18	0.4407	31	0.9515	44	2.0492
6	0.1265	19	0.4720	32	1.0041	45	2.2159
7	0.1492	20	0.5042	33	1.0597	46	2.4159
8	0.1725	21	0.5376	34	1.1185	47	2.6539
9	0.1963	22	0.5720	35	1.1810	48	2.9292
10	0.2207	23	0.6077	36	1.2476	49	3.2492
11	0.2457	24	0.6448	37	1.3191	50	3.6192
12	0.2713	25	0.6832	38	1.3960		
13	0.2976	26	0.7232	39	1.4793		

n = 60

1	0.0167	21	0.4263	41	1.1321
2	0.0336	22	0.4520	42	1.1848
3	0.0509	23	0.4783	43	1.2403
4	0.0684	24	0.5053	44	1.2991
5	0.0863	25	0.5331	45	1.3616
6	0.1044	26	0.5617	46	1.4283
7	0.1230	27	0.5911	47	1.4997
8	0.1418	28	0.6214	48	1.5767
9	0.1611	29	0.6526	49	1.6600
10	0.1807	30	0.6848	50	1.7500
11	0.2007	31	0.7182	51	1.8469
12	0.2211	32	0.7527	52	1.9520
13	0.2419	33	0.7884	53	2.0670
14	0.2632	34	0.8255	54	2.1929
15	0.2849	35	0.8639	55	2.3305
16	0.3071	36	0.9039	56	2.4803
17	0.3299	37	0.9456	57	2.6433
18	0.3531	38	0.9891	58	2.8206
19	0.3769	39	1.0345	59	3.0139
20	0.4013	40	1.0821	60	3.2249

Table 2B-2(a) - Continued

n = 70

1	0.0143	19	0.3110	37	0.7410	55	1.5146
2	0.0288	20	0.3336	38	0.7741	56	1.5813
3	0.0435	21	0.3536	39	0.8036	57	1.6527
4	0.0584	22	0.3740	40	0.8378	58	1.7296
5	0.0736	23	0.3949	41	0.8712	59	1.8130
6	0.0889	24	0.4161	42	0.9057	60	1.9039
7	0.1046	25	0.4379	43	0.9414	61	2.0039
8	0.1204	26	0.4601	44	0.9784	62	2.1150
9	0.1366	27	0.4828	45	1.0169	63	2.2400
10	0.1530	28	0.5061	46	1.0569	64	2.3828
11	0.1696	29	0.5299	47	1.0985	65	2.5495
12	0.1866	30	0.5543	48	1.1420	66	2.7495
13	0.2038	31	0.5793	49	1.1875	67	2.9995
14	0.2214	32	0.6049	50	1.2351	68	3.3328
15	0.2392	33	0.6313	51	1.2851	69	3.8328
16	0.2574	34	0.6581	52	1.3377	70	4.6328
17	0.2759	35	0.6861	53	1.3933		
18	0.2948	36	0.7146	54	1.4521		

n = 80

1	0.0125	21	0.3023	41	0.7119	61	1.4177
2	0.0252	22	0.3192	42	0.7376	62	1.4704
3	0.0380	23	0.3365	43	0.7639	63	1.5259
4	0.0510	24	0.3540	44	0.7909	64	1.5848
5	0.0641	25	0.3719	45	0.8187	65	1.6473
6	0.0773	26	0.3900	46	0.8473	66	1.7139
7	0.0910	27	0.4086	47	0.8767	67	1.7853
8	0.1047	28	0.4274	48	0.9070	68	1.8623
9	0.1186	29	0.4467	49	0.9382	69	1.9456
10	0.1326	30	0.4663	50	0.9706	70	2.0365
11	0.1469	31	0.4863	51	1.0038	71	2.1365
12	0.1614	32	0.5067	52	1.0383	72	2.2476
13	0.1761	33	0.5275	53	1.0740	73	2.3726
14	0.1911	34	0.5488	54	1.1111	74	2.5156
15	0.2062	35	0.5706	55	1.1495	75	2.6821
16	0.2216	36	0.5928	56	1.1891	76	2.8821
17	0.2372	37	0.6155	57	1.2312	77	3.1321
18	0.2531	38	0.6387	58	1.2747	78	3.4455
19	0.2692	39	0.6626	59	1.3201	79	3.8455
20	0.2856	40	0.6880	60	1.3677	80	4.3455

Table 2B-2(a) - Continued

n = 90

1	0.0111	24	0.3081	47	0.7326	70	1.5815
2	0.0223	25	0.3233	48	0.7558	71	1.5448
3	0.0337	26	0.3387	49	0.7796	72	1.5875
4	0.0452	27	0.3543	50	0.8040	73	1.6430
5	0.0568	28	0.3702	51	0.8290	74	1.7018
6	0.0686	29	0.3863	52	0.8547	75	1.7643
7	0.0805	30	0.4027	53	0.8810	76	1.8310
8	0.0926	31	0.4194	54	0.9080	77	1.9024
9	0.1047	32	0.4363	55	0.9358	78	1.9784
10	0.1171	33	0.4536	56	0.9644	79	2.0627
11	0.1296	34	0.4711	57	0.9938	80	2.1536
12	0.1422	35	0.4890	58	1.0241	81	2.2536
13	0.1551	36	0.5071	59	1.0553	82	2.3647
14	0.1681	37	0.5257	60	1.0876	83	2.4897
15	0.1812	38	0.5445	61	1.1209	84	2.6326
16	0.1945	39	0.5637	62	1.1554	85	2.7992
17	0.2081	40	0.5834	63	1.1911	86	2.9992
18	0.2218	41	0.6034	64	1.2282	87	3.2492
19	0.2356	42	0.6238	65	1.2666	88	3.5825
20	0.2497	43	0.6446	66	1.3066	89	4.0826
21	0.2640	44	0.6659	67	1.3483	90	5.0826
22	0.2785	45	0.6878	68	1.3918		
23	0.2932	46	0.7098	69	1.4372		

n = 100

1	0.0100	26	0.2994	51	0.7082	76	1.4114
2	0.0201	27	0.3129	52	0.7306	77	1.4831
3	0.0303	28	0.3266	53	0.7494	78	1.4966
4	0.0406	29	0.3405	54	0.7707	79	1.5420
5	0.0510	30	0.3545	55	0.7924	80	1.5896
6	0.0618	31	0.3688	56	0.8147	81	1.6306
7	0.0722	32	0.3833	57	0.8374	82	1.6923
8	0.0829	33	0.3980	58	0.8606	83	1.7478
9	0.0938	34	0.4130	59	0.8844	84	1.8066
10	0.1048	35	0.4281	60	0.9088	85	1.8681
11	0.1158	36	0.4435	61	0.9338	86	1.9336
12	0.1272	37	0.4591	62	0.9596	87	2.0072
13	0.1386	38	0.4750	63	0.9866	88	2.0842
14	0.1500	39	0.4811	64	1.0138	89	2.1875
15	0.1616	40	0.4975	65	1.0406	90	2.2884
16	0.1734	41	0.5242	66	1.0692	91	2.3584
17	0.1853	42	0.5411	67	1.0986	92	2.4686
18	0.1974	43	0.5584	68	1.1288	93	2.5945
19	0.2096	44	0.5759	69	1.1601	94	2.7374
20	0.2219	45	0.5938	70	1.1924	95	2.9040
21	0.2344	46	0.6119	71	1.2257	96	3.1060
22	0.2471	47	0.6306	72	1.2602	97	3.3540
23	0.2600	48	0.6493	73	1.2959	98	3.6874
24	0.2729	49	0.6686	74	1.3330	99	4.1874
25	0.2860	50	0.6882	75	1.3714	100	5.1874

LIFE TESTS TERMINATED UPON OCCURRENCE OF PREASSIGNED NUMBER OF FAILURES—TESTING WITHOUT REPLACEMENT

Table 2B-2(b)

Expected Waiting Time

Values of: Expected waiting time for r failures in a sample of n
Mean life of lot

In the table $r = 1(1)10(5)30(10)50(25)100$ and $n = nr$, with $e = 1(1)10(1)10(2)$

r	n	$2n$	$3n$	$4n$	$5n$	$6n$	$7n$	$8n$	$9n$	$10n$	$20n$
1	1.0	0.5000	0.3333	0.2500	0.2000	0.1667	0.1429	0.1250	0.1111	0.1000	0.0500
2	1.5000	.8333	.6667	.5000	.4000	.3333	.2857	.2500	.2222	.2000	.1000
3	1.8333	1.1667	.9000	.6667	.5000	.4000	.3333	.2857	.2500	.2222	.1000
4	2.0833	1.5167	1.1667	.8333	.6000	.4667	.3810	.3200	.2778	.2500	.1000
5	2.2833	1.8456	1.4556	1.0000	.7000	.5333	.4286	.3500	.3000	.2778	.1000
6	2.4500	2.1522	1.7119	1.1667	.8000	.6000	.4762	.3750	.3125	.2857	.1000
7	2.5929	2.4387	1.9388	1.3333	.9000	.6667	.5143	.4000	.3200	.2963	.1000
8	2.7178	2.6929	2.1852	1.5000	1.0000	.7500	.5429	.4250	.3333	.3095	.1000
9	2.8260	2.9161	2.4463	1.6667	1.1000	.8000	.5676	.4500	.3500	.3200	.1000
10	2.9200	3.1182	2.7222	1.8333	1.2000	.8667	.5893	.4750	.3636	.3273	.1000
15	3.3182	3.7666	4.0000	2.2500	1.5000	1.0625	.7071	.5500	.4250	.3500	.1000
20	3.5977	4.3000	4.6113	2.856	1.919	1.345	.816	.576	.431	.351	.1017
25	3.8160	4.8112	5.222	3.640	2.421	1.717	1.037	.603	.447	.351	.1012
30	3.9950	5.3049	5.827	4.503	3.023	2.181	1.328	.633	.463	.352	.1012
40	4.2785	6.069	6.704	5.666	3.725	2.818	1.639	.663	.476	.352	.1013
50	4.4992	6.882	7.638	6.959	4.526	3.626	2.039	.693	.487	.352	.1013
75	4.9014	8.096	9.041	8.71	5.728	4.821	2.540	.731	.507	.353	.1013
100	5.1874	8.907	9.916	9.73	6.429	5.422	2.840	.754	.517	.353	.1013

Table 9B-3

Expected Relative Savings in Time by Increasing Sample Size

r	1	2	3	4	5	10	15	20
1	1	0.50	0.33	0.25	0.20	0.10	0.067	0.050
2		1	.56	.39	.30	.14	.092	.068
3			1	.60	.43	.18	.11	.087
4				1	.63	.23	.14	.104
5					1	.26	.17	.123
10						1	.35	.23

The values tabulated here are the ratios

$$\frac{\text{Expected waiting time for } r \text{ failures in a sample of } n}{\text{Expected waiting time for } r \text{ failures in a sample of } nr}$$

For any given value of r , the smaller the tabulated value, the greater is the relative expected saving in time. This saving is the amount the n will decrease the required waiting time required for detection.

Tabla 9B-2(b) (tabla 2B-2(b)) y Tabla 9B-3 (tabla 9B-3)

Table 2B-4

Expected Relative Saving in Time by Testing with Replacement

r	Sample size							
	1	2	3	4	5	10	15	20
1	1	1	1	1	1	1	1	1
2		.67	.80	.86	.89	.95	.97	.97
3			.55	.69	.77	.84	.93	.95
4				.45	.62	.84	.89	.92
5					.41	.77	.86	.89
10						.44	.64	.75

The values tabulated here are the ratios

Exp. wait. time for r failures in sample of n when testing with replacement
 Exp. wait. time for r failures in sample of n when testing without replacement

For any given value of r , the smaller the tabulated value, the greater is the relative expected saving in time. Thus, as the sample size increases, replacing failed units results in decreasing relative saving in time. It should be noted that the time saved by replacing failures is at a cost of having placed more units of product on test.

Tabla 9B-4 (tabla 2B-4). Ahorro Relativo Esperado en Tiempo Cuando la Prueba es Con Reemplazo

PRUEBAS DE VIDA TERMINADAS EN PRESENCIA DE UN NÚMERO PREFIJADO DE FALLAS

PARTE III

PLANES DE TOMA DE MUESTRA PARA PRUEBAS DE VIDA PARA CIERTOS VALORES ESPECIFICADOS DE α , β , Y θ_1/θ_0

B6 DISEÑANDO PLANES DE TOMA DE MUESTRA PARA PRUEBAS DE VIDA.

Un plan de toma de muestras de prueba de vida puede ser diseñado, de modo que su CCO cumpla con las siguientes condiciones preestablecidas: 1) si $\theta = \theta_0$, entonces la probabilidad de que el lote cumpla el criterio de aceptabilidad es $1-\alpha$, y 2) si $\theta = \theta_1$, entonces la probabilidad de que el lote cumpla el criterio de aceptabilidad es menor que o igual a β . Esta parte de el manual, el cual puede ser considerado una extensión de la sección B, parte I, proporciona procedimientos para obtener valores de el número de finalización r y la constante de aceptabilidad C cuando ciertos valores seleccionados de α , β , y θ_1/θ_0 son especificados. Cuando otros valores de α , β , y θ_1/θ_0 sean necesarios en esta parte de el manual, referirse a la sección B, parte I para determinar si uno de los planes de toma de muestra de prueba de vida dadas en esta sección son aplicables.

B6.1 Planes de Toma de Muestra para Pruebas de Vida. De la tabla 9B-5 (tabla 2B-5), los valores de el número de finalización r y de la constante de aceptabilidad C pueden ser obtenidos por los valores de $\alpha = 0.01, 0.05, 0.10$ y 0.25 ; $\beta = 0.01, 0.05, 0.10$ y 0.25 ; y $\theta_1/\theta_0 = 2/3, 1/2, 1/3, 1/5$ y $1/10$. El valor de r es obtenido directamente de la tabla 9B-5 (tabla 2B-5) pero la constante de aceptabilidad C es obtenida multiplicando el dato de la tabla por la vida media aceptable θ_0 .

Ejemplo B-11 (Pruebas de finalización en presencia de un número prefijado de fallas).

Ejemplo: Encontrar un plan de toma de muestras para pruebas de vida el cual posea el siguiente CCO: si la vida media es $\theta_0 = 900$ horas, el lote es aceptado con probabilidad 0.95; si la vida media es $\theta_1 = 300$ horas, este es aceptado con probabilidad aproximadamente igual a 0.10.

Solución: En este ejemplo, $\theta_1/\theta_0 = 1/3$, $\alpha = 0.05$ y $\beta = 0.10$. Mirando la tabla 9B-5 (tabla 2B-5), el número de finalización $r = 8$ y la constante de aceptabilidad $C \cdot \theta_0 (C/\theta_0) = 900(0.4976) = 448$ son obtenidas. En otras palabras: colocar 8 o más unidades a prueba. Parar la prueba de vida después de que 8 fallas han ocurrido. Si la vida media estimada del lote $\hat{\theta}_{g,n}$ es mayor que o igual a 448, el lote es aceptado; de lo contrario el lote es rechazado.

B6.2 Expansión de la tabla 9B-5 (tabla 2B-5) para Valores θ_1/θ_0 mayores que 2/3. Los valores aproximados de el número de finalización r y la constante de aceptabilidad C pueden ser obtenidos para completar estos datos en la tabla 9B-5 (tabla 2B-5) para valores de θ_1/θ_0 mayores que 2/3 proporcionando los mismos valores de α y β dados en la tabla 9B-5 (tabla 2B-5) ya especificados. Calcular

$$r = \left(\frac{K_\beta + (\theta_0/\theta_1)K_\alpha}{(\theta_0/\theta_1) - 1} \right)^2$$

y

$$C = \theta_0 \left(1 - \frac{K_\alpha}{\sqrt{r}} \right)$$

donde los valores de K_α y K_β son listados abajo.

α o β	K_α y K_β^*
0.01	2.326
0.05	1.645
0.10	1.282
0.25	0.647

***valores obtenidos de las tablas de la Distribución Normal Acumulativa.**

Ejemplo B-12(Pruebas de vida finalizadas en presencia de un número preasignado de fallas).

Ejemplo: Encontrar los valores apropiados de el número de finalización r y la constante de aceptabilidad C para el caso donde la vida promedio aceptable $\theta_0 = 110$ horas, la vida media inaceptable $\theta_1 = 100$ horas, el riesgo del fabricante $\alpha = 0.05$, y el riesgo del consumidor $\beta = 0.10$

Solución: De las fórmulas del párrafo B6.2

$$r = \left(\frac{1.282 + (1.1)(1.645)}{0.1} \right)^2 = 956$$

y

$$C = 110 \left(1 - \frac{1.645}{\sqrt{956}} \right) = 104.15$$

LIFE TESTS TERMINATED UPON OCCURRENCE OF PREASSIGNED NUMBER OF FAILURES

Table 2B-5
Life Test Sampling Plans for Specified α , β , and R 's

P/A	$\alpha = .01$ $\beta = .01$		$\alpha = .01$ $\beta = .05$		$\alpha = .01$ $\beta = .10$		$\alpha = .01$ $\beta = .25$	
	r	C _{th}	r	C _{th}	r	C _{th}	r	C _{th}
2/1	136	811	101	783	83	767	60	724
1/2	46	689	35	649	30*	625	22	572
1/3	19	544	15*	498	13	469	10*	411
1/5	9*	390	8*	363	7*	333	5*	256
1/10	5*	256	4*	206	4*	206	3*	143

P/A	$\alpha = .05$ $\beta = .01$		$\alpha = .05$ $\beta = .05$		$\alpha = .05$ $\beta = .10$		$\alpha = .05$ $\beta = .25$	
	r	C _{th}	r	C _{th}	r	C _{th}	r	C _{th}
2/3	05	.837	67	.806	55	.789	35	.739
1/2	33	.737	23	.683	19	.656	13	.592
1/3	13	.592	10*	.543	8*	.498	6*	.436
1/5	7*	.469	5*	.394	4*	.342	3*	.272
1/10	4*	.342	3*	.273	3*	.272	2*	.178

P/A	$\alpha = .10$ $\beta = .01$		$\alpha = .10$ $\beta = .05$		$\alpha = .10$ $\beta = .10$		$\alpha = .10$ $\beta = .25$	
	r	C _{th}	r	C _{th}	r	C _{th}	r	C _{th}
2/3	77	.857	82	.827	41	.696	35*	.754
1/2	26	.786	18	.713	15*	.667	9*	.606
1/3	11	.636	8*	.582	6*	.533	4*	.436
1/5	5*	.487	4*	.436	3*	.387	3*	.367
1/10	3*	.347	2*	.306	2*	.266	2*	.266

P/A	$\alpha = .25$ $\beta = .01$		$\alpha = .25$ $\beta = .05$		$\alpha = .25$ $\beta = .10$		$\alpha = .25$ $\beta = .25$	
	r	C _{th}	r	C _{th}	r	C _{th}	r	C _{th}
2/3	82	.803	32	.676	23	.663	19	.708
1/2	17	.627	11	.704	8*	.744	8*	.674
1/3	7*	.726	8*	.676	4*	.684	3*	.661
1/5	3*	.676	3*	.661	3*	.661	1*	.666
1/10	2*	.661	2*	.661	1*	.666	1*	.666

Note: A sampling plan of OC curves is not provided for the sampling plans of this table. For those sampling plans marked (*), the appropriate OC curves to table 2A-4 may be used by determining from table 2B-1 the suitable code designation corresponding to the same values of α and β . For the sampling plans that are not marked (*), one plans (L)-of samples, R on the OC curves are given.

Table 9B-5 (table 2B-5)

SECCIÓN 2C

PRUEBAS DE VIDA FINALIZADAS EN TIEMPO PREFIJADO

PARTE I

PROCEDIMIENTOS DE ACEPTACIÓN

C1 PLANES DE TOMA DE MUESTRA PARA PRUEBA DE VIDA

Esta parte del manual describe los procedimientos para el uso de pruebas de vida que son finalizadas en un tiempo específico o en presencia de un número especificado de fallas, si este número es rechazado antes del tiempo especificado. Dos procedimientos son dados: 1) cuando la prueba es sin reemplazo y 2) cuando la prueba es con reemplazo.

C1.1 Uso de los Planes de Tomas de Muestra de la Pruebas de Vida. Para determinar si el lote cumple con el criterio de aceptabilidad con respecto a la duración promedio de vida, el plan de toma de muestras debería ser usado de acuerdo con las disposiciones de la sección A.

C2 SELECCIONANDO LAS TOMAS DE MUESTRA DE LA PRUEBA DE VIDA CUANDO LA MUESTRA ES SIN REEMPLAZO

C2.1 Tabla Maestra de la Toma de Muestras. Las tablas maestras de esta parte del manual es la tabla 9C-1 (tabla 2C-1).

C2.2 Obtención de los Planes de Toma de Muestras. Los planes de toma de muestra de prueba de vida consisten de un número de finalización r , una muestra de tamaño n y un tiempo de finalización asociada T .

C2.2.1 Número de Finalización. El número de finalización r debería ser seleccionado dentro de la tabla 9C-1 (tabla 2C-1) y especificado previamente al inicializar la prueba de vida. Al escoger este número debería ser dependiente en el grado de protección deseado contra de la aceptación de el material con vida media inaceptable. El número de finalización más grande, más grande es la razón θ_1/θ_0 y, como se mencionó en el párrafo A3.3, mayor es la confianza en contra de aceptar el material con una vida media inaceptable.

C2.2.2 Tamaño de la Muestra. El escoger el tamaño de la muestra, depende del costo relativo de colocar un número grande de unidades a prueba y del tiempo de espera

supuesto requerido para una decisión. El tamaño de la muestra debería ser seleccionado, con este factor en mente, de uno de los siguientes múltiplos del número de finalización: $2r$, $3r$, $4r$, $5r$, $6r$, $7r$, $8r$, $9r$, $10r$ y $20r$.

C2.2.3 Tiempo de Finalización. El tiempo de finalización T , corresponde al número de finalización aplicable r , el riesgo de fabricante α , y el tamaño de la muestra n , es obtenido de la tabla maestra multiplicando el dato tabulado de la tabla por la vida media aceptable θ_0 .

C3 PROCEDIMIENTO PARA ACEPTAR EL LOTE CUANDO LA PRUEBA ES SIN REEMPLAZO.

C3.1 Criterio de Aceptabilidad. La aceptabilidad de un lote con respecto a una prueba de vida de esta parte del manual debería ser juzgado por el tiempo requerido por la r -ésima falla que ocurre en una muestra del tamaño n . Comparar el tiempo de ocurrencia de la r -ésima falla con el tiempo de finalización T , mencionado en el párrafo C2.2.3. Si la r -ésima falla ocurre antes del tiempo T , el lote es considerado que ha fallado para cumplir el criterio de aceptabilidad. Si la r -ésima falla todavía no ha ocurrido en el tiempo T , el lote es considerado que cumplió con el criterio de aceptabilidad.

C4 SELECCIONANDO LOS PLANES DE TOMA DE MUESTRA CUANDO LA PRUEBA ES CON REEMPLAZO.

C4.1 Tabla Maestra de la Toma de Muestras. La tabla maestra para los planes de toma de muestras de prueba de vida con reemplazo en la tabla 9C-2 (tabla 2C-2).

C4.2 Obtención de la Toma de Muestras. La toma de muestra de una prueba de vida truncada consiste de un número de finalización r , el tamaño de la muestra n , y un tiempo de finalización asociada T .

C4.2.1 Número de Finalización. El número de finalización r debería ser seleccionado dentro de las tablas 9C-2 (tabla 2C-2) y de las anteriores especificaciones para la inicialización de las pruebas de vida. El escoger este número debería ser dependiente en el grado de protección deseado en contra de la aceptación del material con vida media inaceptable. El número de finalización más grande, más grande es la razón θ_1/θ_0 , mencionado en el párrafo A3.3 y mayor es la confianza en contra de aceptar el material con vida media inaceptable.

C4.2.2 Tamaño de la Muestra. El escoger el tamaño de la muestra, depende del costo relativo de colocar un número grande de unidades a prueba y del tiempo de espera supuesto requerido para una decisión. El tamaño de la muestra debería ser seleccionado, con este factor en mente, de uno de los siguientes múltiplos de el número de finalización: $2r, 3r, 4r, 5r, 6r, 7r, 8r, 9r, 10r$ y $20r$.

C4.2.3 Tiempo de Finalización. El tiempo de finalización T corresponde al número de finalización aplicable r , el riesgo del fabricante α , y al tamaño de la muestra n , que es obtenida de la tabla maestra multiplicando el dato tabulado por la vida media aceptable θ_0 .

C5 PROCEDIMIENTOS PARA ACEPTAR EL LOTE CUANDO LA PRUEBA ES CON REEMPLAZO.

C5.1 Criterio de aceptabilidad. La aceptabilidad de un lote con respecto a la prueba de vida debería ser juzgado por el tiempo requerido por la r -ésima falla a ocurrir en una muestra de tamaño n . Comparar el tiempo de ocurrencia de la r -ésima falla con el tiempo de finalización T , mencionado en el párrafo C4.2.3. Si la r -ésima falla ocurre antes del tiempo T , el lote es considerado que ha fallado al cumplir con el criterio de aceptabilidad; si la r -ésima falla todavía no ha ocurrido en el tiempo T , el lote es considerado que ha cumplido el criterio de aceptabilidad.

Ejemplo C-1 (Prueba de vida finalizada en tiempo prefijado, prueba sin reemplazo).

Ejemplo: Encontrar la toma de muestra de prueba de vida con reemplazo el cual aceptará un lote que tenga una vida media aceptable de 1,000 horas con probabilidad 0.90. El experimento es parado al ocurrir la quinta falla y 10 unidades son colocadas a prueba.

Solución: En la notación de este manual $\theta_0 = 1,000$, $\alpha = 0.10$, $r = 5$ y $n = 10 = 2r$. De la tabla 8C-1(c) (tabla 2C-1(c)). $T = \theta_0(T/\theta_0) = 1,000(3.14) = 314$. En otras palabras, aceptar el lote si la quinta falla todavía no ha ocurrido en las primeras 314 horas y rechazar el lote si la quinta falla ocurre antes de que 314 horas hayan transcurrido.

Comentario 1: El código de designación de la toma de muestra de la prueba de vida de arriba, es obtenida apartir de la tabla 9C-1(c) (tabla 2C-1(c)) como C-5. De la tabla 9A-2 (tabla 2A-2), la probabilidad de aceptar un lote con vida media de, digamos, 500 horas puede ser obtenida encontrando la ordenada de la CCO como C-5 en el punto donde la abscisa $\theta/\theta_0 = 500/1000 = 0.5$. La probabilidad de aceptar es igual a 0.47.

Comentario 2: En este ejemplo, si el número de finalización ha sido seleccionado como 6 en vez de 5, la probabilidad de aceptar un lote con vida media de 500 horas es obtenido de la CCO como C-6. La probabilidad es equivalente a 0.41. Esto ilustra el comentario hecho en el párrafo C2.2.1 que el número de finalización más grande, es más alta la probabilidad de rechazar lotes con vida media inaceptable.

Ejemplo C-2 (Prueba de finalización en tiempo prefijado, prueba con reemplazo).

Ejemplo: Del problema C-1, encontrar el tiempo de finalización si las unidades falladas han sido reemplazadas.

Solución: De la tabla 9C-2(c) (tabla 2C-2(c)), $T = \theta_0(T/\theta_0) \approx 1000(.243) = 243$ horas. Aceptar el lote si la 5ta falla no ha ocurrido en las primeras 243 horas y rechazar el lote si la 5ta falla ocurre antes de que 243 horas hayan transcurrido.

Comentario: El tiempo de finalización, cuando la muestra es con reemplazo en este ejemplo es de 243 horas comparadas con las 314 horas cuando la muestra es sin reemplazo. Esto ilustra el hecho de que el tiempo de espera supuesto para una decisión en cuanto a aceptar el lote es reducido por la pruebas con reemplazo.

TABLE 9C-1(a)
Master Table for Life Tests Terminated at Prescribed Time—Testing Without Replacement
Values of T/n , for $\alpha=0.01$

Code	r	Sample size									
		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
A-1	1	0.006	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
A-2	2	0.062	0.057	0.050	0.045	0.043	0.041	0.040	0.039	0.038	0.038
A-3	3	0.095	0.086	0.076	0.067	0.063	0.060	0.058	0.057	0.056	0.055
A-4	4	0.121	0.099	0.087	0.075	0.070	0.067	0.065	0.064	0.063	0.062
A-5	5	0.145	0.120	0.097	0.085	0.080	0.076	0.074	0.073	0.072	0.071
A-6	6	0.165	0.137	0.104	0.092	0.086	0.082	0.080	0.079	0.078	0.077
A-7	7	0.180	0.149	0.114	0.093	0.087	0.083	0.081	0.080	0.079	0.078
A-8	8	0.191	0.157	0.120	0.098	0.092	0.088	0.085	0.084	0.083	0.082
A-9	9	0.200	0.164	0.125	0.103	0.096	0.092	0.089	0.088	0.087	0.086
A-10	10	0.207	0.168	0.128	0.105	0.098	0.094	0.091	0.090	0.089	0.088
A-11	15	0.257	0.200	0.148	0.120	0.110	0.105	0.102	0.101	0.100	0.099
A-12	20	0.277	0.209	0.148	0.120	0.110	0.105	0.102	0.101	0.100	0.099
A-13	25	0.295	0.220	0.158	0.128	0.118	0.113	0.110	0.109	0.108	0.107
A-14	30	0.310	0.233	0.170	0.138	0.128	0.123	0.120	0.119	0.118	0.117
A-15	40	0.349	0.270	0.198	0.160	0.150	0.145	0.142	0.141	0.140	0.139
A-16	50	0.382	0.300	0.221	0.180	0.170	0.165	0.162	0.161	0.160	0.159
A-17	75	0.445	0.364	0.265	0.220	0.210	0.205	0.202	0.201	0.200	0.199
A-18	100	0.485	0.410	0.300	0.250	0.240	0.235	0.232	0.231	0.230	0.229

For explanation of the code, see pp. 544 and table 9C-1.

Tabla 9C-1(a) (tabla 2C-1(a)). Tablas Maestras Para Pruebas de Vida Terminadas en Tiempo Preasignado, Prueba Con Reemplazo.

Table 8C-1(b)
 Master Table for Life Tests Terminated at Preassigned Time—Testing Without Replacement
 Values of T/h , for $\alpha = 0.05$

Code	r	Sample size									
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	20
B-1	1	0.026	0.017	0.013	0.010	0.009	0.007	0.006	0.006	0.005	0.003
B-2	2	.104	.065	.048	.038	.031	.025	.023	.020	.018	.009
B-3	3	.168	.103	.075	.058	.048	.041	.036	.031	.028	.014
B-4	4	.217	.132	.095	.074	.061	.052	.045	.040	.038	.017
B-5	5	.254	.153	.110	.085	.071	.060	.052	.046	.041	.020
B-6	6	.284	.170	.122	.095	.078	.066	.057	.051	.045	.022
B-7	7	.309	.185	.132	.103	.084	.072	.062	.055	.049	.024
B-8	8	.330	.197	.141	.110	.090	.074	.066	.058	.052	.026
B-9	9	.348	.207	.148	.115	.094	.080	.069	.061	.055	.027
B-10	10	.363	.216	.154	.120	.098	.083	.072	.064	.057	.028
B-11	16	.417	.244	.175	.136	.112	.094	.082	.072	.065	.032
B-12	20	.451	.264	.189	.147	.120	.102	.088	.078	.070	.034
B-13	25	.475	.280	.199	.154	.126	.107	.093	.082	.073	.036
B-14	30	.483	.290	.204	.160	.131	.111	.096	.085	.078	.037
B-15	40	.519	.305	.218	.168	.137	.118	.101	.089	.079	.039
B-16	50	.536	.315	.223	.173	.142	.120	.104	.092	.082	.040
B-17	75	.564	.331	.235	.182	.148	.126	.109	.096	.086	.042
B-18	100	.581	.340	.242	.187	.153	.130	.112	.099	.089	.043

For explanation of the code, see pp. 142-5 and table 8A-1.

Table 8C-1(c)
 Master Table for Life Tests Terminated at Preassigned Time—Testing Without Replacement
 Values of T/h , for $\alpha = 0.10$

Code	r	Sample size									
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	20
C-1	1	0.062	0.033	0.026	0.021	0.018	0.015	0.013	0.012	0.011	0.006
C-2	2	.185	.098	.071	.056	.046	.039	.034	.030	.027	.013
C-3	3	.288	.150	.101	.079	.065	.055	.048	.042	.038	.019
C-4	4	.377	.188	.121	.096	.079	.066	.057	.051	.046	.020
C-5	5	.414	.198	.136	.108	.087	.074	.064	.057	.051	.025
C-6	6	.443	.208	.147	.116	.094	.080	.069	.061	.055	.027
C-7	7	.466	.218	.157	.125	.100	.086	.074	.065	.059	.028
C-8	8	.486	.228	.164	.130	.105	.089	.077	.068	.061	.029
C-9	9	.502	.239	.171	.135	.109	.092	.080	.071	.063	.031
C-10	10	.516	.247	.176	.137	.113	.095	.082	.073	.065	.032
C-11	15	.566	.273	.196	.152	.124	.105	.091	.081	.073	.035
C-12	20	.604	.291	.207	.161	.132	.112	.097	.086	.078	.037
C-13	26	.613	.298	.210	.167	.137	.116	.100	.089	.079	.039
C-14	30	.630	.312	.222	.172	.141	.118	.100	.091	.081	.040
C-15	40	.653	.324	.230	.179	.146	.124	.107	.096	.086	.041
C-16	50	.667	.333	.236	.183	.150	.127	.110	.097	.087	.042
C-17	75	.689	.346	.245	.190	.156	.132	.114	.101	.090	.044
C-18	100	.694	.354	.251	.194	.159	.135	.117	.105	.093	.045

For explanation of the code, see pp. 142-5 and table 8A-1.

Tabla 9C-1(b) y (c) (tabla 2C-1(b) y (c))

Table 2C-1(d)

Master Table for Life Tests Terminated at Prespecified Time—Testing Without Replacement
 Values of T/θ , for $\alpha=0.25$

Code	r	Sample size									
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	20
D-1	1	0.144	0.096	0.072	0.058	0.048	0.041	0.036	0.032	0.029	0.014
D-2	2	281	176	129	102	084	071	062	055	049	024
D-3	3	353	218	158	124	102	087	075	067	060	029
D-4	4	402	244	176	138	113	096	083	074	066	032
D-5	5	435	262	188	147	121	102	089	078	070	034
D-6	6	459	276	197	154	126	107	093	082	073	036
D-7	7	478	286	205	159	131	111	096	085	076	037
D-8	8	493	294	210	164	134	114	099	087	078	038
D-9	9	506	301	215	168	137	116	101	089	080	039
D-10	10	517	307	219	171	140	110	102	091	081	040
D-11	15	552	326	232	181	148	125	108	096	086	042
D-12	20	573	338	240	187	153	129	112	099	088	043
D-13	25	587	345	246	191	156	132	114	101	090	044
D-14	30	597	351	250	194	159	134	116	103	092	045
D-15	40	611	359	255	198	162	137	119	105	094	046
D-16	50	620	364	258	201	164	139	120	106	095	046
D-17	75	635	372	264	205	168	142	123	108	097	047
D-18	100	643	377	267	208	170	143	124	110	098	048

For explanation of the code, see pp. 2A3.2 and table 2A-1.

Table 2C-1(e)

Master Table for Life Tests Terminated at Prespecified Time—Testing Without Replacement
 Values of T/θ , for $\alpha=0.50$

Code	r	Sample size									
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	20
E-1	1	0.344	0.231	0.173	0.138	0.114	0.099	0.087	0.077	0.069	0.033
E-2	2	486	300	225	177	148	129	108	096	086	043
E-3	3	549	339	244	192	164	144	121	108	097	048
E-4	4	582	354	255	199	164	147	121	107	096	047
E-5	5	603	364	261	204	167	147	123	109	097	048
E-6	6	617	370	266	207	170	149	124	110	098	048
E-7	7	628	373	269	209	172	149	124	111	100	049
E-8	8	636	376	271	211	173	149	124	111	100	049
E-9	9	641	380	273	212	174	147	124	111	101	049
E-10	10	647	384	275	213	174	148	124	111	101	049
E-11	15	682	391	278	217	177	150	126	112	102	050
E-12	20	699	394	281	219	179	151	121	112	102	050
E-13	25	714	397	282	219	179	153	121	112	102	051
E-14	30	717	399	283	220	180	153	122	112	102	051
E-15	40	721	400	284	221	180	154	122	112	102	051
E-16	50	723	401	284	221	181	153	122	112	102	051
E-17	75	727	402	285	222	181	154	122	112	102	051
E-18	100	729	403	285	222	182	154	123	112	102	051

For explanation of the code, see pp. 2A3.2 and table 2A-1.

Tabla 9C-1(d) y (e) (tabla 2C-1(d) y (e))

Table 9C-2(a)
 Master Table for Life Tests Terminated at Prespecified Time—Testing With Replacement
 Values of T/θ_0 for $\alpha = 0.01$

Code	r	Sample size									
		2r	3r	4r	5r	6r	7r	8r	9r	10r	20r
A-1	1	0.005	0.003	0.003	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000
A-2	2	0.037	0.025	0.019	0.015	0.012	0.011	0.009	0.008	0.007	0.004
A-3	3	0.073	0.048	0.036	0.029	0.024	0.021	0.018	0.016	0.015	0.007
A-4	4	0.103	0.069	0.051	0.041	0.034	0.029	0.026	0.023	0.021	0.010
A-5	5	0.128	0.085	0.064	0.051	0.043	0.037	0.032	0.028	0.026	0.013
A-6	6	0.149	0.099	0.074	0.060	0.050	0.043	0.037	0.033	0.030	0.015
A-7	7	0.166	0.111	0.083	0.067	0.055	0.041	0.042	0.037	0.033	0.017
A-8	8	0.182	0.121	0.091	0.073	0.061	0.052	0.045	0.040	0.036	0.018
A-9	9	0.195	0.130	0.097	0.078	0.065	0.056	0.049	0.043	0.039	0.019
A-10	10	0.207	0.138	0.103	0.083	0.069	0.059	0.052	0.046	0.041	0.021
A-11	15	0.249	0.166	0.125	0.100	0.083	0.071	0.062	0.055	0.050	0.025
A-12	20	0.277	0.185	0.139	0.111	0.092	0.079	0.069	0.062	0.055	0.028
A-13	25	0.297	0.198	0.149	0.119	0.099	0.085	0.074	0.066	0.059	0.030
A-14	30	0.312	0.208	0.156	0.125	0.104	0.089	0.078	0.069	0.062	0.031
A-15	40	0.335	0.223	0.167	0.134	0.112	0.098	0.084	0.074	0.067	0.033
A-16	50	0.350	0.234	0.175	0.140	0.117	0.100	0.088	0.078	0.070	0.035
A-17	75	0.376	0.250	0.188	0.150	0.125	0.107	0.094	0.083	0.075	0.038
A-18	100	0.391	0.261	0.196	0.156	0.130	0.112	0.098	0.087	0.078	0.039

For explanation of the code, see pp. 2A.3 and table 2A-1.

Table 9C-2(b)
 Master Table for Life Tests Terminated at Prespecified Time—Testing With Replacement
 Values of T/θ_0 for $\alpha = 0.05$

Code	r	Sample size									
		2r	3r	4r	5r	6r	7r	8r	9r	10r	20r
B-1	1	0.026	0.017	0.013	0.010	0.009	0.007	0.006	0.006	0.005	0.003
B-2	2	0.089	0.060	0.044	0.036	0.030	0.025	0.022	0.020	0.018	0.009
B-3	3	0.136	0.091	0.068	0.055	0.046	0.039	0.034	0.030	0.027	0.014
B-4	4	0.171	0.114	0.086	0.068	0.057	0.049	0.043	0.039	0.034	0.017
B-5	5	0.197	0.131	0.099	0.079	0.066	0.056	0.049	0.044	0.039	0.020
B-6	6	0.218	0.148	0.109	0.087	0.073	0.062	0.054	0.048	0.044	0.022
B-7	7	0.235	0.160	0.117	0.094	0.078	0.067	0.058	0.053	0.047	0.023
B-8	8	0.249	0.169	0.124	0.100	0.083	0.071	0.062	0.056	0.050	0.025
B-9	9	0.261	0.174	0.130	0.104	0.087	0.075	0.065	0.060	0.054	0.026
B-10	10	0.271	0.181	0.136	0.109	0.090	0.078	0.068	0.062	0.054	0.027
B-11	15	0.298	0.196	0.144	0.123	0.103	0.090	0.079	0.071	0.063	0.031
B-12	20	0.311	0.201	0.149	0.125	0.110	0.096	0.085	0.074	0.066	0.033
B-13	25	0.325	0.209	0.154	0.129	0.115	0.099	0.087	0.077	0.069	0.035
B-14	30	0.338	0.216	0.160	0.134	0.120	0.103	0.090	0.080	0.073	0.036
B-15	40	0.357	0.225	0.169	0.141	0.126	0.108	0.094	0.084	0.077	0.038
B-16	50	0.369	0.233	0.176	0.146	0.130	0.111	0.097	0.087	0.079	0.040
B-17	75	0.389	0.243	0.184	0.154	0.136	0.117	0.102	0.091	0.082	0.041
B-18	100	0.401	0.250	0.190	0.160	0.140	0.120	0.105	0.093	0.084	0.043

For explanation of the code, see pp. 2A.3 and table 2A-1.

Tabla 9C-2(a) y (b) (tabla 2C-2(a) y (b))

Table 2C-2(c)
Master Table for Life Tests Terminated at Preassigned Time—Testing With Replacement
Values of T/n , for $\alpha=0.10$

Code	r	Sample size									
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	12
C-1	1	0.033	0.035	0.026	0.021	0.018	0.015	0.013	0.012	0.011	0.009
C-2	2	.133	.089	.066	.053	.044	.038	.033	.030	.027	.023
C-3	3	.184	.122	.092	.073	.061	.052	.046	.041	.037	.031
C-4	4	.218	.145	.109	.087	.073	.062	.055	.048	.044	.037
C-5	5	.243	.162	.122	.097	.081	.070	.061	.054	.049	.041
C-6	6	.263	.175	.131	.105	.088	.075	.066	.058	.053	.045
C-7	7	.278	.185	.139	.111	.093	.079	.070	.062	.056	.048
C-8	8	.291	.194	.146	.116	.097	.083	.073	.065	.058	.050
C-9	9	.302	.201	.151	.121	.101	.086	.075	.067	.060	.050
C-10	10	.311	.207	.156	.124	.104	.089	.078	.069	.062	.051
C-11	15	.343	.229	.172	.137	.114	.098	.086	.076	.069	.054
C-12	20	.363	.242	.182	.145	.121	.104	.091	.081	.073	.056
C-13	25	.377	.251	.188	.151	.126	.108	.094	.084	.075	.058
C-14	30	.387	.258	.184	.153	.129	.111	.097	.086	.077	.060
C-15	40	.402	.268	.201	.161	.134	.115	.100	.089	.080	.060
C-16	50	.412	.275	.206	.165	.137	.118	.103	.092	.082	.061
C-17	75	.428	.285	.214	.171	.143	.122	.107	.095	.086	.063
C-18	100	.437	.291	.219	.175	.146	.123	.109	.097	.087	.064

For explanation of the code, see par. 2A.1 and table 2A-1.

Table 2C-2(d)
Master Table for Life Tests Terminated at Preassigned Time—Testing With Replacement
Values of T/n , for $\alpha=0.05$

Code	r	Sample size									
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	12
D-1	1	0.144	0.086	0.072	0.048	0.040	0.041	0.036	0.032	0.029	0.014
D-2	2	.240	.180	.129	.086	.080	.069	.060	.053	.048	.034
D-3	3	.289	.192	.144	.113	.096	.082	.072	.064	.058	.043
D-4	4	.317	.211	.158	.127	.106	.091	.079	.070	.063	.047
D-5	5	.337	.226	.168	.136	.113	.096	.084	.073	.067	.051
D-6	6	.352	.234	.176	.141	.117	.100	.088	.078	.070	.053
D-7	7	.363	.242	.182	.145	.121	.104	.091	.081	.073	.056
D-8	8	.372	.248	.186	.149	.124	.106	.093	.083	.074	.057
D-9	9	.380	.253	.190	.152	.127	.108	.095	.084	.076	.058
D-10	10	.388	.258	.192	.153	.129	.110	.097	.086	.077	.060
D-11	15	.408	.272	.204	.163	.136	.117	.102	.091	.082	.064
D-12	20	.421	.281	.218	.166	.140	.120	.106	.094	.084	.066
D-13	25	.429	.288	.218	.172	.143	.123	.107	.096	.086	.068
D-14	30	.436	.291	.218	.174	.145	.126	.109	.097	.087	.069
D-15	40	.445	.296	.222	.178	.148	.127	.111	.099	.089	.071
D-16	50	.451	.299	.225	.180	.150	.130	.113	.100	.090	.072
D-17	75	.460	.307	.230	.184	.154	.131	.115	.102	.092	.074
D-18	100	.466	.310	.233	.186	.156	.133	.116	.103	.093	.075

For explanation of the code, see par. 2A.1 and table 2A-1.

Tabla 9C-2(c) y (d) (tabla 2C-2(c) y (d))

Table 9C-2(e)
 Master Table for Life Tests Terminated at Preassigned Time—Testing With Replacement
 Values of T/θ_0 for $\alpha = 0.50$

Code	r	Sample size									
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	20
E-1	1	0.317	0.231	0.174	0.130	0.116	0.099	0.087	0.077	0.1669	0.035
E-2	2	.420	.280	.210	.168	.140	.120	.105	.093	.084	.042
E-3	3	.446	.297	.221	.178	.149	.127	.111	.099	.089	.046
E-4	4	.459	.306	.230	.184	.151	.131	.115	.102	.092	.046
E-5	5	.467	.311	.231	.187	.156	.133	.117	.104	.093	.047
E-6	6	.473	.315	.236	.189	.158	.135	.118	.105	.095	.047
E-7	7	.476	.318	.238	.191	.159	.136	.119	.106	.095	.048
E-8	8	.479	.320	.240	.192	.160	.137	.120	.107	.096	.048
E-9	9	.482	.321	.241	.193	.161	.138	.120	.107	.096	.048
E-10	10	.483	.322	.242	.193	.161	.138	.121	.107	.097	.048
E-11	15	.489	.326	.244	.196	.163	.140	.122	.109	.098	.049
E-12	20	.492	.328	.246	.197	.164	.140	.123	.109	.098	.049
E-13	25	.493	.329	.247	.197	.164	.141	.123	.110	.099	.049
E-14	30	.494	.330	.247	.198	.165	.141	.124	.110	.099	.049
E-15	40	.496	.331	.248	.198	.165	.142	.124	.110	.099	.050
E-16	50	.497	.331	.248	.199	.166	.142	.124	.110	.099	.050
E-17	75	.498	.332	.249	.199	.166	.142	.124	.111	.100	.050
E-18	100	.498	.332	.249	.199	.166	.142	.125	.111	.100	.050

For explanation of the code, see pp. SA-1 and table SA-1.

LIFE TESTS TERMINATED AT PREASSIGNED TIME

Tabla 9C-2(e) (tabla 2C-2(e)). Tablas Maestras para Pruebas de Vida en Tiempo Preasignado, Pruebas con Reemplazo.

PRUEBAS DE VIDA FINALIZADAS EN TIEMPO PREFIJADO

PARTE II

PLANES PARA LA TOMA DE MUESTRAS PARA PRUEBAS DE VIDA
 ESPECIFICANDO α , β , θ_1/θ_0 Y T/θ_0

C6 DISEÑANDO LA TOMA DE MUESTRAS CON PRUEBAS DE VIDA.

Una toma de muestra de prueba de vida puede ser diseñada para que su CCO cumpla la siguientes condiciones establecidas: 1) Si $\theta = \theta_0$, entonces la probabilidad de que el lote cumpla el criterio de aceptabilidad es $1 - \alpha$, y 2) Si $\theta = \theta_1$, entonces la probabilidad de que el lote cumpla el criterio de aceptabilidad es aproximadamente igual a β . Esta parte del manual proporciona procedimientos para obtener los valores de el número de finalización y el tamaño de la muestra cuando ciertos valores seleccionados α , β , θ_1/θ_0 y T/θ_0 son

especificados. Esta parte del manual puede ser considerada una extensión de la sección C, parte I, así que cuando los valores de α , β , θ_1/θ_0 y T/θ_0 , sean necesarios, refiérase a la sección C, parte I, para determinar si una de las tomas de muestra dadas en ésta sección es aplicable. Más aún, si el valor deseado de T/θ_0 no es dado en esta parte del manual, puede ser notado que T es generalmente un límite superior mientras θ_0 es un límite inferior. Así que, si la toma de muestras no es dada para el valor deseado de T/θ_0 , el plan para la toma de muestras para el siguiente valor inferior de T/θ_0 que es dado, puede ser usado.

C6.1 Pruebas de Vida Cuando la Prueba es sin Reemplazo. De la tabla 9C-3 (tabla 2C-3), los valores del número de finalización r y el tamaño de la muestra n pueden ser obtenidos cuando la prueba es sin reemplazo para valores de $\alpha = 0.01, 0.05, 0.10$ y 0.25 ; $\beta = 0.01, 0.05, 0.10$ y 0.25 ; $\theta_1/\theta_0 = 2/3, 1/2, 1/3, 1/5$ y $1/10$; y $T/\theta_0 = 1/3, 1/5, 1/10$ y $1/20$. Los valores de θ_1/θ_0 y T/θ_0 deberían ser calculados para los valores apropiados de α, β , los valores de r y n deberían ser entonces obtenidos de la tabla 9C-3 (tabla 2C-3).

Ejemplo C-3 (Prueba de vida finalizada en el tiempo prefijado, prueba sin reemplazo).

Ejemplo: Encontrar la prueba de vida sin reemplazo la cual no exceda las 500 horas y que aceptará un lote con vida media de 10,000 horas al menos 90% del tiempo pero se rechazará un lote con vida media inaceptable de 2,000 horas aproximadamente del 90% de el tiempo.

Solución: En este caso $T = 500$, $\theta_0 = 10,000$, $\theta_1 = 2,000$, $\alpha = 0.10$, y $\beta = 0.10$. Por lo tanto $\theta_1/\theta_0 = 1/5$, y $T/\theta_0 = 1/20$. Mirando en la tabla 9C-3 (tabla 2C-3) bajo $\alpha = 0.10$, $\beta = 0.10$, $\theta_1/\theta_0 = 1/5$ y $T/\theta_0 = 1/20$, el número de finalización $r = 3$ y el tamaño de la muestra $n = 23$, son obtenidos. Así los planes sin reemplazo deseados es como sigue: Empezar la prueba de vida con $n = 23$ unidades. No reemplazar ninguna unidad que falle. El lote es considerado que ha cumplido el criterio de aceptabilidad si 3 fallas no han ocurrido antes de 500 horas y la prueba de vida es terminada en este tiempo. El lote es considerado que ha fallado al cumplir el criterio de aceptabilidad si la 3ra falla ocurre antes de 500 horas y la prueba es terminada en el tiempo de la 3ra falla.

C6.2 Pruebas de Vida Cuando la Prueba es con Reemplazo. De la tabla 9C-4 (tabla 2C-4), los valores de los números de finalización r y de el tamaño de la muestra n pueden ser obtenidos cuando la prueba es con reemplazo para valores de $\alpha = 0.01, 0.05, 0.10$ y 0.25 ; $\beta = 0.01, 0.05, 0.10$ y 0.25 ; $\theta_1/\theta_0 = 2/3, 1/2, 1/3, 1/5$ y $1/10$; y $T/\theta_0 = 1/3, 1/5, 1/10$ y $1/20$. Los valores de θ_1/θ_0 y T/θ_0 deberían ser calculados y para los valores apropiados

de α y β , los valores de r y n deberían entonces ser obtenidos de la tabla 9C-4 (tabla 2C-4).

Ejemplo C-4 (Prueba de vida finalizada en el tiempo prefijado, prueba con reemplazo).

Ejemplo: Encontrar una toma de muestras para la prueba de vida con reemplazo el cual no exceda las 500 horas y se aceptará un lote con vida media de 10,000 horas al menos con 90% del tiempo pero se rechazará un lote con vida media de 2,000 horas aproximadamente del 90% de el tiempo.

Solución: En este problema, $T = 500$, $\alpha = 0.10$, $\beta = 0.10$, $\theta_1 = 2,000$ y $\theta_0 = 10,000$. Por lo tanto $\theta_1/\theta_0 = 1/5$, $T/\theta_0 = 1/20$, el número de finalización $r = 3$ y el tamaño de la muestra $n = 22$ unidades. La prueba deseada es como sigue: empezar la prueba de vida con $n = 22$ unidades. Tan pronto como una unidad falle, reemplazarla por una unidad nueva. El lote es considerado que ha cumplido el criterio de aceptabilidad si 3 fallas no han ocurrido en 500 horas y la prueba de vida es terminada en ese momento. El lote es considerado que ha fallado al cumplir el criterio de aceptabilidad si la 3ra falla ocurre antes de 500 horas y la prueba es terminada en el tiempo de la 3ra falla.

LIFE TESTS TERMINATED AT PREASSIGNED TIME
TESTING WITHOUT REPLACEMENT

Table 2C-3

Life Test Sampling Plans for Specified α , β , t_0 , and T_0

c, %	r	T ₀				r	T ₀			
		1/3	1/5	1/10	1/20		1/3	1/5	1/10	1/20
		a	b	c	d		a	b	c	d
		$\alpha = 0.01$		$\beta = 0.01$			$\alpha = 0.05$		$\beta = 0.01$	
2/3	136	403	622	1172	2275	95	289	447	843	1639
1/2	46	119	182	340	657	33	90	138	258	499
1/3	19	41	61	113	216	13	30	45	83	160
1/5	9	15	22	39	74	7	13	20	36	69
1/10	5	6	9	15	28	4	6	9	15	29
		$\alpha = 0.01$		$\beta = 0.05$			$\alpha = 0.05$		$\beta = 0.05$	
2/3	101	291	448	842	1632	67	198	305	575	1116
1/2	35	87	132	245	472	23	59	90	168	326
1/3	15	30	45	82	157	10	21	32	60	113
1/5	8	13	18	33	62	5	8	12	22	41
1/10	4	4	6	10	18	3	4	5	8	17
		$\alpha = 0.01$		$\beta = 0.10$			$\alpha = 0.05$		$\beta = 0.10$	
2/3	83	234	359	678	1307	58	159	245	462	895
1/2	30	72	109	202	390	18	47	72	134	268
1/3	13	28	37	67	128	8	18	24	43	83
1/5	7	11	15	28	50	4	4	9	15	29
1/10	4	4	6	10	18	3	4	5	8	17
		$\alpha = 0.01$		$\beta = 0.25$			$\alpha = 0.05$		$\beta = 0.25$	
2/3	60	162	248	465	899	38	98	147	278	535
1/2	23	49	74	137	263	13	30	45	83	160
1/3	10	18	26	46	87	6	11	16	29	56
1/5	5	8	9	15	28	3	4	5	9	17
1/10	3	3	4	8	10	2	2	2	4	8

Table 9C-3 (table 2C-3)

Table 2C-3--Continued

n	p	7.4				n	7.4			
		1/3	1/5	1/10	1/20		1/3	1/5	1/10	1/20
		a	n	a	n		a	n	a	n
		$\alpha = 0.10$		$\beta = 0.01$			$\alpha = 0.25$		$\beta = 0.01$	
2/3	77	248	369	699	1358	52	168	261	496	965
1/2	26	73	112	210	407	17	51	79	149	289
1/3	11	27	40	75	145	7	19	29	54	105
1/5	5	10	14	26	51	3	6	10	18	36
1/10	3	5	7	12	23	2	3	5	10	20
		$\alpha = 0.10$		$\beta = 0.05$			$\alpha = 0.25$		$\beta = 0.05$	
2/3	52	156	242	456	886	32	101	156	296	576
1/2	18	48	73	137	265	11	31	48	91	177
1/3	8	18	27	50	97	5	12	19	36	69
1/5	4	7	10	19	36	2	3	5	10	20
1/10	2	2	3	6	11	2	3	5	10	20
		$\alpha = 0.10$		$\beta = 0.10$			$\alpha = 0.25$		$\beta = 0.10$	
2/3	41	121	186	351	681	23	71	110	207	403
1/2	15	39	59	110	213	8	22	33	63	123
1/3	6	12	18	34	66	4	9	14	27	52
1/5	3	5	7	12	23	2	3	5	10	20
1/10	2	2	3	6	11	1	1	1	3	6
		$\alpha = 0.10$		$\beta = 0.25$			$\alpha = 0.25$		$\beta = 0.25$	
2/3	25	69	107	201	389	12	34	53	101	196
1/2	9	21	31	58	113	5	12	19	36	69
1/3	4	7	10	19	36	2	3	5	10	20
1/5	3	5	7	12	23	1	1	1	3	6
1/10	2	2	3	6	11	1	1	1	3	6

OC curves are provided for these sampling plans. However, two points on the OC curves (1, 1-n) and (A/n, β) are given.

Tabla 9C-3 (tabla 2C-3) Continuación

LIFE TESTS TERMINATED AT PREASSIGNED TIME
TESTING WITH REPLACEMENT

Table 2C-4
Life Test Sampling Plans for Specified α , β , R_1/R_0 , and T_1/R_0

T_1/R_0	r	T/R_0				r	T/R_0			
		$1/3$	$1/2$	$1/10$	$1/20$		$1/3$	$1/2$	$1/10$	$1/20$
		n	n	n	n		n	n	n	n
		$\alpha = 0.01$	$\beta = 0.01$			$\alpha = 0.05$	$\beta = 0.01$			
2/3	136	331	551	1103	2207	95	238	397	795	1591
1/2	48	95	158	317	634	33	72	120	241	483
1/3	19	31	51	103	206	13	23	38	76	153
1/5	9	10	17	35	70	7	9	16	32	65
1/10	5	4	6	12	25	4	4	6	13	27
		$\alpha = 0.01$	$\beta = 0.05$			$\alpha = 0.05$	$\beta = 0.05$			
2/3	101	237	365	790	1581	87	162	270	541	1082
1/2	36	68	113	227	454	23	47	78	157	314
1/3	15	22	37	74	149	10	16	27	54	108
1/5	8	8	14	29	58	5	6	10	19	39
1/10	4	3	4	8	16	3	3	4	8	16
		$\alpha = 0.01$	$\beta = 0.10$			$\alpha = 0.05$	$\beta = 0.10$			
2/3	83	189	316	632	1263	65	130	218	433	867
1/2	30	56	93	187	374	19	37	62	124	248
1/3	13	18	30	60	121	8	11	19	39	79
1/5	7	7	11	23	46	4	4	7	13	27
1/10	4	3	4	8	16	3	3	4	8	16
		$\alpha = 0.01$	$\beta = 0.25$			$\alpha = 0.05$	$\beta = 0.25$			
2/3	60	130	217	434	869	35	77	130	266	517
1/2	22	37	62	125	251	13	23	38	76	153
1/3	10	12	20	41	82	6	7	13	26	52
1/5	6	4	7	13	26	3	3	4	8	16
1/10	3	2	2	4	8	2	1	2	3	7

Tabla 9C-4 (tabla 2C-4)

Table 2C-4 -- Continued

n/h	n	T _h				n	T _h			
		1/3	1/5	1/10	1/20		1/3	1/5	1/10	1/20
		a	b	c	d		a	b	c	d
		$\alpha = 0.10$		$\beta = 0.01$			$\alpha = 0.25$		$\beta = 0.01$	
2/3	77	197	329	659	1319	52	140	234	459	939
1/2	26	59	98	197	394	17	42	70	140	281
1/3	11	21	35	70	140	7	15	25	50	101
1/5	5	7	12	24	48	3	5	8	17	34
1/10	3	3	5	11	22	2	2	4	9	19
		$\alpha = 0.10$		$\beta = 0.05$			$\alpha = 0.25$		$\beta = 0.05$	
2/3	52	128	214	429	859	32	84	140	280	560
1/2	18	38	64	128	256	11	25	43	86	172
1/3	8	13	23	46	93	5	10	16	33	67
1/5	4	5	8	17	34	2	3	5	10	19
1/10	2	2	3	5	10	2	2	4	9	19
		$\alpha = 0.10$		$\beta = 0.10$			$\alpha = 0.25$		$\beta = 0.10$	
2/3	41	99	165	330	660	23	58	98	196	392
1/2	15	30	51	102	205	8	17	29	58	119
1/3	6	9	15	31	63	4	7	12	25	50
1/5	3	4	6	11	22	2	3	4	9	19
1/10	2	2	2	5	10	1	1	2	3	6
		$\alpha = 0.10$		$\beta = 0.25$			$\alpha = 0.25$		$\beta = 0.25$	
2/3	26	66	94	188	376	12	28	47	95	190
1/2	9	18	27	54	108	5	10	16	33	67
1/3	4	6	8	17	34	2	2	4	8	16
1/5	3	3	5	11	22	1	1	2	3	6
1/10	2	1	2	5	10	1	1	1	2	5

No operating characteristic curves are provided for these sampling plans. Moreover, two points on the OC curves (1, 1- α) and (h/h, β) are given.

Tabla 9C-4 (tabla 2C-4) Continuación

PRUEBAS DE VIDA FINALIZADAS EN TIEMPO PREFIJADO, PRUEBAS SIN
REEMPLAZO

PARTE III

PLANES PARA LA TOMA DE MUESTRA DE PRUEBA DE VIDA BASADAS EN
RAZONES DE FALLA

**C7 FRACCIÓN DE LA FALLA DE UN LOTE ANTES DEL TIEMPO
ESPECIFICADO.**

La toma de muestras de esta parte del manual puede ser usado cuando 1) la proporción del lote falla antes del tiempo especificado ó 2) la razón de falla durante este período es especificado. Entonces las tomas de muestras son basadas en proporción de la falla del lote, cuando la razón de falla para el período de tiempo es especificado, la razón de falla debería ser multiplicada por la duración de tiempo especificado. Eso es

$$p = GT$$

donde p es la proporción de la falla del lote antes del tiempo especificado T y G es la razón de falla durante el período de el tiempo T .

C8 TOMA DE MUESTRAS PARA PRUEBA DE VIDA.

Un lote puede ser considerado satisfactorio si la razón de falla es menor que o igual que p_0 y este puede ser considerado poco satisfactorio si la razón de falla es mayor que o igual a p_1 , donde $p_1 > p_0$. De la la tabla 9C-5 (tabla 2C-5), los valores de el número de finalización r y del factor D son obtenidos cuando la prueba es sin reemplazo para valores de $\alpha = 0.01, 0.05$ y 0.10 , $\beta = 0.01, 0.05$ y 0.10 ; y $p_1/p_0 = 1.5, 2, 2.5, 3, 4, 5$ y 10 . En esta tabla el tamaño de la muestra, n , está dada por $[D/p_0]$ lo cual significa que el entero más grande de todos es menor o igual a D/p_0 , por ejemplo $[3.8] = 3$ y $[4] = 4$.

EJEMPLO C-5 (Prueba de Vida Terminada en Tiempo Prefijado, Prueba sin Reemplazo).

Ejemplo: Encontrar una toma de muestras de prueba de vida sin reemplazo el cual se aceptará si al menos 90% de los lotes para lo cual la razón de falla para un período de tiempo, expresado como un porcentaje, es menor que o igual al 1% por 1,000 horas y se

rechazará al menos el 95% de los lotes, cuya razón de falla es mayor o igual que al 10% por 1,000 horas.

Solución: En este problema, $G_0 = 0.01/1,000 = 0.00001$, $G_1 = 0.10/1,000 = 0.00010$, $\alpha = 0.10$, $\beta = 0.05$ y $T = 1,000$ horas. Así, $p_0 = 1,000$, $G_0 = 0.01$, $p_1 = 1,000$, $G_1 = 0.10$ y $p_1/p_0 = 10$. Mirando en la tabla 9C-5 (tabla 2C-5), es visto que $r = 2$ y $n = \lceil 0.532/0.01 \rceil = 53$. Así, el plan deseado es como sigue: colocar 53 unidades a prueba. Si 2 fallas ocurren antes del tiempo T , rechazar el lote y terminar la prueba en el tiempo en que ocurra la segunda falla. Si uno o pocas fallas han ocurrido en el tiempo T , aceptar el lote y terminar la prueba.

**PRUEBAS DE VIDA TERMINADAS EN TIEMPO PREFIJADO
PRUEBAS SIN REEMPLAZO**

**LIFE TESTS TERMINATED AT PREASSIGNED TIME
TESTING WITHOUT REPLACEMENT**

Table 9C-5
Life Test Sampling Plans for Specified α , β , and p_1/p_0
Values of r (upper numbers) and of D (lower numbers)*

p ₁ /p ₀	$\alpha=0.01$			$\alpha=0.05$			$\alpha=0.10$		
	$\beta=0.01$	0.05	0.10	0.01	0.05	0.10	0.01	0.05	0.10
3/2	136	101	83	95	87	55	77	52	41
	110.4	79.1	63.3	79.6	54.1	43.4	66.0	43.0	33.0
2	66	33	30	33	23	19	26	18	16
	31.7	22.7	18.7	24.2	18.7	22.4	19.7	12.8	10.3
3/2	87	51	18	19	14	11	16	11	9
	16.4	11.8	8.82	12.4	8.66	6.17	10.3	7.02	5.43
3	19	15	13	13	19	8	11	8	9
	10.3	7.68	6.10	7.66	5.43	2.98	7.02	4.96	3.18
4	12	10	9	9	7	6	7	5	4
	5.43	4.13	3.51	4.70	3.29	2.81	2.90	2.43	1.76
5	9	8	7	7	6	4	5	4	3
	3.51	2.91	2.33	3.29	1.97	1.97	2.43	1.75	1.10
10	8	4	4	4	3	3	3	2	2
	1.36	.333	.333	1.37	.318	.318	1.18	.333	.333

*The sample size n is obtained by taking the largest integer less than or equal to the tabulated value divided by α , β , and p_1/p_0 .
Producer's risk α is the probability of rejecting lots with acceptable properties of lot testing before specified time, p_0 .
Consumer's risk β is the probability of accepting lots with unacceptable properties of lot testing before specified time, p_1 .

Tabla 9C-5 (tabla 2C-5). Toma de Muestras para Pruebas de Vida para α , β , y p_1/p_0 especificados.

SECCIÓN 2D

PLANES DE TOMA DE MUESTRA PARA PRUEBA DE VIDA SECUENCIALES

D1 PLANES PARA LA TOMA DE MUESTRAS DE PRUEBAS DE VIDA SECUENCIALES.

En ésta parte del manual se describen los procedimientos a usarse al determinar la aceptabilidad del lote con prueba de vida secuenciales. Dos procedimientos son dados: 1) procedimiento cuando la prueba es sin reemplazo y 2) cuando la prueba es con reemplazo.

D1.1 Uso de Pruebas de Vida Secuencial. Para determinar si el lote cumple el criterio de aceptabilidad con respecto a la duración promedio de vida, la toma de muestras aplicable debería ser usada de acuerdo con la provisiones de la seccion A.

D1.2 Código de Designación para la Toma de Muestras. El código de designación debería ser seleccionado de la tabla 9A-1 (tabla 2A-1).

D.2 SELECCIÓN DE PRUEBAS DE VIDA SECUENCIAL PARA DETERMINAR LA ACEPTABILIDAD DEL LOTE.

D2.1 Tabla Maestra de la Toma de Muestras. Las tablas maestras para pruebas de vida secuenciales para determinar la aceptabilidad de un lote esta en la tabla 9D-1 (tabla 2D-1).

D2.2 Obtención de la Toma de Muestras. La toma de muestras de pruebas de vida secuenciales consiste de una muestra de tamaño n , la línea de corte aceptada h_0 , la línea de corte rechazada h_1 , y la pendiente común s de las dos líneas. La toma de muestras es obtenida de la tabla maestra.

D2.2.1 Tamaño de la Muestra. El número mínimo de unidades que deberían ser colocadas a prueba, r_0 , cuando la prueba es sin reemplazo, es mostrada en la tabla maestra. Cuando la prueba es con reemplazo, la muestra puede ser de cualquier tamaño. Incrementando el tamaño de la muestra, en cualquier de las dos muestras con o sin reemplazo, se decrementará el tiempo requerido para alcanzar una decisión en cuanto a la aceptabilidad del lote.

D2.2.2 Línea de Corte Aceptada (h_0). Es obtenida de la tabla maestra multiplicando el dato correspondiente de la muestra del código designada por la vida media aceptable θ_0 .

D2.2.3 Línea de Corte Rechazada (h_1). Es obtenida de la tabla maestra multiplicando el dato correspondiente de la muestra del código designada por θ_0 .

D2.2.4 Líneas de Decisión de la Pendiente. La pendiente común s de las líneas de aceptación y de rechazo son obtenidas de la tabla maestra multiplicando el dato correspondiente de la muestra de código designada por θ_0 .

D2.3 Tiempo de Aceptación. El tiempo de aceptación

$$h_0 + ks$$

donde h_0 es la línea de corte aceptada, obtenida en el párrafo D2.2.2.

s es la pendiente de la línea de decisión, obtenida en el párrafo D2.2.4.

k es el número de unidades que fallaron observadas durante el tiempo en que la prueba de vida ha estado en marcha.

y debería ser calculado para $k = 0, 1, 2, \dots$

D2.4 Tiempo de Rechazo. El tiempo de rechazo

$$h_1 + ks$$

donde h_1 es la línea de corte rechazada, obtenida en el párrafo D2.2.3.

s es la pendiente de la línea de decisión, obtenida en el párrafo D2.2.4.

k es el número de unidades que fallaron observadas durante el tiempo en que la prueba de vida ha estado en marcha.

y debería ser calculado para $k = 0, 1, 2, \dots$. Los valores negativos del tiempo de rechazo significan que más fallas deben ocurrir antes de rechazar el lote.

D.3 PROCEDIMIENTO DE ACEPTABILIDAD DE UN LOTE CUANDO LA PRUEBA ES SIN REEMPLAZO.

D3.1 Vida Total. La aceptabilidad de un lote con respecto a una prueba de vida secuencial debería ser juzgada por la cantidad $v(t)$.

D3.2 Cálculo. La siguiente cantidad debería ser calculada de los resultados de las pruebas:

$$V(t) = \sum_{i=1}^k x_{i:n} + (n-k)t$$

donde $x_{i:n}$ indica el tiempo de la i -ésima falla en una muestra de tamaño n .

t indica el tiempo en que la prueba de falla ha estado en marcha.

k indica el número de unidades falladas observadas en el tiempo t .

$V(t)$ indica el tiempo total de funcionamiento por todas las unidades a prueba, con y sin fallas, hasta el tiempo t .

D3.3 Criterio de Aceptabilidad. Comparar la cantidad $V(t)$ con el tiempo de aceptación, mencionado en el párrafo D2.3 y con el tiempo de rechazo, mencionado en el párrafo D2.4. Si $V(t)$ igual o mayor que $h_0 + ks$, el lote cumple con el criterio de aceptabilidad; si $V(t)$ es menor o igual que $h_1 + ks$, el lote no cumple con el criterio de aceptabilidad; y si $h_1 + ks < V(t) < h_0 + ks$, la evidencia es suficiente para tomar una decisión aceptable, de modo que la prueba de vida debe continuar y repetir los procedimientos de arriba hasta el último tiempo t .

D.4 PROCEDIMIENTO DE ACEPTABILIDAD DE UN LOTE CUANDO LA PRUEBA ES CON REEMPLAZO.

D4.1 Vida Total. La aceptabilidad de un lote con respecto a la prueba de vida secuencial debería ser juzgada por la cantidad $V(t)$.

D4.2 Cálculo. La siguiente cantidad debería ser calculada de los resultados de las pruebas.

$$V(t) = nt$$

donde n indica el número de unidades colocadas en la prueba originalmente.

t indica el tiempo en que la prueba de vida ha estado en marcha

$V(t)$ indica el tiempo total de funcionamiento por todas las unidades, con y sin fallas, unidades originales y unidades reemplazadas, hasta el tiempo t .

D4.3 Criterio de Aceptabilidad. Comparar la cantidad $V(t)$ con el tiempo de aceptación, mencionado en el párrafo D2.3 y con el tiempo de rechazo, mencionado en el párrafo

D2.4. Si $V(t)$ es igual o mayor que $h_0 + ks$, el lote cumple el criterio de aceptabilidad; si $V(t)$ es menor que o igual que $h_1 + ks$, el lote no cumple el criterio de aceptabilidad; y si $h_1 + ks < h_0 + ks$, la evidencia es insuficiente para tomar una decisión aceptable, así que la prueba de vida debe continuar y el procedimiento de arriba es repetido hasta el último tiempo t .

D5 SELECCIÓN DE TIEMPO PARA DETERMINAR LA ACEPTABILIDAD.

Los procedimientos de las secciones D3 y D4 permiten la aceptación de el lote si no se observan fallas antes de que el tiempo h_0/n haya transcurrido; rechazar el lote es permitido en cualquier tiempo $t > 0$ pero el número de fallas debe exceder $-h_1/s$. Si las decisiones en cuanto a la aceptabilidad del lote pueden ser hechas continuamente en tiempo, el ahorro más grande en el tiempo de espera supuesto y el número de fallas requerido para la decisión son realizados durante los procedimientos de las secciones B y C. Sin embargo, si la aceptación de el lote no ha sido permitido en el tiempo h_0/n , calcular $V(t)$, mencionados en los párrafos D3.2 y D4.2, pueden ser hechos periódicamente. Este cálculo de $V(t)$ debe seguir a cada falla pero puede ser hecha a menudo para reducir el tiempo de espera requerido para la decisión.

D6 TRUNCAMIENTO DE PRUEBAS DE VIDA SECUENCIALES.

La prueba de vida secuencial, cuando la prueba es sin reemplazo, terminará, al menos, cuando todas las unidades colocadas a prueba hayan fallado; la prueba de vida secuencial, cuando la prueba es con reemplazo, no debería ser permitida funcionar indefinidamente pero puede ser terminada por los procedimientos de este párrafo. En cada caso, la prueba de vida secuencial puede ser terminada y el lote considerado tiene que cumplir el criterio de aceptabilidad si el número de fallas es menor que r_0 , donde este valor de r_0 es obtenido de la tabla 9D-1 (tabla 2D-1), y si

$$V(t) \geq \min(h_0 + ks, sr_0)$$

donde $V(t)$ y s fueron explicados en los párrafos D2.2.4 y D3.2 ó D4.2 y $\min(h_0 + ks, sr_0)$ significa el menor de cada $h_0 + ks$ o sr_0 . La prueba de vida secuencial debería ser terminada y el lote considerado que ha fallado al cumplir el criterio de aceptabilidad si $V(t) \leq h_1 + ks$ o si el número de fallas es igual a r_0 y $V(t) < sr_0$.

D7 PROCEDIMIENTO DE ACEPTACIÓN POR GRÁFICAS.

D7.1 Hacer las Gráficas Antes de Empezar la Prueba de Vida. Los procedimientos de aceptabilidad de las secciones D2 a D6 pueden ser dibujadas en una gráfica con el eje vertical representando $V(t)$ y el eje horizontal representando k (ver ejemplo D-3 y figura 9D-1 (figura 2D-1)). La línea de aceptación debería ser dibujada con el eje vertical interceptada igual a h_0 y con pendiente s . La línea de rechazo debería ser dibujada con el eje vertical interceptada en h_1 y con pendiente s . Si la prueba secuencial es truncada, una línea horizontal debería ser dibujada en $V(t) = sr_0$ desde la línea de aceptación a el punto (r_0, sr_0) . De este punto, una línea vertical es dibujada para la línea de rechazo (ver ejemplo D-4 y figura 9D-2 (figura 2D-2)).

D7.2 Graficando los Datos. Los datos de prueba de vida $V(t)$, que fué obtenida del párrafo D3.2 ó D4.2, deberían ser graficados de acuerdo con el párrafo D7.1, moviéndose verticalmente tan largo como la siguiente falla este siendo esperada, y moviéndose horizontalmente por una unidad (en k) al ocurrir cada falla. La prueba de vida continúa hasta que los datos graficados tocan una de las líneas ya dibujadas en la gráfica. Si los datos graficados tocan la línea de aceptación o la línea horizontal $V(t) = sr_0$ en un punto a la izquierda de (r_0, sr_0) , el lote cumple con el criterio de aceptabilidad. Si el dato graficado toca la línea de rechazo o la línea vertical debajo del punto (r_0, sr_0) , el lote no cumple el criterio de aceptabilidad.

D8 NÚMERO ESPERADO DE FALLAS REQUERIDO PARA LA DECISIÓN.

El número esperado de fallas requerido para una decisión en cuanto al lote de aceptabilidad es dependiente de la vida media de el lote. La tabla maestra da los números esperados de fallas requeridos cuando la vida media es igual a θ , θ_1 , s (la vida media cuyo valor numérico es igual a la pendiente del párrafo D2.2.4) y θ_0 ; y son indicadas por $E_{\theta}(r)$, $E_{\theta_1}(r)$, $E_s(r)$ y $E_{\theta_0}(r)$, respectivamente. Estos valores son aplicados si la prueba es con o sin reemplazo y se asume que las decisiones son hechas continuamente a tiempo. Si $V(t)$ es calculada periódicamente, los valores esperados pueden ser excedidos.

D9 TIEMPO DE ESPERA SUPUESTO REQUERIDO PARA LA DECISIÓN.

El tiempo de espera supuesto requerido para una decisión en cuanto a la aceptabilidad del lote es dependiente en la vida media del lote y de el número de unidades de producto

colocados a prueba. Cuando la prueba es sin reemplazo, el tiempo de espera supuesto, cuando $\theta = 0$, θ_1 , s , y θ_0 , son dados aproximadamente por

$$\begin{aligned} E_0(t) &= 0 \\ E_{\theta_1}(t) &\cong \theta_1 \log \left\{ n / [n - E_{\theta_1}(r)] \right\} \\ E_s(t) &\cong s \log \left\{ n / [n - E_s(r)] \right\} \\ E_{\theta_0}(t) &\cong \theta_0 \log \left\{ n / [n + E_{\theta_0}(r)] \right\} \end{aligned}$$

Cuando la prueba es con reemplazo, el tiempo esperado supuesto son dados por

$$\begin{aligned} E_0(t) &= 0 \\ E_{\theta_1}(t) &= \theta_1 E_{\theta_1}(r) / n \\ E_s(t) &= s E_s(r) / n \\ E_{\theta_0}(t) &= \theta_0 E_{\theta_0}(r) / n \end{aligned}$$

Estos valores son basados en la suposición de que las decisiones son hechas continuamente a tiempo así que si $V(t)$ es calculada solamente periódicamente, el valor esperado puede ser excedido.

Ejemplo D-1 (Selección de la toma de muestra para prueba de vida secuencial).

Ejemplo: Encontrar un procedimiento de reemplazo secuencial de el cual se aceptará un lote con vida media aceptable $\theta_0 = 1,500$ horas, 95% de el tiempo y rechazar un lote con vida media inaceptable $\theta_1 = 300$ horas, 90% del tiempo. En este caso $\theta_0 = 1,500$, $\theta_1 = 300$, $\alpha = 0.05$ y $\beta = 0.10$.

Solución: Entonces $\theta_1/\theta_0 = 300/1,500 = 0.2$. La tabla 9A-1 (tabla 2A-1) da que la prueba de vida secuencial es B-4. De la tabla 9D-1 (tabla 2D-1), las siguientes cantidades son obtenidas: $h_0 = \theta_0(h_0/\theta_0) = 1,500 (0.5805) = 870.75$ horas, $h_1 = \theta_0(h_1/\theta_0) = 1,500 (0.7453) = 1,117.95$ horas, $s = \theta_0(s/\theta_0) = 1,500 (0.4086) = 612.9$ horas/falla, y mínimo $n = r_0 = 12$. Substituyendo en las fórmulas de los párrafos D4.2 y D4.3, la prueba de vida es continuada tan larga como la desigualdad.

$$-1,117.95 + 612.9 k > n > 870.75 + 612.9 k$$

y es parada tan pronto como la desigualdad no la mantiene. Si 20 unidades son colocadas a prueba, la desigualdad puede ser escrita

$$-55.90 + 30.64 k > t > 43.54 + 30.64 k$$

Si en el tiempo de paro, t es menor que el miembro de la izquierda de la desigualdad, el lote es considerado que ha fallado al cumplir el criterio de aceptabilidad; si, el tiempo de paro, t es mayor que el miembro de la derecha de la desigualdad, el lote es considerado que ha cumplido el criterio de aceptabilidad.

Ejemplo D-2 (Número esperado de fallas y tiempo de espera).

Ejemplo: Determinar el número esperado de fallas y el tiempo de espera supuesto requerido para una decisión en la toma de muestras para la vida secuencial del ejemplo D-1 si $n = 20$ y la vida media del lote es θ , θ_1 , s y θ_0 hrs.

Solución: De la tabla 9D-1 (tabla 2D-1), para planes secuenciales B-4,

$$E_0(r) = 1.8 \text{ unidades.}$$

$$E_{\theta_1}(r) = 3.0 \text{ unidades.}$$

$$E_s(r) = 2.6 \text{ unidades.}$$

$$E_{\theta_0}(r) = 0.9 \text{ unidades.}$$

y de las fórmulas del párrafo D9,

$$E_0(t) = 0 \text{ horas.}$$

$$E_{\theta_1}(t) = 310(3.0)/20 = 46.5 \text{ horas.}$$

$$E_s(t) = (612.9)(2.6)/20 = 79.7 \text{ horas.}$$

$$E_{\theta_0}(t) = 1,500(0.9)/20 = 67.5 \text{ horas.}$$

Ejemplo D-3 (Prueba de vida secuencial).

Ejemplo: En el problema del ejemplo D-1, suponer que una muestra de tamaño 20 es colocada a prueba. Las unidades que fallan son reemplazadas inmediatamente por nuevas

unidades sacadas de el mismo lote. La prueba de vida es empezada en el tiempo $t = 0$ y la primeras cinco fallas acurren en $x_{1,20} = 25$ horas, $x_{2,20} = 55$ horas, $x_{3,20} = 70$ horas, $x_{4,20} = 100$ horas y $x_{5,20} = 160$ horas, todos los tiempos han sido medidos desde $t = 0$.

- a) verificar que ninguna decisión haya sido rechazada en el tiempo $x_{5,20}$.
- b) verificar que si la sexta falla no ha ocurrido en 196.74 horas, medida desde $t = 0$, la prueba de vida puede ser terminada en ese tiempo con la aceptación de el lote.

Solución: El procedimiento de aceptación, como se describió en la sección D7, es dibujada en la figura 9D-1 (figura 2D-1). El dato graficado está todavía dentro de las 2 líneas de decisión en el tiempo $x_{5,20} = 160$ ó $V(t) = 20(160) = 3,200$, pero al cruzar la línea de aceptación cuando $k = 5$ en el tiempo $t = 43.54 + 30.64(5) = 196.74$ entonces $t = V(t)/n$. Entonces la sexta falla no ha ocurrido todavía, la prueba de vida puede ser terminada en $t = 196.74$ horas con la aceptación del lote.

Comentario: si la sexta falla ha ocurrido en $t = 225$ horas, el tiempo ahorrado, tomando decisiones continuamente en tiempo es $225 - 196.74 = 28.26$ horas. Así, si $V(t)$ es calculada solamente después de ocurrir una falla, la prueba de vida ha sido prolongada 28.26 horas innecesariamente.

Ejemplo D-4 (Prueba de vida secuencial truncada).

Ejemplo: En el problema del ejemplo D-1, suponga que la prueba de vida secuencial es truncada y el tamaño de la muestra de 20 es colocada a prueba en el tiempo $t = 0$. Si las primeras 12 fallas ocurren en: 25, 55, 70, 100, 160, 190, 200, 225, 235, 290, 320 y 335 horas. Verificar que el lote no cumple el criterio de aceptabilidad.

Solución: El procedimiento de aceptación de un lote, como se describió en la sección D7, es dibujada en la figura 9D-2 (figura D-2). El dato graficado cruza la línea vertical abajo de el punto (r_0, sr_0) ó $(12, 7354.8)$ así que el lote no cumple con el criterio de aceptabilidad.

Comentario: Mientras la aceptación de el lote en el ejemplo D-3 es hecho entre los tiempos de falla $x_{5,20}$ y $x_{6,20}$, el rechazo del lote en el ejemplo D-4 es hecho en el tiempo de falla $x_{12,20}$. Esto ilustra el punto que la aceptación de un lote puede ser siempre hecho entre los tiempos de falla, mientras que el rechazo de un lote puede solamente ser hecho en un tiempo de falla.

Fig. 2D-1

EXAMPLE OF SEQUENTIAL LIFE TEST

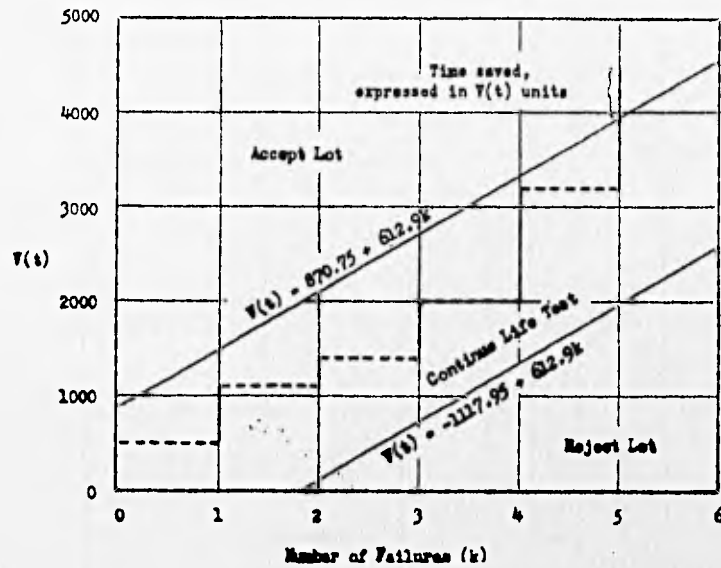


Figura 9D-1 (figura 2D-1)

FIG. 2D-2

EXAMPLE OF TRUNCATED SEQUENTIAL LIFE TEST

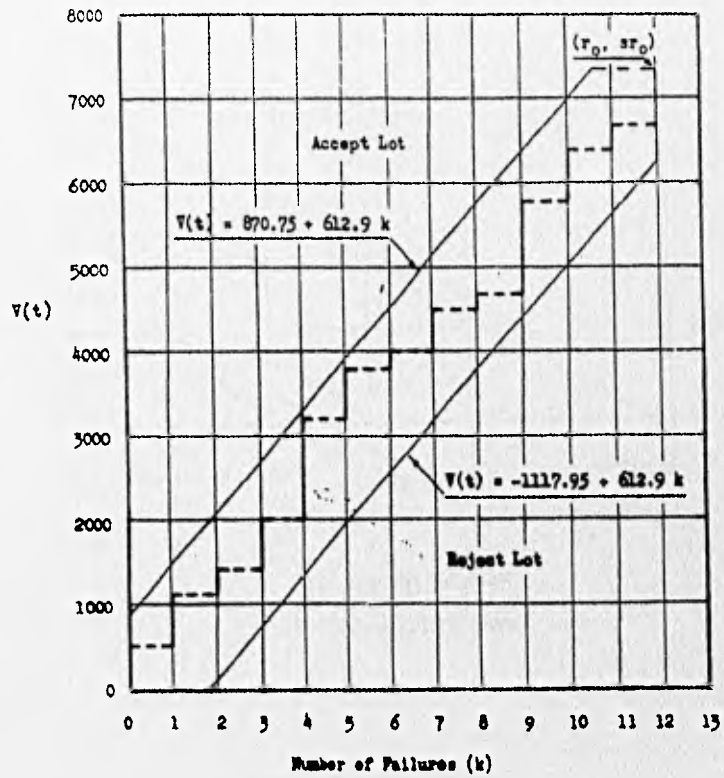


Figura 9D-2 (figura 2D-2)

Table 8D-1(a)
Master Table for Sequential Life Tests
 $\alpha = 0.01$

Code	n	h_0	h_1	mh	$F_0(r)$	$E_1(r)$	$E_0(r)$	$F_0(r)$
A-1	3	.0092	-0.0181	0.0222	0.8	0.8	0.3	0.0
A-2	6	.0906	-1.777	1292	1.4	1.7	1.0	.1
A-3	9	.2048	-4.019	2234	1.8	2.4	1.6	.3
A-4	12	.3215	-6.311	2939	2.1	3.1	2.3	.4
A-5	15	.4367	-8.571	3491	2.5	3.8	3.1	.7
A-6	18	.5483	-1.0762	3934	2.7	4.8	3.8	.9
A-7	21	.6504	-1.2766	4283	3.0	5.2	4.5	1.1
A-8	24	.7520	-1.4760	4587	3.2	5.9	5.3	1.3
A-9	27	.8479	-1.6543	4843	3.4	6.6	6.0	1.6
A-10	30	.9409	-1.8489	5067	3.8	7.3	6.8	1.9
A-11	45	1.3522	-2.6541	5848	4.6	10.5	10.5	3.2
A-12	60	1.7154	-3.3670	6350	5.3	13.8	14.3	4.6
A-13	75	2.0330	-3.9804	6804	6.0	17.0	18.1	6.8
A-14	90	2.3295	-4.5724	6982	6.8	20.2	22.0	7.4
A-15	120	2.8477	-5.5894	7338	7.8	26.4	28.6	10.4
A-16	150	3.3127	-6.5022	7800	8.8	32.7	37.3	13.4
A-17	225	4.3142	-8.4679	8020	10.8	48.3	66.8	21.1
A-18	300	5.1508	-10.1100	8272	12.2	63.5	78.1	28.9

For explanation of the code, see par. 2A.2 and table 2A-1.

Table 8D-1(b)
Master Table for Sequential Life Tests
 $\alpha = 0.05$

Code	n	h_0	h_1	mh	$F_0(r)$	$E_1(r)$	$E_0(r)$	$F_0(r)$
B-1	3	0.0680	-0.0680	0.0680	0.8	0.8	0.4	0.0
B-2	6	.2264	-2.264	2480	1.2	1.8	1.1	.3
B-3	9	.4090	-4.091	3480	1.8	2.3	1.9	.6
B-4	12	.5895	-5.895	4280	2.1	3.0	2.6	.8
B-5	15	.7643	-7.643	4876	2.5	3.7	3.3	1.2
B-6	18	.9342	-9.342	5272	2.9	4.3	4.1	1.6
B-7	21	1.0999	-1.107	5589	3.2	5.0	4.8	1.9
B-8	24	1.2600	-1.4787	5836	3.7	5.6	5.3	2.3
B-9	27	1.4119	-1.6536	6086	4.2	6.3	6.0	2.7
B-10	30	1.5616	-1.7880	6340	4.7	6.9	7.0	3.0
B-11	45	1.9181	-2.4530	6997	5.7	10.0	10.7	5.0
B-12	60	2.2680	-3.0680	7397	6.3	13.1	14.3	7.0
B-13	75	2.6118	-3.6377	7807	6.9	16.1	18.3	9.1
B-14	90	2.9517	-4.2079	8236	7.5	19.2	22.1	11.2
B-15	120	3.7482	-4.9172	9283	8.3	26.0	30.3	15.9
B-16	150	4.5314	-5.6610	10053	9.0	31.0	37.1	19.7
B-17	225	5.6890	-7.1190	11081	10.5	45.0	55.0	28.0
B-18	300	6.8772	-8.6444	12080	12.0	60.4	75.1	37.0

For explanation of the code, see par. 2A.2 and table 2A-1.

Tabla 9D-1(a) y (b) (tabla 2D-1 (a) y (b))

Table 2D-1(c):
Master Table for Sequential Life Tests
 $\alpha = 0.10$

Code	r_1	h_{11}	h_{12}	r_2	F_{11}	$h_{2(1)}$	F_{12}	$F_{2(1)}$
C-1	3	0.1059	-0.1059	0.1485	0.7	0.8	0.5	0.0
C-2	6	.3488	-.3488	.3156	1.4	1.6	1.2	.4
C-3	9	.5736	-.5736	.4111	1.4	2.2	1.9	.8
C-4	12	.7760	-.7760	.4744	1.6	2.9	2.7	1.7
C-5	15	.9397	-.9397	.5201	1.8	3.6	3.4	1.6
C-6	18	1.1319	-1.1319	.5558	2.0	4.2	4.1	2.0
C-7	21	1.2904	-1.2904	.5839	2.2	4.8	4.9	2.5
C-8	24	1.4406	-1.4406	.6073	2.4	5.5	5.6	2.9
C-9	27	1.5781	-1.5781	.6265	2.5	6.1	6.3	3.4
C-10	30	1.7124	-1.7124	.6434	2.7	6.7	7.1	3.8
C-11	45	2.3053	-2.3053	.7024	3.3	9.7	10.8	6.2
C-12	60	2.8078	-2.8078	.7387	3.8	12.6	14.4	8.8
C-13	78	3.2549	-3.2549	.7642	4.3	15.6	18.1	11.0
C-14	90	3.6465	-3.6465	.7827	4.7	18.4	21.7	13.4
C-15	120	4.3813	-4.3813	.8105	5.4	24.3	29.2	18.6
C-16	160	5.0068	-5.0068	.8291	6.0	29.9	36.8	23.4
C-17	225	6.3523	-6.3523	.8588	7.4	43.9	54.7	36.0
C-18	300	7.5250	-7.5250	.8774	8.8	48.2	73.6	49.1

For explanation of the code, see par. 2A.3 and table 2A-1.

Table 2D-1(d):
Master Table for Sequential Life Tests
 $\alpha = 0.25$

Code	r_1	h_{11}	h_{12}	r_2	F_{11}	$h_{2(1)}$	F_{12}	$h_{2(2)}$
Y-1	3	0.2878	-0.2878	0.2071	0.6	0.8	0.4	0.2
Y-2	5	.6090	-.6090	.4587	.9	1.3	1.3	.7
Y-3	8	.8701	-.8701	.5413	1.1	2.1	2.0	1.2
Y-4	12	1.2248	-1.2248	.6200	1.3	2.7	2.8	1.8
Y-5	16	1.4681	-1.4681	.6790	1.5	3.3	3.4	2.3
Y-6	18	1.6282	-1.6282	.7074	1.6	3.9	4.2	2.6
Y-7	21	1.7884	-1.7884	.7300	1.8	4.5	4.8	2.8
Y-8	24	1.9380	-1.9380	.7478	1.9	5.1	5.4	3.0
Y-9	27	2.0880	-2.0880	.7610	2.0	5.6	6.0	3.2
Y-10	30	2.2387	-2.2387	.7703	2.1	6.2	7.0	3.3
Y-11	44	2.5883	-2.5883	.7713	2.6	8.0	10.4	5.1
Y-12	60	2.7420	-2.7420	.7800	3.0	11.0	13.9	6.1
Y-13	78	2.8517	-2.8517	.8190	3.3	13.8	17.4	6.8
Y-14	90	2.9380	-2.9380	.8341	3.6	17.2	20.9	7.0
Y-15	120	3.0400	-3.0400	.8543	4.3	25.0	27.7	8.0
Y-16	160	3.1187	-3.1187	.8680	4.7	27.9	34.6	8.1
Y-17	225	3.2000	-3.2000	.8800	6.7	31.1	31.8	11.3
Y-18	300	3.2884	-3.2884	.8883	6.8	34.1	38.6	12.8

For explanation of the code, see par. 2A.3 and table 2A-1.

Tabla 9D-1(c) y (d) (tabla 2D-1 (c) y (d))

Table 2D-1(e)
 Master Table for Sequential Life Test
 $\alpha = 0.50$

Code	r_0	k_{-k}	k_{-k}	k_k	r_{k+1}	E_{k+1}	F_{k+1}	E_{k+1}
E-1	1	0 6930	-0 2531	9 3170	0 5	0 7	0 7	0 8
E-2	6	1 2241	-4 470	8386	7	1 4	1 3	1 1
E-3	9	1 6224	-3 9228	6947	9	1 0	2 0	1 7
E-4	12	1 9671	-3 184	7307	10	2 8	2 6	2 3
E-5	15	2 2594	-2 8232	7551	11	3 0	3 3	2 9
E-6	18	2 5279	-2 322	7738	12	3 6	3 9	3 5
E-7	21	2 7760	-1 0138	7887	13	4 1	4 5	4 2
E-8	24	3 0134	-1 1013	8013	14	4 6	5 2	4 8
E-9	27	3 2237	-1 1773	8111	15	5 1	5 8	5 4
E-10	30	3 4358	-1 2548	8202	15	5 6	6 4	6 1
E-11	45	4 3294	-1 5812	8503	19	8 2	9 6	9 2
E-12	60	5 0687	-1 8512	8685	21	10 8	12 4	12 2
E-13	75	5 7396	-2 0662	8815	24	13 1	15 5	15 4
E-14	90	6 3581	-2 3221	8914	26	15 8	18 6	18 6
E-15	120	7 3816	-2 6959	9049	30	20 2	24 3	24 8
E-16	150	8 3254	-3 0405	9142	33	25 0	30 3	30 8
E-17	225	10 3123	-3 7863	9292	41	34 7	45 0	46 3
E-18	300	12 0299	-4 3935	9385	47	48 7	60 0	62 1

For explanation of the code, see par. 2A2.3 and table 2A-1.

Table 9D-1(e) (table 2D-1 (e))

APÉNDICE D-1

En la figura 9D-3 (figura 2D-3), una comparación es mostrada en el número esperado de fallas requeridas para una decisión entre una prueba de vida terminada en un tiempo prefijado cuando la prueba es con reemplazo en la sección C y para los planes de la sección D. Ambos planes tienen CCO que pasan a través de los puntos ($\theta_0 = 1,500$; $1-\alpha = 0.95$) y ($\theta_1 = 300$, $\beta = 0.10$).

En la figura D-4, una comparación es mostrada en los tiempos de espera supuestos requeridos para una decisión entre una prueba de vida terminada en tiempo prefijado cuando la muestra es con reemplazo y reemplazo secuencial. Ambos planes tienen el mismo tamaño de la muestra $n = 20$ y tienen unas CCO que pasan a través de los puntos ($\theta_0 = 1,500$; $1-\alpha = 0.95$) y ($\theta_1 = 300$, $\beta = 0.10$).

Las comparaciones de arriba son típicas de ahorro de tiempo y el número de fallas requerido para una decisión.

FIG. 2D-3

COMPARISON OF EXPECTED NUMBER OF FAILURES REQUIRED FOR DECISION FOR SEQUENTIAL AND LIFE TEST TERMINATED AT PRE-ASSIGNED TIME, SAMPLING WITH REPLACEMENT PLANS

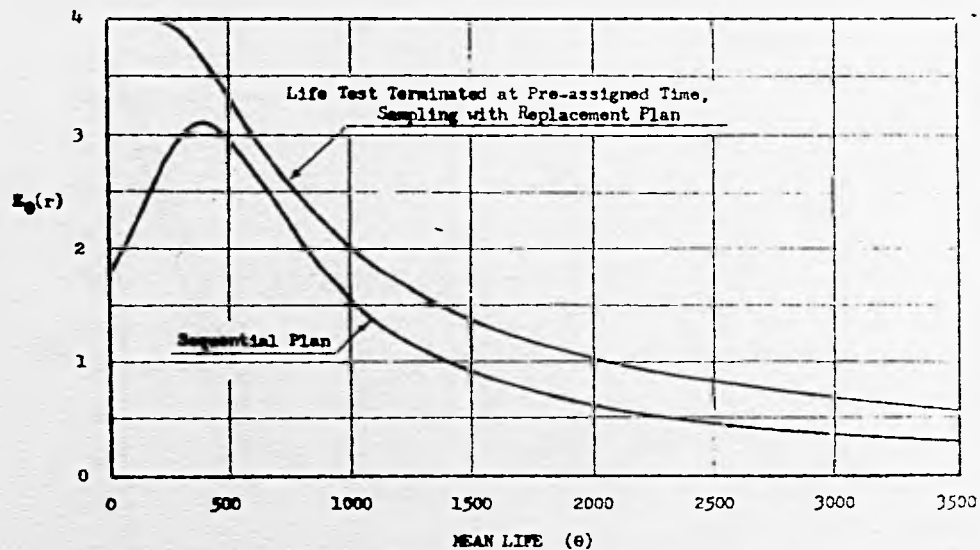
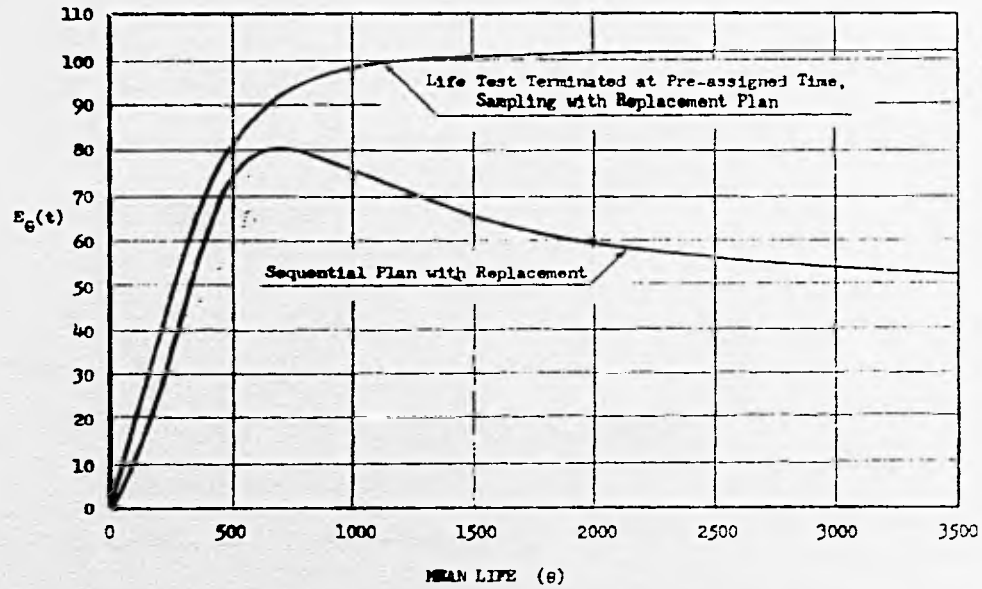


Figure 9D-3 (figure 2D-3)

The OC curve for each plan is such that $\theta_0 = 1500$, $\theta_1 = 300$, $\alpha = 0.05$, and $\beta = 0.10$.

COMPARISON OF EXPECTED WAITING TIME REQUIRED FOR DECISION FOR SEQUENTIAL AND LIFE TEST TERMINATED AT PRE-ASSIGNED TIME, SAMPLING WITH REPLACEMENT PLANS



The OC curve for each plan is such that $\theta_0 = 1500$, $\theta_1 = 300$, $\alpha = 0.05$, and $\beta = 0.10$.

Figura 9D-4 (figura 2D-4)

**X. DISPONIBILIDAD Y
MANTENIBILIDAD.**

La combinación de una alta **confiabilidad** y una alta **mantenibilidad**, da como resultado un sistema de alta **disponibilidad**. La **disponibilidad** es definida como la probabilidad de que un sistema funcione correctamente en un tiempo t , sin importar su pasado histórico de falla y de reparación. La disponibilidad de un sistema depende de que tan frecuentemente tiene fallas (fiabilidad) y de cuánto tiempo es necesario para corregir o reparar esas fallas (mantenibilidad). El tiempo total en estado operativo es la suma del tiempo empleado en uso activo y estado de reserva. El tiempo total en estado no operativo (a veces llamado tiempo de avería) es la suma del tiempo empleado en reparación activa, y en la espera de piezas para cambio, el papeleo, etc. (figura 10.1)

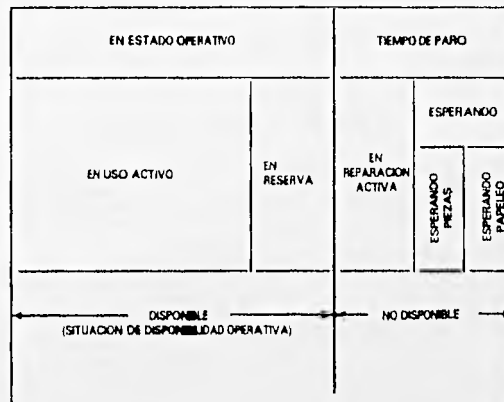


Figura 10.1 Componentes de la disponibilidad

La disponibilidad se expresa como

$$\frac{\text{Tiempo operativo}}{\text{Tiempo operativo} + \text{tiempo no operativo}}$$

Los elementos en un programa de mantenibilidad se componen de tres partes

1. Programa de supervisión y control. Esta etapa consiste en la definición de todas las tareas a realizar en el programa y revisarlas cuando sean ejecutadas.
2. Diseño y análisis. Durante el diseño del producto, se establecen los objetivos, se hacen los análisis y las predicciones de mantenibilidad.
3. Evaluación y ensayo. Aquí, el elemento clave es demostrar que los objetivos de la mantenibilidad han sido alcanzados.

La norma MIL-STD-470A proporciona las tareas de mantenibilidad para un programa de desarrollo de productos, algunas de estas son:

Planificación del programa de mantenibilidad

Dirección y control de subcontratistas y proveedores

Revisión de los programas

Recolección de datos, análisis y sistema de acciones correctivas

Análisis, modelado, asignación y predicción de la mantenibilidad

Análisis de las fallas y su efecto, información de mantenibilidad

Criterios de diseño de la mantenibilidad

Preparación de los datos para un plan detallado de mantenimiento y análisis de apoyo logístico

Demostración de la mantenibilidad

Por otra parte la norma MIL-STD-721C da una lista de 11 índices, los más importantes se describen en la tabla 10.1

Tabla 10.1 Índices de mantenibilidad

Índice	Significado
Tiempo medio de reparación	Tiempo medio necesario para corregir una falla.
Tiempo medio de servicio	Tiempo medio para mantener un producto en condiciones operativas.
Tiempo medio de mantenimiento preventivo	Tiempo medio necesario para realizar el mantenimiento preventivo.
Porcentaje de horas de reparación sobre horas operativas	Cantidad de horas necesarias para la reparación por cada 100 horas operativas de producto.
Probabilidad de tiempo de paro	Probabilidad de que un producto que falle sea reintegrado a sus condiciones operativas en un tiempo especificado de paro.
Tasa de costos de mantenimiento	Costo del mantenimiento preventivo y correctivo por unidad de tiempo operativo.

CONCLUSIONES.

CONCLUSIONES

Lo expuesto anteriormente es sólo un panorama general de lo que es la fiabilidad o confiabilidad. Ésta tesis debió haber incluido los temas que se tratan más adelante, pero por falta de tiempo y espacio sólo se mencionarán, ya que se requiere de más información que no tuve disponible.

- La fiabilidad en equipo electrónico, usando como referencia la norma MIL-HDBK-338 Vol. I y II.

- La aceleración de pruebas de vida en componentes o equipos con el fin de pronosticar la vida útil en solo unas semanas de prueba.

- La fiabilidad en el software, teniendo como apoyo la norma MIL-S-52799.

- La mantenibilidad usando las normas: MIL-STD-471 (verificación, demostración y evaluación de la mantenibilidad), MIL-STD-470 (programa de requerimientos de mantenibilidad para sistemas y equipos), MIL-STD-472 (predicción de la mantenibilidad).

- Fiabilidad y diseño en aplicaciones térmicas con el uso de la norma MIL-HDBK-251.

- El desarrollo de un programa por computadora que calcule las fórmulas de fiabilidad y que procese la MIL-H108

El uso de la fiabilidad en las compañías mexicanas es muy pobre o casi nulo y solamente las transnacionales lo usan en sus países de origen y como ejemplo de ello están: Kodak, Xerox, Motorola, Samsung, 3com, etc..

Se requiere una gran inversión para tener todos los instrumentos para medir la fiabilidad, así como personal muy capacitado, pero a la larga esto beneficiará a las compañías que lo implementen, primero por que no tendrán que gastar grandes cantidades de dinero en la reparación de equipo por garantía, segundo se tendrá un equipo más duradero y fiable y por último una mayor penetración en el mercado.

GLOSARIO DE TÉRMINOS.

AGREE (Advisory Group on Reliability of Electronic Equipment): Es un grupo consultivo de equipo electrónico que está bajo la dependencia de la Secretaría de Defensa de los E.U. y en 1957 definió la fiabilidad.

Calidad: Conjunto de características de un producto que satisfacen las necesidades de los clientes y, en consecuencia, hacen satisfactorio el producto.

Control de Calidad: Herramientas para medir y verificar la Calidad.

CFR (Constant failure rate): La Razón de Falla Constante es una de las leyes más importantes en el trabajo de la fiabilidad. También es conocida como exponencial negativa o algunas veces simplemente como exponencial.

DOD (Department of Defense): Departamento de Defensa de los E.U. y distribuye más de 50,000 documentos:

- Military Specifications and Standards.
- Federal Specifications and Standards.
- Military Handbooks.
- Qualified Products Lists (QPLs).
- Data Item Descriptions (DIDs).
- Commercial Item Descriptions (CIDs).
- Air Force-Navy Aeronautical Standards.
- Air Force-Navy Aeronautical Design Standards.
- Air Force Specifications Bulletins.
- Other Departmental Documents.
- DoD Adopted Non-Government/Industry Documents
(issued to DoD only)

Fiabilidad o Confiabilidad $R(t)$: Es la probabilidad de que un sistema no falle antes del tiempo t especificado, es decir, que opere correctamente en un intervalo de tiempo (t_0, t) dado que se inició correctamente en el tiempo t_0 .

Función de Densidad de Falla $f(t)$: Determina el número de fallas ocurridas en un período de tiempo $(t, t+\Delta t)$ de la población original (N_0) puestos a prueba.

Función de Distribución Acumulativa (CDF): Es la probabilidad de que la unidad "funcione" para la mayor parte del tiempo t .

Función de Inestabilidad $F(t)$: Es lo contrario a $R(t)$, determina la probabilidad de que un sistema no funcione más allá del tiempo t especificado, es decir, que falle antes del tiempo especificado.

Función de Riesgo o Función de Razón de falla $h(t)$: Determina la probabilidad de que un componente falle en un periodo de tiempo $(t, t+\Delta t)$ dado que este todavía opera en el tiempo t , es decir, es la probabilidad de que opere más allá del tiempo especificado.

Longitud de Onda (λ): Es la distancia recorrida por la onda durante un periodo T . Siendo v la velocidad de propagación de la onda y f su frecuencia, $\lambda = vT$ o bien $\lambda = v/f$.

MIL-STD (Military Specifications and Standards): Son una serie de manuales y libros publicadas por la DOD que contienen una gran cantidad de información técnica.

Sistema: Es una combinación de componentes que actúan conjuntamente y cumplen un determinado objetivo. Un sistema es un ente formado por un conjunto de entradas, uno de salida y una relación bien definida entre las señales de salida y las de entrada.

BIBLIOGRAFÍA.

- LLOYD, Doris Grosh.** A Premier of Reliability Theory. John Wiley & Sons, Inc., 1989.
- BYERS, T. J.** " Environmental Semiconductor Testing", Electronics NOW, Noviembre 1994.
- JURAN, J. M.** Manual de Control de Calidad, Vol. I y II. McGraw-Hill, 4ta ed. 1993.
- SOTSKOV, B.** Fundamentos de la Teoría y el Cálculo de la Fiabilidad de Elementos y Dispositivos de Automatización y Técnica de Cálculo. Mir-Moscú, 1972.
- DUMMER, G. W. A. y N. Griffin.** Electronic Equipment Reliability. John Wiley & Sons, Inc., 1960.
- United States Department of Defense (1988).** MIL-HDBK-338/I (Military Handbook, Electronic Reliability Design Handbook).
- United States Department of Defense (1960).** Sampling Procedures and Tables for Life and Reliability Testing (Based on Exponential Distribution), Quality Control and Reliability Handbook (Interim) H-108, Office of the Assistant Secretary of Defense (Supply and Logistics), Washington, D.C..
- United States Department of Defense (1981).** MIL-HDBK-189, (Military Handbook, Reliability Growth Management).
- United States Department of Defense (1986).** MIL-STD-781D (Military Standard, Reliability Testing for Engineering Development, Qualification and Production).
- MILLER, Irwin R., John E. Freund, Richard Johnson.** Probabilidad y Estadística para Ingenieros. Prentice-Hall, 4ta ed. 1992.
- BLAKE, Ian F.** Introduction to Applied Probability, John Wiley & Sons, Inc., 1979.
- KECECIOGLU, Dimitri.** Reliability and Life Testing Handbook, Vol. I. Prentice-Hall, 1993.