

C. N. E. A. Biblioteca	
ARCHIVO PUBLICACIONES	
NO 2	AÑO 1974

CNA/18 1

00.7404

COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA
DEPENDIENTE DE LA PRESIDENCIA DE LA NACION

CENTRAL NUCLEAR EN ATUCHA

"CONCEPTOS BASICOS PARA LA EVALUACION
DE LA CONFIABILIDAD DE SISTEMAS"

Ing. Abel Julio González

Buenos Aires, Argentina

-1974-

1 INTRODUCCION

En general, se define como confiabilidad a la capacidad de un ítem o componente para llevar a cabo una dada función requerida bajo determinadas condiciones operativas y durante un periodo de tiempo prefijado. Desde el punto de vista cuantitativo, la confiabilidad es una característica del ítem o componente expresada por la probabilidad de que ese ítem lleve a cabo la función requerida bajo determinadas condiciones operativas y durante un periodo de tiempo. Los términos ítem o componente se utilizan para indicar cualquier parte, subsistema o equipo que puede ser considerado, analizado y probado individualmente.

Este trabajo presenta los elementos teórico-prácticos básicos de la confiabilidad agrupados de manera tal que siguen los conceptos expuestos en la definición del término "confiabilidad". En primer lugar se analiza la capacidad en términos de probabilidad; luego se discuten las confiabilidades de ítems o componentes complejos en función de la confiabilidad de sus componentes individuales; a continuación se analizan los tipos de fallas que podrían anular la intención de llevar a cabo la función requerida; después se presenta la variación de la confiabilidad con las distintas condiciones operativas; y finalmente, se analiza la dependencia de la confiabilidad con el tiempo y se discuten las "formas de vida" más habituales.

2 ALGUNOS CONCEPTOS SOBRE PROBABILIDAD, ESTADISTICA Y CONFIABILIDAD

2.1. Introducción

Generalmente, la confiabilidad se expresa por un valor de probabilidad; sin embargo, para analizar la confiabilidad es imprescindible aplicar no solo la teoría de las probabilidades sino también la teoría estadística, la primera para evaluar la confiabilidad y la segunda para predecir la misma.

La diferencia conceptual entre probabilidad y estadística ayudará a entender la distinción entre los problemas de evaluación y predicción que se presentan en la teoría de la confiabilidad. Podría describirse sucintamente a la teoría de las probabilidades como el estudio de la solución del siguiente problema: dado un conjunto de posibles resultados de una "prueba", se deberá evaluar la frecuencia de ciertos resultados en un gran número de pruebas. En cambio, la teoría estadística deduce de una serie de datos cuál debe ser la frecuencia con que se darán ciertos resultados, es decir, trata el problema de determinar la distribución de los números, dados los datos.

Tanto la teoría de la probabilidad como la de la estadística contribuyen en formas diferentes, pero significativas, en campos de la ingeniería de sistemas. La primera ayuda al ingeniero a "predecir" el comportamiento del equipo o sistema que ha desarrollado; la teoría de la estadística, en cambio, lo ayuda a la interpretación de los datos de funcionamiento del equipo, este problema es extremadamente importante, pues es claro que una teoría sirve o falla de acuerdo a la naturaleza de la evidencia experimental, es decir, la naturaleza de los datos.

Los problemas tratados en la teoría de la confiabilidad pueden ser categorizados por las mismas distinciones aplicables a la probabilidad y a la estadística. Un tipo de problema trata de la predicción de la confiabilidad de un sistema, basándose en un modelo matemático del equipo y haciendo uso de técnicas probabilísticas. Otro tipo de problema involucra el estudio de la verificación de estas predicciones basándose en datos experimentales, o simplemente, tratando de determinar estas frecuencias a través de un análisis de los datos. Este último estudio hace uso, principalmente, de técnicas de la estadística.

2.2. La probabilidad aplicada a la confiabilidad

La probabilidad es un concepto de inseguridad, tan amplio que para relacionarlo adecuadamente con la confiabilidad es necesario distinguir entre dos tipos principales de inseguridad. Una tiene la característica de que puede determinarse decididamente con sólo esperar un dado período de tiempo y la otra no puede ser nunca determinada decididamente, puesto que una vez que se hace una prueba y se obtiene el resultado, el resultado de una próxima prueba es aún debatible. En síntesis, la diferencia entre los dos hechos es que el primero no puede ser repetido mientras que el segundo sí puede serlo. Para entender la importancia de esta diferencia se debe determinar lo que se entendía cuando se decía "hay dos tercios de probabilidades de que la luna tenga otra superficie que la que surge de los estudios". Esta frase no quería decir que en una larga serie de viajes a la luna, aproximadamente dos tercios de las veces la luna tuvo distintas superficies. Fue necesario viajar a la luna sólo una vez para determinar este hecho; una vez determinado, la inseguridad desapareció. Como otro ejemplo, se puede considerar un hecho que tiene un cincuenta por ciento de probabilidades de suceder. En el caso de arrojar una moneda esta frase significa que en un gran número de veces el hecho "cara" debe darse en "aproximadamente" la mitad de veces. Si la probabilidad de cara fuera de setenta y cinco por ciento, se interpretaría por esta frase que cara es más frecuente que cruz, puesto que si consideramos un gran número de pruebas, cara debería

darse en aproximadamente tres cuartos de las veces. En consecuencia, la interpretación de la "frecuencia" en las inseguridades del primer tipo carece de sentido.

Se debe suponer entonces que el número llamado "probabilidad de un hecho" que se aplica en la teoría de la confiabilidad representa la frecuencia de ocurrencia de un hecho en una larga serie de pruebas. Generalmente, suele ser definido como la relación entre el número de veces que un dado evento puede ocurrir y el número total de eventos posibles. El concepto de la probabilidad puede ser ilustrado por medio de una escala, representada en la figura 1. El tope de la escala representa las certezas absolutas ($p=1$) y la base representa la absoluta imposibilidad ($p=0$); cualquier otra posibilidad está localizada entre ambos extremos.

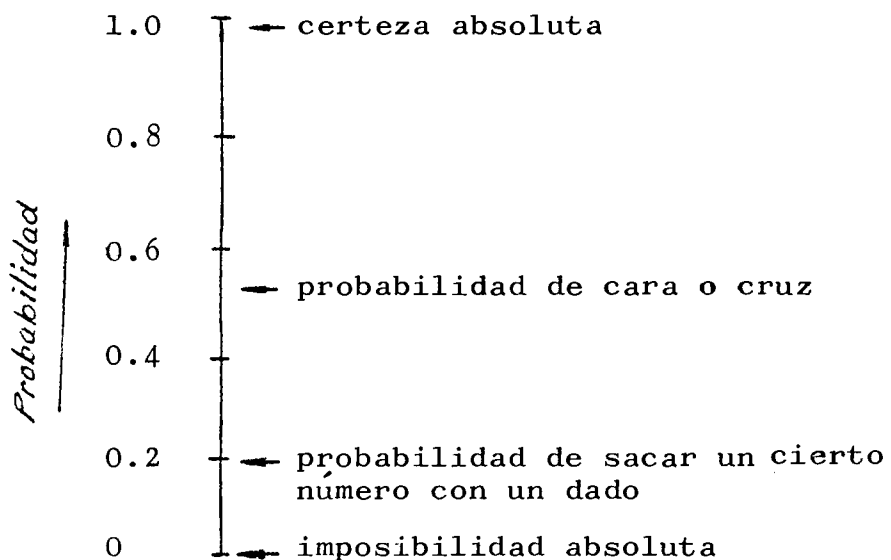


Figura 1

De acuerdo a la definición empleada para el concepto "confiabilidad", los valores de confiabilidad se refieren a la probabilidad de que un item opere bien. Sin embargo, para la medición de la confiabilidad, se utilizan habitualmente las mediciones de la no operación. Los terminos usados con más frecuencia son los siguientes:

- a) La tasa de fallas (λ): Se denomina así a la relación entre el numero total de fallas en una dada población de items en un determinado intervalo de tiempo y el tiempo total de observación. La tasa de fallas está siempre asociada a un dado intervalo de tiempo (o suma de intervalos) y a determinadas condiciones de exigencia.
- b) El tiempo medio entre fallas (MTBF): Se denomina así al valor medio de la longitud de los intervalos o tiempos de

observación entre fallas consecutivas cuando un ítem de una población constante se encuentra bajo determinadas condiciones de exigencias. La medición se efectúa para un periodo determinado en la vida del ítem.

Las relaciones entre confiabilidad, tasa de fallas y tiempo medio entre fallas depende entre otras cosas de la distribución de frecuencias de las fallas en función del tiempo. Se suele denominar función de vida $v(t)$ de un componente a aquella que representa la fracción de componentes de una dada población que sobreviven al tiempo t . La falla por unidad de tiempo de un componente, es decir la fracción que falla en cada instante de tiempo, queda definida por la siguiente expresión:

$$f(t) = - \frac{dv(t)}{dt} \quad (I)$$

$f(t)$ también suele denominarse función de distribución para ese componente.

La probabilidad de fallas de un componente por unidad de tiempo es la relación entre la falla por unidad de tiempo y la función de vida y es lo que se ha definido como tasa de fallas.

$$\lambda(t) = \frac{- \frac{dv(t)}{dt}}{v(t)} = - \frac{dv(t)}{v(t)} / dt \quad (II)$$

Puede encontrarse la expresión de $v(t)$ en función de $\lambda(t)$ integrando la (II), resulta ser

$$v(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} \quad (III)$$

donde t es el tiempo de vida.

La vida promedio del componente (m) es por definición la suma de todos los valores posibles de su función de vida por su probabilidad, es decir que

$$m = \int_0^{\infty} t \cdot v(t) \cdot \lambda(t) \cdot dt \quad (IV)$$

y es lo que se ha denominado tiempo medio entre fallas. (MTBF).

La confiabilidad $R(t)$ es, de acuerdo a la definición vista, equivalente al valor de la función de vida en el instante t . La confiabilidad $R(t)$ en el intervalo de tiempo $0-t$ está ligada a la función de distribución $f(t)$, que expresa la variación temporal de número de fallas, por la relación:

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(t) dt \quad (V)$$

en la cual $f(t)$ satisface la condición de normalización

$$\int_0^{\infty} f(t) dt = 1 \quad (VI)$$

Finalmente, la tasa de fallas en un instante t de la vida del elemento está dada por la relación siguiente:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (VII)$$

y el tiempo medio entre fallas puede expresarse por la siguiente integral

$$MTBF = m = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) \cdot dt \quad (VIII)$$

Se debe destacar por otra parte que, si bien es cierto que la teoría de las probabilidades proporciona los elementos básicos necesarios para el estudio de la confiabilidad, no por ello la teoría de la confiabilidad es una rama especial de la teoría de las probabilidades. La definición de confiabilidad implica que la confiabilidad es una función de una cierta probabilidad: la probabilidad de que un sistema opere adecuadamente durante un tiempo dado. Por lo tanto la definición sugiere que hay solamente dos estados posibles para cualquier equipo en funcionamiento: el funcionamiento adecuado y el no adecuado. Sin embargo, en general pueden presentarse todos los grados de funcionamiento y todos ellos pueden ser adecuados. En muchas aplicaciones es sin embargo importante distinguir entre estos grados de funcionamiento y calcular sus respectivas probabilidades. En efecto, una parte de la teoría de la confiabilidad estudia la transición de un estado de funcionamiento a otro.

2.3. La estadística aplicada a la confiabilidad. El nivel de confianza de los valores de la confiabilidad.

La manera más simple de obtener valores de confiabilidad

es determinar la tasa de fallas en forma directa como la relación entre el número de fallas sobre un gran número de componentes-hora. Sin embargo, en la práctica los valores de confiabilidad se determinan mediante evaluaciones efectuadas sobre solo una pequeña parte de la población entera. Este hecho, puede ser causa de que los valores de confiabilidad así determinados difieran considerablemente de los valores reales. Por este motivo los valores de confiabilidad suelen ser dados con un dado nivel de confianza expresado en porcentos; ese porcentaje denota el grado de certeza con que el valor de confiabilidad real es mejor al valor de confiabilidad dado.

El empleo de altos niveles de confianza pueden significar altos costos para la determinación de los valores de confiabilidad. En los exámenes de duración de vida se hace funcionar simultáneamente una cantidad determinada N , de elementos de un dado lote de fabricación y se mantiene durante un tiempo t las condiciones de funcionamiento. Si la cantidad de deficiencias observadas es n , la tasa de fallas podría definirse como:

$$\lambda = \frac{n/N}{t/t} \quad \lambda = \frac{n}{Nt} \quad (\text{IX})$$

Sin embargo, como se dijo antes, el valor de λ depende de la casualidad; por eso el valor de λ determinado experimentalmente es de naturaleza estadística. La verdadera tasa de fallas puede ser tanto inferior como superior que lo determinado en el experimento. Presuponiendo una seguridad estadística determinada de por ejemplo 3% de seguridad la tasa de fallas real del lote fabricado no será superior a λ_0 , donde $\lambda_0 > \lambda$. La tasa de fallas λ determinada experimentalmente, reproduce con tanta mayor exactitud el grado de deficiencia real, cuanto menos se aparta de la relación λ_0/λ . Esta relación depende de la seguridad estadística S de la cantidad n de las fallas observadas. En la Tabla 1 se presenta la relación λ_0/λ para las seguridades estadísticas $S=95\%$ y $S=80\%$ y para diferentes cantidades de fallas. Los valores han sido calculados mediante la distribución del χ^2 . Se evidencia en la Tabla 1 como aumenta el gasto experimental cuando se trata de determinar tasas de fallas muy bajas con exactitud conveniente. El gasto experimental puede ser caracterizado por el producto $N t$. Con la ecuación (IX) se deduce:

$$N t = n/\lambda \quad (\text{X})$$

Por ejemplo si se supone una tasa de fallas de $\lambda \approx 10^{-6} \text{ h}^{-1}$ y un examen de duración de vida tal que $\lambda_0/\lambda \leq 2$. Según la Tabla 1 se debería lograr que $n=3$ piezas falladas, en el caso de conformarse con una seguridad estadística de 80%. Según (X) se debería hacer $N t=3 \cdot 10^6 \text{ h}$, es decir, se debería incluir en el examen de duración de vida 3000 elementos de construcción

durante 1000 h. Si se supone una tasa de fallas de $10^{-8}/h$ valor que no es exagerado para muchos elementos, resulta bajo las condiciones restantes iguales, $N t = 3 \cdot 10^8 h$. (¡Con una duración experimental de $10^4 h$ sería preciso incluir 30.000 elementos!). Tales requerimientos exceden el gasto para los exámenes de rutina; comunmente es preciso conformarse con niveles de confianza inferiores.

TABLA 1

h	λ_0 / λ	
	S=95%	S=80%
1	4.74	3.00
2	3.15	2.14
3	2.58	1.84
4	2.29	1.68
5	2.10	1.58
6	1.97	1.51
8	1.80	1.42
10	1.70	1.37

La Tabla II presenta las tasas de fallas teóricas y las correspondientes a niveles de confianza del 60% y 95% para fallas de 0 a 10 items cuando se dispone de un ensayo de 2.5×10^6 horas-item. (La determinación está basada en una distribución de Poisson).

TABLA II

Nº de fallas reales	Tasa de fallas teórica	Tasa de fallas con un nivel de confianza del 60%	Tasa de fallas con un nivel de confianza del 95%
0	$0 \times 10^{-6}/h$	$0.4 \times 10^{-6}/h$	$1.2 \times 10^{-6}/h$
1	$0.4 \times 10^{-6}/h$	$0.8 \times 10^{-6}/h$	$1.9 \times 10^{-6}/h$
2	$0.8 \times 10^{-6}/h$	$1.2 \times 10^{-6}/h$	$2.5 \times 10^{-6}/h$
3	$1.2 \times 10^{-6}/h$	$1.7 \times 10^{-6}/h$	$3.1 \times 10^{-6}/h$
5	$2.0 \times 10^{-6}/h$	$2.5 \times 10^{-6}/h$	$4.2 \times 10^{-6}/h$
10	$4.0 \times 10^{-6}/h$	$4.6 \times 10^{-6}/h$	$6.8 \times 10^{-6}/h$

3 CONFIABILIDAD DE COMPONENTES Y SISTEMAS

3.1. Introducción

El análisis primario de la confiabilidad suele limitarse a la determinación de la confiabilidad de los componentes. Se entiende por "componente" cualquier dispositivo cuya confiabilidad se estudia sin considerar las partes que lo componen. Por ejemplo, una resistencia cuya confiabilidad se determina sin estudiar las partes que la componen; o un dispositivo extremadamente complicado, como una computadora digital, del cual se estudia su confiabilidad como entidad, es decir, sin estudiar la confiabilidad de sus partes componentes y/o de su soporte de programación. Es claro que la determinación de la confiabilidad de componentes es solo importante para el estudio de un equipo cuya confiabilidad depende de sus componentes.

Los conjuntos de diversos componentes que efectúan una función determinada se denominan "sistemas". El estudio de la confiabilidad de sistemas es más compleja que la mera integración de técnicas y conocimientos desarrollados en el estudio de la confiabilidad de componentes. La confiabilidad de un sistema depende, en gran parte, de la confiabilidad de sus componentes, pero depende también en forma considerable de la lógica de diseño de los procedimientos de mantenimiento, y de una serie de otros factores.

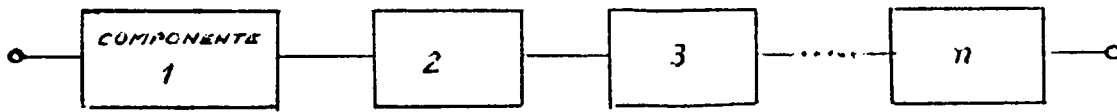
Muchos problemas de logística, mantenimiento, organización de gestión y control de inventario, forman parte de problemas de confiabilidad de componentes y principalmente de sistemas. Estos problemas constituyen el tipo "no estadístico" de problemas relacionados con estudios de confiabilidad, mientras que el tipo "estadístico" de problemas es aquél relacionado con el control de la calidad y de la producción debido a que la confiabilidad de un sistema o de componentes depende de la "confiabilidad" de las instalaciones de producción. Una buena organización y un buen control de producción pueden a menudo asegurar la confiabilidad de un producto.

De acuerdo a lo visto en el capítulo anterior, la confiabilidad (R) de un componente puede ser expresado con la siguiente relación

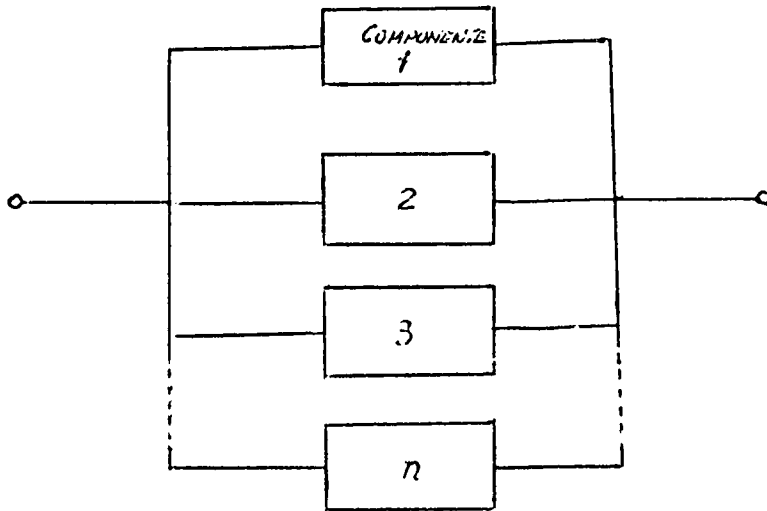
$$R = e^{-\int_0^{\tilde{t}} \lambda(t) dt} \quad (XI)$$

donde $\tilde{t}$ es el tiempo de operación y λ es la tasa de fallas. A partir de esta expresión pueden encontrarse las relaciones entre la confiabilidad y la tasa de fallas para sistemas complejos.

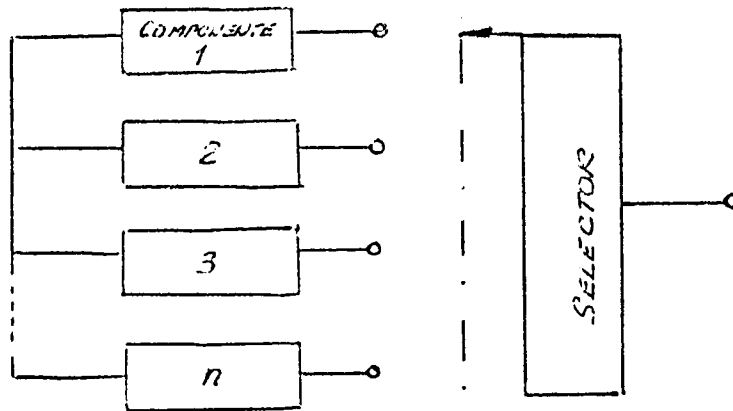
Existen infinidad de formas de agrupar componentes para formar sistemas. Sin embargo, pueden destacarse cuatro formas básicas de agrupamiento funcional entre todas las posibles; ellas son las siguientes: la configuración "serie", la configuración "paralelo simple", la configuración "paralelo con reserva" y las configuraciones de "lógica mayoritaria". Algunas de estas configuraciones (como por ejemplo la serie) son inevitables en los sistemas y equipos, en cambio otras (como las de lógica mayoritaria) son especialmente diseñadas para obtener altos valores de confiabilidad y disponibilidad. La figura presenta los diagramas en bloques de las configuraciones mencionadas.



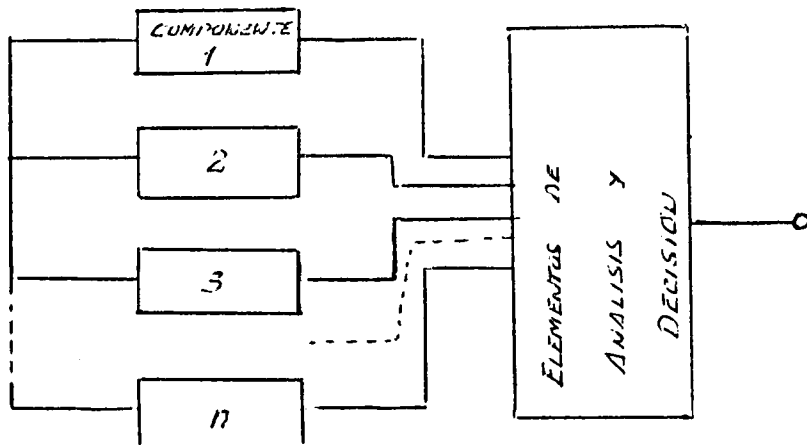
CONFIGURACION SERIE



CONFIGURACION PARALELO SIMPLE



CONFIGURACION PARALELO EN RESERVA



CONFIGURACION DE LOGICA MAYORITARIA

Figura 2

3.2. Configuración serie

Los sistemas con configuraciones serie están constituidos por varios componentes conectados en serie, de manera tal que si falla uno de los items fallará el equipo, la confiabilidad del equipo (R_T) puede ser expresado en función de la confiabilidad (R_n) de los items componentes por la siguiente relación

$$R_T = R_1 \times R_2 \times R_3 \times \dots \times R_n = \prod_i R_i \quad (\text{XII})$$

Reemplazando la ecuación (XI) en la (XII) se obtiene

$$e^{-\int_0^T \lambda_T dt} = e^{-\int_0^T \lambda_1 dt} \times e^{-\int_0^T \lambda_2 dt} \dots \dots e^{-\int_0^T \lambda_n dt} \quad (\text{XIII})$$

En consecuencia

$$\int_0^T \lambda_T dt = \int_0^T \lambda_1 dt + \int_0^T \lambda_2 dt \dots \dots + \int_0^T \lambda_n dt \quad (\text{XIV})$$

$$\therefore \int_0^T \lambda_T dt = \sum_{i=1}^n \int_0^T \lambda_i dt \quad (\text{XV})$$

Luego,

$$\lambda_T(t) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(t) \quad (\text{XVI})$$

Si la tasa de fallas es constante en función del tiempo es decir que la distribución de frecuencia de fallas es una exponencial negativa, la (XVI) puede escribirse de la siguiente forma

$$\lambda_T = \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (\text{XVII})$$

que es la característica de los equipos de conexión "serie".

La figura N° 3 permite evaluar la tasa de fallas de un equipo serie de items de igual tasa de fallas en función de la tasa de fallas del componente y para diversos números de componentes.

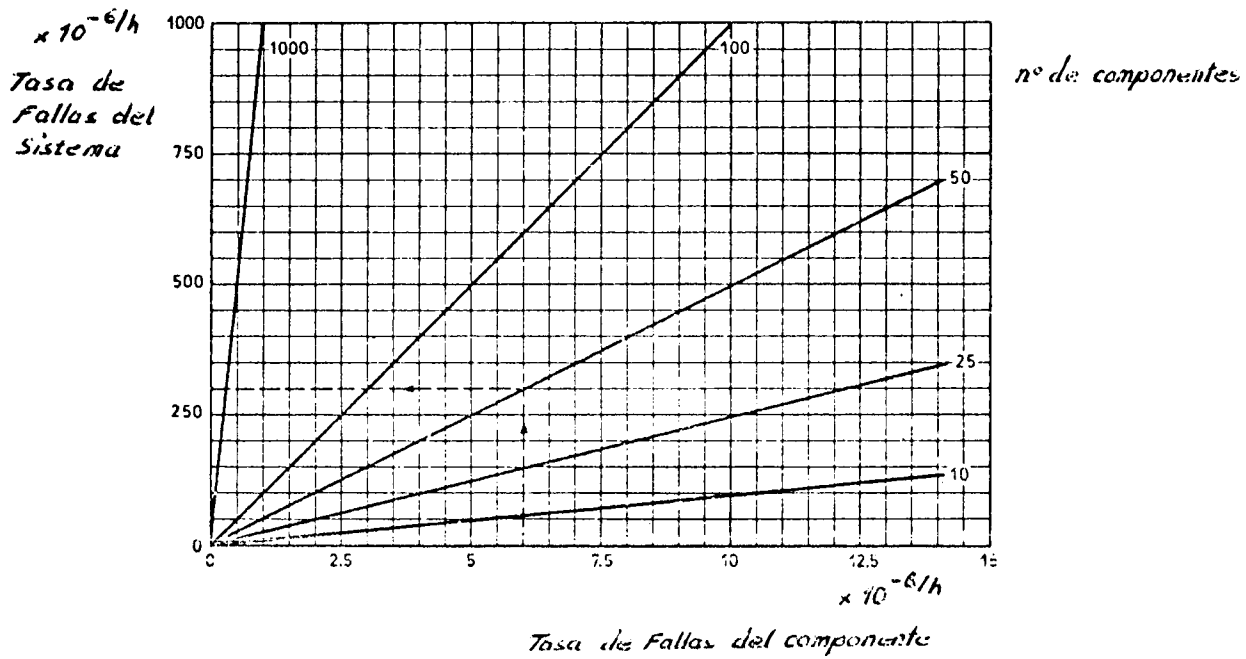


Figura 3

La Fig. N° 4 presenta la relación entre la confiabilidad de un sistema serie y la confiabilidad de los componentes individuales llevando como parámetro el número de componentes.

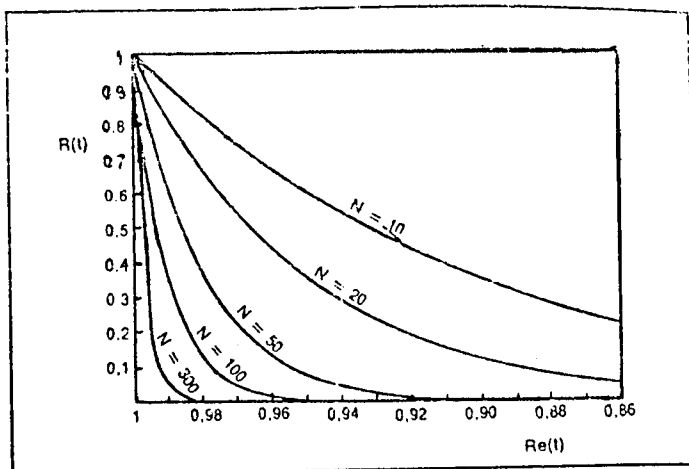


Figura 4

3.3. Configuración paralelo simple

Los sistemas con configuración paralelo simple están constituidos por varios componentes conectados en paralelo. Si se denomina Q a la no confiabilidad

$$Q = 1 - R \quad (\text{XVIII})$$

Puede escribirse que

$$Q_T = Q_1 \cdot Q_2 \cdot \dots \cdot Q_n$$

$$\therefore Q_T = \prod_{i=1}^n Q_i \quad (\text{XIX})$$

ecuación que expresada en términos de confiabilidad resulte ser

$$R_T = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i) \quad (\text{XX})$$

La figura 5 permite evaluar la confiabilidad de un equipo de N elementos en paralelo, cada uno de ellos con la misma confiabilidad individual. Para este sistema el valor R_T es igual a

$$R_T = 1 - (1 - R_i)^n \quad (\text{XXI})$$

Si la tasa de fallas es constante en el tiempo

$$R_T = 1 - (1 - e^{-\lambda t})^n \quad (\text{XXII})$$

y si λt es muy pequeño

$$R_T \cong 1 - \lambda t^n \quad (\text{XXIII})$$

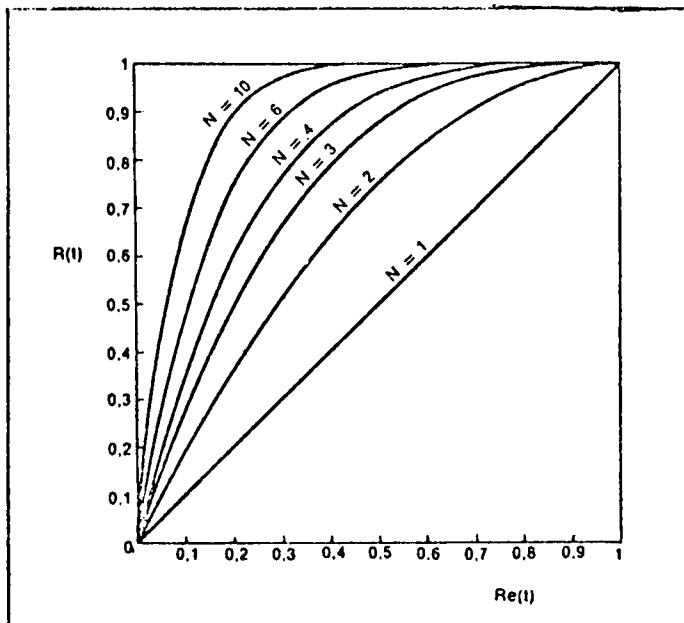


Figura 5

3.4. Configuración paralelo con reserva

Una configuración muy utilizada para mejorar los niveles de confiabilidad es la denominada configuración paralelo con reserva. En esta configuración, los elementos puestos en paralelo funcionan en tiempos sucesivos a medida que su acción es necesaria. Un dispositivo de conmutación y de relevamiento de fallas sustituye el elemento fallado con uno de reserva.

La ventaja principal de este tipo de configuración consiste en la posibilidad de reparar el elemento fallado sin interrumpir el funcionamiento del sistema. Sin embargo, la necesidad de un elemento de conmutación, lleva a la conclusión que esta solución es solo conveniente cuando la confiabilidad del elemento de conmutación es muy alta con respecto de la de los items del sistema.

Si se supone que cada componente j tiene una función de vida $v_j(t)$, cuando falla el componente $j=1$ y entre automáticamente en operación el componente $j=2$, la función de vida resultante $v_{1=2}(t)$ será función de las funciones de vida de cada componente.

La probabilidad de que el componente $j=1$ falle entre t y $t+dt$ es

$$v(t) \cdot \lambda(t) \cdot dt \quad (\text{XXIV})$$

y la probabilidad de que el componente $j=2$ (que ha reemplazado automáticamente al componente $j=1$) viva hasta el tiempo $t=T$ es

$$v(T-t) \quad (\text{XXV})$$

Luego, la probabilidad de que ocurran ambos eventos es

$$v(t) \cdot \lambda(t) \cdot dt \cdot v(T-t) \quad (\text{XXVI})$$

Es decir que, integrando para todos los valores posibles de t , se obtiene

$$v_{1-2}(t) = \int_0^T v(t) \cdot \lambda(t) \cdot dt \cdot v(T-t) \quad (\text{XXVII})$$

Si la tasa de falla de los componentes individuales es constante, entonces

$$v(t) = e^{-\lambda t} \quad (\text{XXVIII})$$

Luego

$$v_{1-2}(t) = \int_0^T e^{-\lambda \tau} \cdot \lambda \cdot e^{-\lambda(\tau-t)} dt \quad (\text{XXIX})$$

$$v_{1-2}(t) = \lambda \tau e^{-\lambda \tau} \quad (\text{XXX})$$

El mismo razonamiento podría hacerse para el caso en que hubiera disponible un tercer componente. En ese caso

$$v_{2-3}(t) = \int_0^T \lambda \cdot t \cdot e^{-\lambda t} \cdot \lambda \cdot e^{-\lambda(\tau-t)} dt$$

$$\therefore v_{2-3}(t) = \frac{\lambda^2 \tau^2}{2} e^{-\lambda \tau} \quad (\text{XXXI})$$

Es decir que la probabilidad de que el sistema de tres componentes funcione bien, es decir la confiabilidad del mismo es

$$R(t) = v(t) + v_{1-2}(t) + v_{2-3}(t) = e^{-\lambda \tau} + \lambda \tau e^{-\lambda \tau} + \frac{(\lambda \tau)^2}{2} e^{-\lambda \tau}$$

o lo que es lo mismo

$$R(t) = e^{-\lambda \tau} \left(1 + \lambda \tau + \frac{(\lambda \tau)^2}{2!} \right) \quad (\text{XXXII})$$

Extendiendo el concepto para un sistema de N componentes cada uno de los cuales tiene la misma tasa de fallas constante (λ), y suponiendo que la confiabilidad del número (N-1) de componentes que están en reserva se mantiene igual a 1 durante el periodo de reserva, entonces

$$R(t) = e^{-\lambda \tau} \left[\sum_{i=0}^{(N-1)} \frac{(\lambda \tau)^i}{i!} \right] \quad (\text{XXXIII})$$

que es la expresión que representa la confiabilidad de los sistemas en paralelo con reserva.

3.5. Configuración de lógica mayoritaria

Cuando es necesario disponer de elevados valores de confiabilidad junto a una elevada inmunidad a los disturbios, se suelen utilizar configuraciones complejas que suelen ser denominadas de "lógica mayoritaria".

Los sistemas paralelos incrementan el nivel de confiabilidad pero en general aumentan también la posibilidad que una información espúrea determine el mal funcionamiento del sistema disminuyendo su disponibilidad. Debido a ello cuando se requieren sistemas con valores elevados no solo de confiabilidad sino también de disponibilidad se suelen utilizar estos sistemas de lógica mayoritaria.

Uno de los sistemas de lógica mayoritaria más utilizado para aumentar la confiabilidad sin disminuir la disponibilidad es el denominado lógica de X por N. Este tipo de sistema funciona adecuadamente cuando responden correctamente X elementos del total N de que dispone el sistema. Si cada elemento o componente de este tipo de sistema tiene una probabilidad individual de fallas (p) durante un tiempo igual al intervalo entre pruebas (T), entonces

$$p = 1 - e^{-\lambda T} \quad (\text{XXXIV})$$

donde λ = tasa de fallas para cada componente individual. Debido a que los componentes se utilizan de manera que λT sea muy chico, con suficiente exactitud se puede aproximar la ecuación anterior a la siguiente

$$p = \lambda T \quad (\text{XXXV})$$

En esas condiciones, la probabilidad de falla (P) del sistema lógico de X por N es

$$P = 1 - \sum_{i=0}^{i=N-X} \binom{N}{i} p^i (1-p)^{N-i} \quad (\text{XXXVI})$$

El valor de probabilidad calculado con la ecuación anterior es el que está relacionado con la confiabilidad del sistema. La disponibilidad del sistema está relacionada con la probabilidad de falla por señal espúrea en cualquier componente con capacidad como para detener la operación del sistema. Si ese sistema está diseñado sobre la base de una lógica de X por N elementos, cada uno de ellos con una probabilidad individual q de falla por señal espúrea durante un tiempo T igual al intervalo entre pruebas, entonces, haciendo las mismas considera-

ciones que en el caso anterior, la probabilidad de tal tipo de falla en el sistema es

$$Q = \sum_{i=x}^{i=N} \binom{N}{i} q^i (1-q)^{N-i} \quad (\text{XXXVII})$$

Habitualmente p y q tienen valores muy pequeños y N suele ser no muy grande. En esos casos pueden despreciarse los términos de orden superior en el desarrollo de las ecuaciones (36) y (37) obteniéndose, en consecuencia

$$P \approx \frac{N!}{(N-x+1)! (x-1)!} p^{N-x+1} \quad (\text{XXXVIII})$$

$$Q \approx \frac{N!}{x! (N-x)!} q^x \quad (\text{XXXIX})$$

Con estas aproximaciones pueden calcularse los valores de las probabilidades de falla y de falla por señal espúrea para los sistemas con lógicas de N por X habituales. Los valores calculados se presentan en las Tablas III y IV.

TABLA III
PROBABILIDAD DE FALLA DE UN SISTEMA DE N POR X

$N \downarrow X \rightarrow$	1	2	3	4	5	6	7
1	p						
2	p^2	$2p$					
3	p^3	$3p^2$	$3p$				
4	p^4	$4p^3$	$6p^2$	$4p$			
5	p^5	$5p^4$	$10p^3$	$10p^2$	$5p$		
6	p^6	$6p^5$	$15p^4$	$20p^3$	$15p^2$	$6p$	
7	p^7	$7p^6$	$21p^5$	$35p^4$	$35p^3$	$21p^2$	$7p$

TABLA IV

PROBABILIDAD DE FALLA POR SEÑAL ESPUREA DE UN SISTEMA DE
X POR N

$\begin{array}{c} x \\ \swarrow \\ N \downarrow \end{array}$	1	2	3	4	5	6	7
1	q						
2	$2q$	q^2					
3	$3q$	$3q^2$	q^3				
4	$4q$	$6q^2$	$4q^3$	q^4			
5	$5q$	$10q^2$	$10q^3$	$5q^4$	q^5		
6	$6q$	$15q^2$	$20q^3$	$15q^4$	$6q^5$	q^6	
7	$7q$	$21q^2$	$35q^3$	$35q^4$	$21q^5$	$7q^6$	q^7

De las tablas III y IV puede inferirse que los sistemas lógicos de 2×3 ; 3×5 ; 4×7 ; ... ; $ix(2i-1)$ tienen una probabilidad de falla igual a la probabilidad de falla por señal espurea. En consecuencia, es conveniente utilizar uno de estos sistemas cuando p y q sean del mismo orden de magnitud y el objetivo sea mejorar no solo la confiabilidad sino también la disponibilidad. Este criterio es el que se ha empleado hasta el presente para el diseño de las lógicas de los sistemas de protección de muchas instalaciones y en particular en las nucleares. Se debe destacar aquí que si bien muchas instalaciones disponen de sistemas de $(ix2i)$ el extra componente solo tiene el objetivo de que el sistema permanezca con lógica de $ix(2i-1)$ en el momento de su prueba "in situ".

El criterio de utilizar lógicas de $ix(2i-1)$ en los sistemas de protección no tiene una sólida base científica debido a que su fundamentación filosófica presupone que las probabilidades individuales p y q son del mismo orden de magnitud (lo que no

siempre es cierto) y, por otra parte, que el objetivo del diseño es que la seguridad y la disponibilidad sean iguales (lo que tampoco es cierto). Sin embargo, este tipo de sistemas se ha popularizado mucho y a veces resulta ser una práctica onerosa y posiblemente difícil el uso de otros sistemas lógicos.

En consecuencia, se aceptará como un hecho que los sistemas son diseñados con una lógica de $ix(2i-1)$ y puede escribirse que:

$$N = 2x - 1 \quad (XL)$$

$$y \quad x = \frac{N+1}{2} \quad (XLI)$$

luego, las (38) y (39) pueden escribirse de la siguiente forma

$$P = \frac{N!}{\left(\frac{N+1}{2}\right)! \left(\frac{N-1}{2}\right)!} p^{\frac{N+1}{2}} \quad (XLII)$$

$$Q = \frac{N!}{\left(\frac{N+1}{2}\right)! \left(\frac{N-1}{2}\right)!} q^{\frac{N+1}{2}} \quad (XLIII)$$

Si los valores de p y q de los componentes empleados en los sistemas son suficientemente bajos, entonces se puede aceptar que el orden de magnitud de P y Q estará dado por las ecuaciones

$$P \approx p^{\frac{N+1}{2}} \quad (XLIV)$$

$$Q \approx q^{\frac{N+1}{2}} \quad (XLV)$$

que representan con bastante exactitud la confiabilidad y disponibilidad de los sistemas con lógica mayoritaria de $(ix2i-1)$.

4 LA CAPACIDAD DE LLEVAR A CABO LA FUNCION REQUERIDA. TIPO DE FALLAS

La definición de confiabilidad incluye el concepto de que el componente debe llevar a cabo la función requerida para el mismo. En primer lugar, deberá definirse cual es el significado de la expresión "función requerida". En la práctica esta función

está determinada por la no falla del circuito o el equipo en el cual se utiliza el componente y bastaría definir a las fallas para precisar indirectamente a la expresión función requerida. Sin embargo, también resulta prácticamente imposible dar una definición precisa de falla y para evitar que el concepto quede definido en forma ambigua, se suele realizar una clasificación que acompaña a la definición general.

En general se suele decir que un componente falla cuando termina su capacidad de llevar a cabo la función requerida para el mismo. Las fallas pueden ser clasificadas en tres tipos característicos (excluyendo daños causados por descuido en el manipuleo, almacenamiento o mala operación en el uso) que son inherentes en el equipo y suceden sin que el operador incurra en ninguna falta: las fallas tempranas, las de desgaste y las casuales.

Las fallas que se producen al comienzo de la vida activa de un componente. Se denominan fallas tempranas y son en la mayoría de los casos el resultado de mala fabricación y técnicas de control de calidad deficientes en el proceso de manufactura. Algunos componentes defectuosos pueden pasar desapercibidos dentro de una tanda de componentes perfectos durante el proceso de elaboración o de ensamble. Las fallas que inevitablemente se suceden en estos casos ocurren por lo general durante los primeros minutos u horas de operación. Las fallas tempranas pueden ser eliminadas mediante pruebas anteriores al uso por parte del usuario.

Las fallas causadas por desgaste de las partes componentes del equipo ocurren cuando un equipo no ha sido mantenido adecuadamente. Las fallas por desgaste son un síntoma del envejecimiento de los componentes. En la mayoría de los casos estas fallas pueden prevenirse. Por ejemplo, en un equipo operado repetidamente, un método de prevención es el de reemplazar a intervalos regulares aquellas partes accesibles que se saben sujetas a desgaste, haciendo estos intervalos menores que la vida promedio de desgaste de esas partes.

Las fallas casuales son aquellas que no se pueden prever ni con pruebas previas ni con mejoras de mantenimiento. Las fallas casuales ocurren en intervalos cualesquiera, irregulares e inesperados, no pudiéndose predecirlas a priori, sin embargo, obedecen a ciertas reglas de comportamiento colectivo, de tal forma que la frecuencia de su ocurrencia durante períodos suficientemente largos es aproximadamente constante. Estas fallas suelen también llamarse fallas "catastróficas". En general no es fácil eliminar las fallas casuales; sin embargo,

se han desarrollado técnicas de confiabilidad que pueden reducir la posibilidad de que ocurran, y por lo tanto, reducen el número de veces en que se darán en un determinado intervalo de tiempo.

La teoría y la práctica de la confiabilidad distinguen entre sí las fallas tempranas, de desgaste, y casuales por dos razones principales: a) cada uno de estos tipos de fallas se atiene a una distribución estadística específica y por lo tanto requiere un tratamiento matemático diferente, y b) los métodos usados para su eliminación difieren entre sí. La ingeniería de la confiabilidad estudia las fallas tempranas, observa su distribución y, de acuerdo a eso, determina los métodos y los períodos necesarios para las pruebas previas. Estudia asimismo la prevención de fallas de desgaste mediante la observación de la distribución estadística del desgaste y la determinación de los períodos preventivos de reemplazo de las distintas partes o el diseño de su vida operativa. Finalmente, su atención principal se concentra en las fallas casuales y su prevención, reducción o eliminación total, debido a que es el fenómeno de las fallas casuales el que más desfavorablemente afecta la confiabilidad de los equipos en su uso real operativo.

5 LA INFLUENCIA DE LAS CONDICIONES DE TRABAJO. TASA DE FALLA DE LOS COMPONENTES PARA DISTINTAS CONDICIONES OPERATIVAS

La confiabilidad de los componentes depende de sus condiciones de operación. En particular, suele depender de los parámetros del medio ambiente donde se desarrolla la operación y del apartamiento de esos parámetros respecto de los del diseño; también es función de los sobreesfuerzos a que son sometidos los componentes.

Para poder determinar la confiabilidad de distintos componentes en diversas condiciones de funcionamiento se suele representar la tasa de falla de esos componentes en función de las diferentes condiciones operativas posibles. Estas representaciones solo se conocen al presente, para componentes de uso masivo como por ejemplo los componentes electrónicos. Se describirán a continuación los métodos de determinación de la tasa de falla de algunos componentes electrónicos en diversas condiciones operativas durante el tiempo de su vida útil.

La tasa de falla de las válvulas electrónicas suele expresarse con el producto de una tasa de fallas básica que depende del tipo de válvula por dos coeficientes (K_1 y K_2) que depende de la tensión de filamento y la temperatura de la ampolla de vidrio.

$$\lambda = \lambda_{base} \times K_1 \times K_2 \quad (\text{XLVI})$$

La tabla V presenta los valores de λ_{base} para las válvulas electrónicas más usuales trabajando en operación continua.

TABLA V

Válvula tipo	λ_{base} [%/1000 horas]
Miniatura simple	0.30
Miniatura doble	0.45
Subminiatura simple	0.20
Subminiatura doble	0.35
Nuvistores	0.13
Klystron	4.00
Magnetron	10.00
Tyratron	5.00
Referencias	0.50

Los coeficientes K_1 y K_2 se presentan en la figura 6 en función de la relación tensión nominal a tensión aplicada al filamento y la temperatura de ampolla respectivamente. El coeficiente K_1 toma el valor de la curva superior (zona rayada) cuando la corriente de cátodo es importante y la inferior cuando se opera con señales débiles. El coeficiente K_2 se grafica para varias relaciones de la potencia disipada/especificada.

La figura 7 presenta la tasa de fallas de diodos comunes de germanio en función de la temperatura normalizada (θ_n) de funcionamiento para diversas relaciones de disipación de uso/nominal. La temperatura normalizada se define como

$$\theta_n = \frac{\theta - \theta_s}{\theta_f - \theta_s} \quad (\text{XLVII})$$

donde

θ = temperatura ambiente

θ_s = temperatura ambiente autorizada para disipación máxima

θ_f = temperatura ambiente teórica para disipación nula

La figura 8 presenta la tasa de fallas para transistores y diodos tunel, con las mismas consideraciones que en el caso anterior.

La figura 9 presenta la tasa de falla de circuitos integrados lógicos de silicio en función de la temperatura ambiente.

La tasa de fallas de las resistencias y potenciómetros de señal (aglomerados) se suele expresar con el producto de una tasa de fallas básica (λ_b) por un coeficiente (K) que depende del valor de la resistencia y de la relación entre la disipación de utilización y la nominal.

$$\lambda = \lambda_b \times K \quad (\text{XLVIII})$$

La figura 10 presenta el valor de λ_b en función de la temperatura ambiente y la figura 11 el valor de K .

La figura 12 presenta el valor de la tasa de fallas para resistencias y potenciómetros de precisión bobinados en función de la temperatura ambiente.

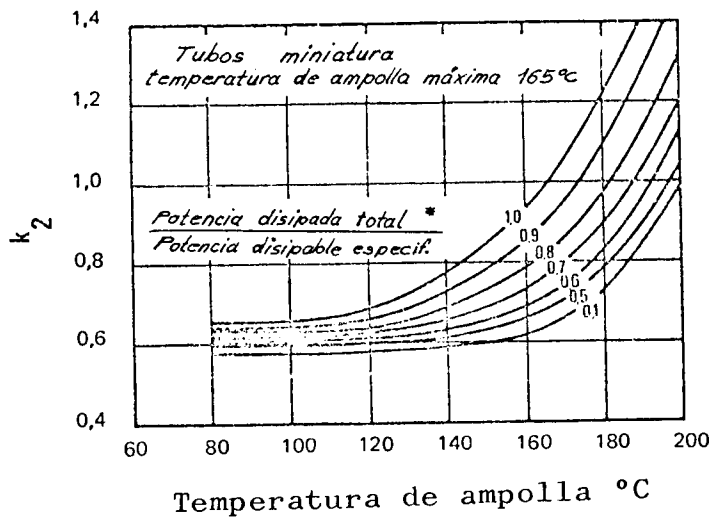
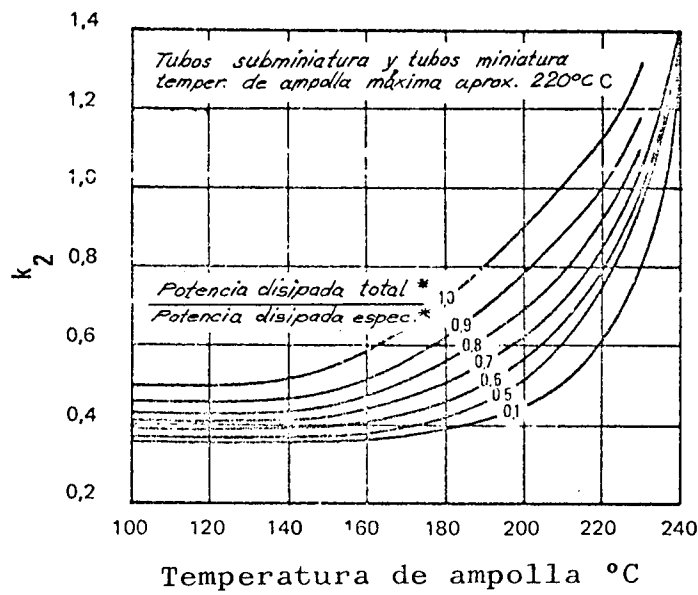
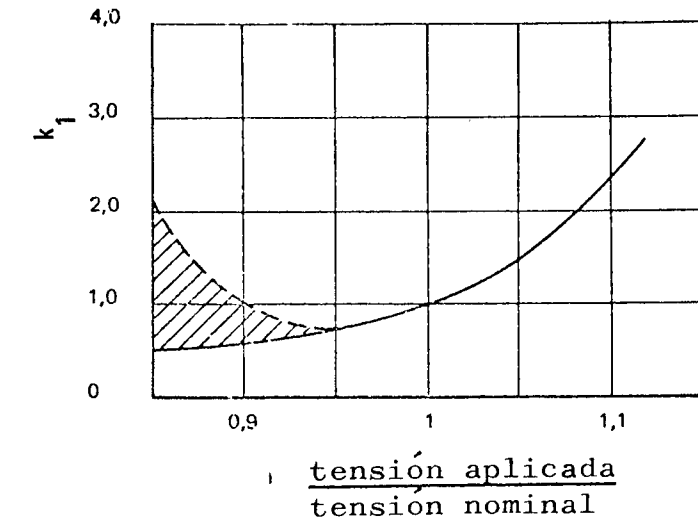


Figura 6

Diodos

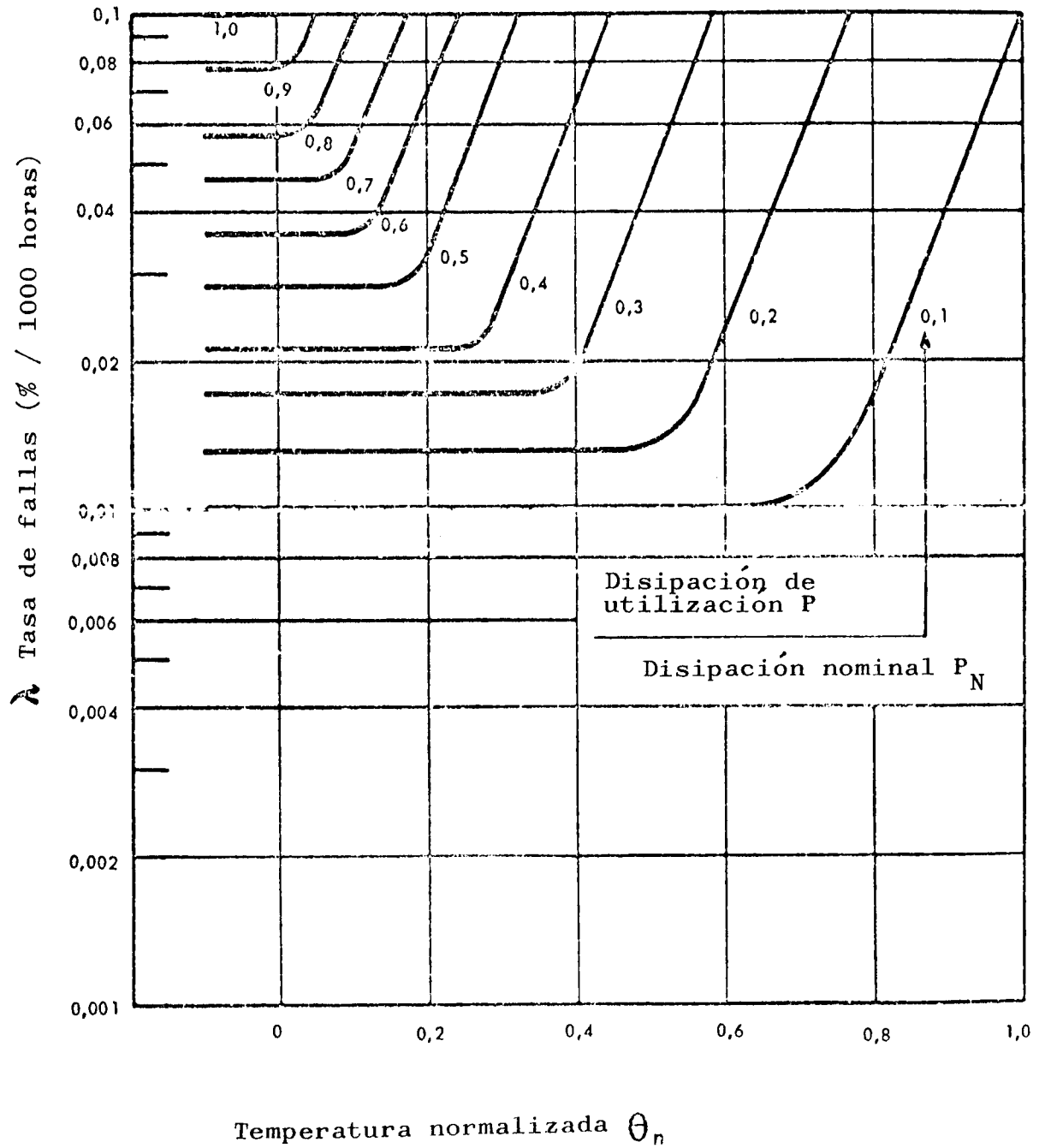


Figura 7

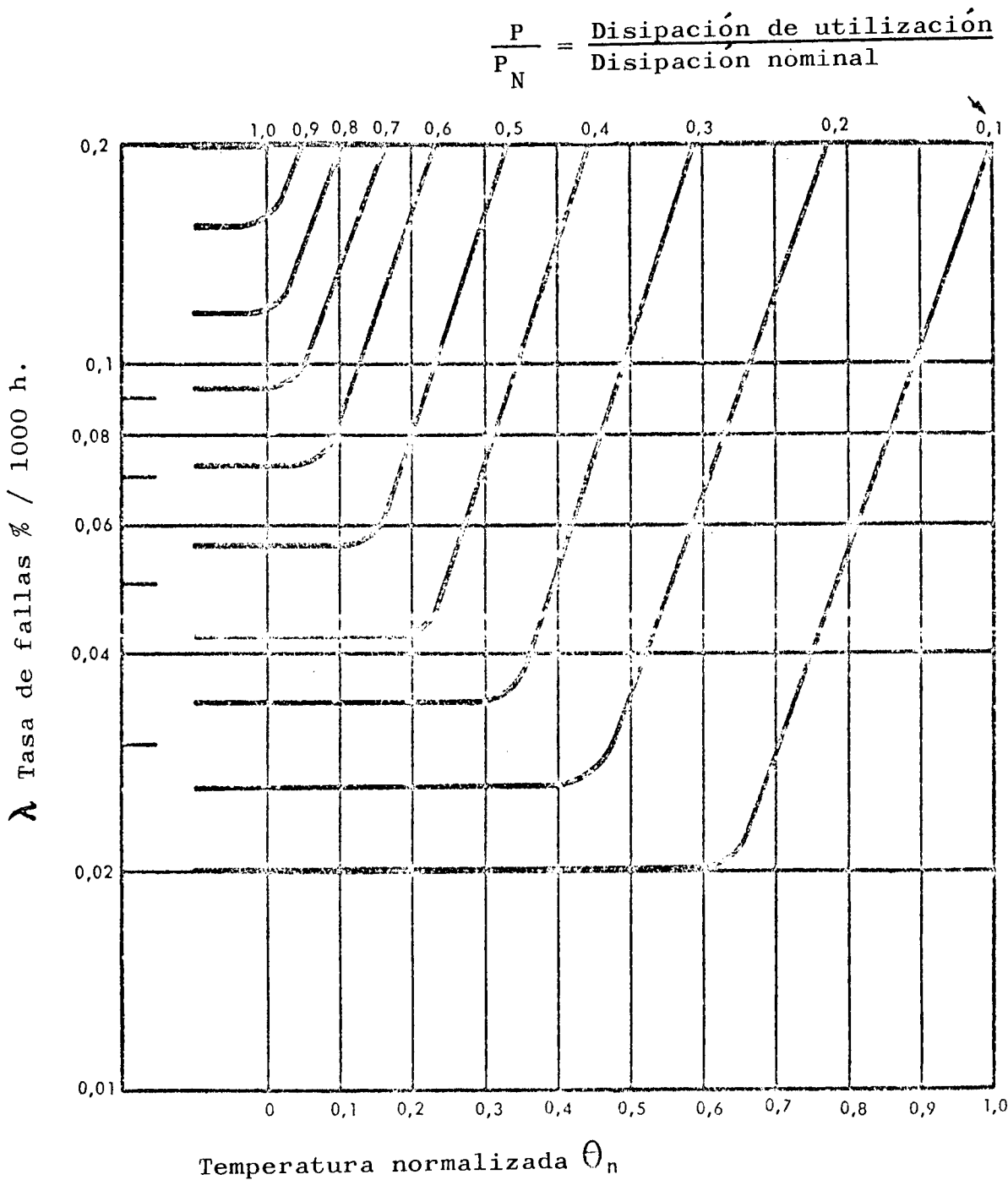


Fig.8 - Tasa de fallas de transistores y diodos tunnel

Circuitos integrados a lógica de silicio

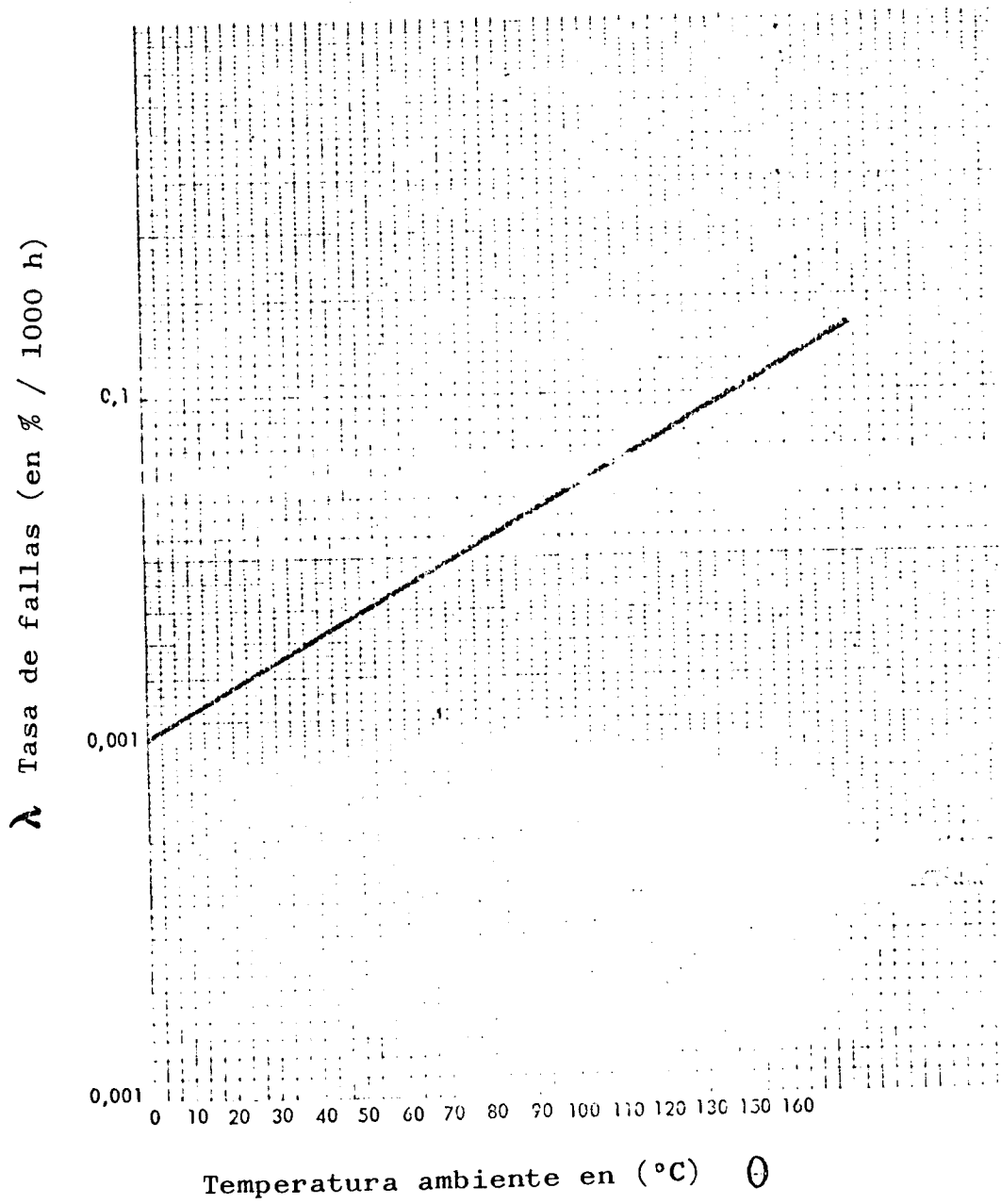


Fig. 9 - Tasa de fallas de circuitos integrados a lógica de silicio

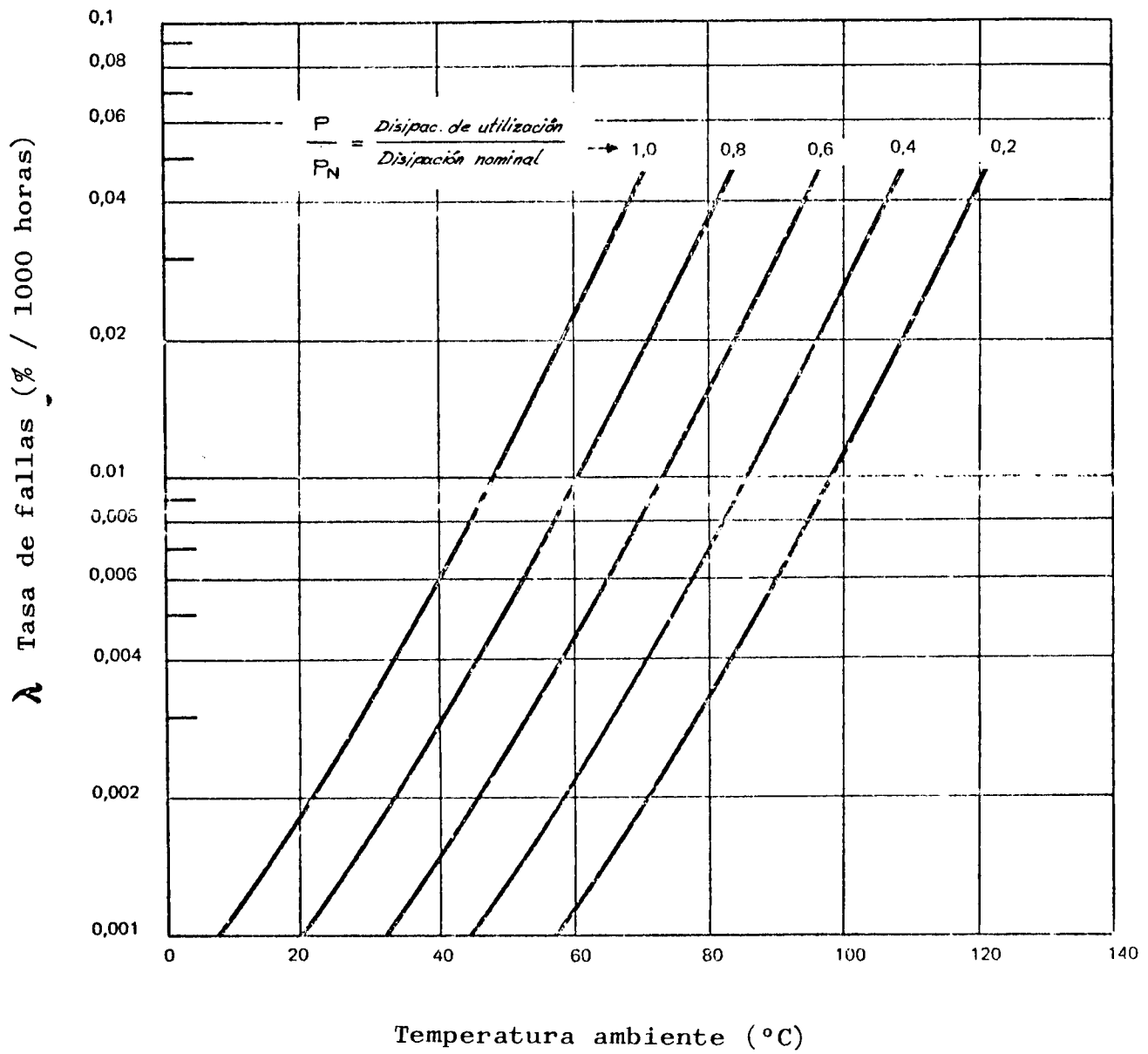


Figura 10

Gama de valores	Temperat. ambiente °C	$\frac{P}{P_N} = \frac{\text{Disipación de utilización}}{\text{Disipación nominal}}$								
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
A 1 k Ω	80	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	100	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0				
	120	0,9	0,9							
1,2 k Ω a 4,7 k Ω	80	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	100	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0				
	120	0,9	0,9							
5,6 k Ω a 10 k Ω	80	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	100	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0				
	120	1,0	1,0							
12 k Ω a 47 k Ω	80	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	100	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0				
	120	1,0	1,0							
56 k Ω a 100 k Ω	80	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,3	1,3
	100	1,0	1,0	1,1	1,4	1,4				
	120	1,4	1,5							
120 k Ω a 470 k Ω	80	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,3	1,3
	100	1,0	1,0	1,4	1,8	1,8				
	120	1,8	1,8							
560 k Ω a 1 M Ω	80	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0				
	100	1,0	1,1	1,8	1,9	2,0				
	120	2,1	2,1							
> 1 M Ω	80	1,0	1,0	1,1						
	100	1,5	2,0	2,5						
	120	3,0	4,0							

Figura 11

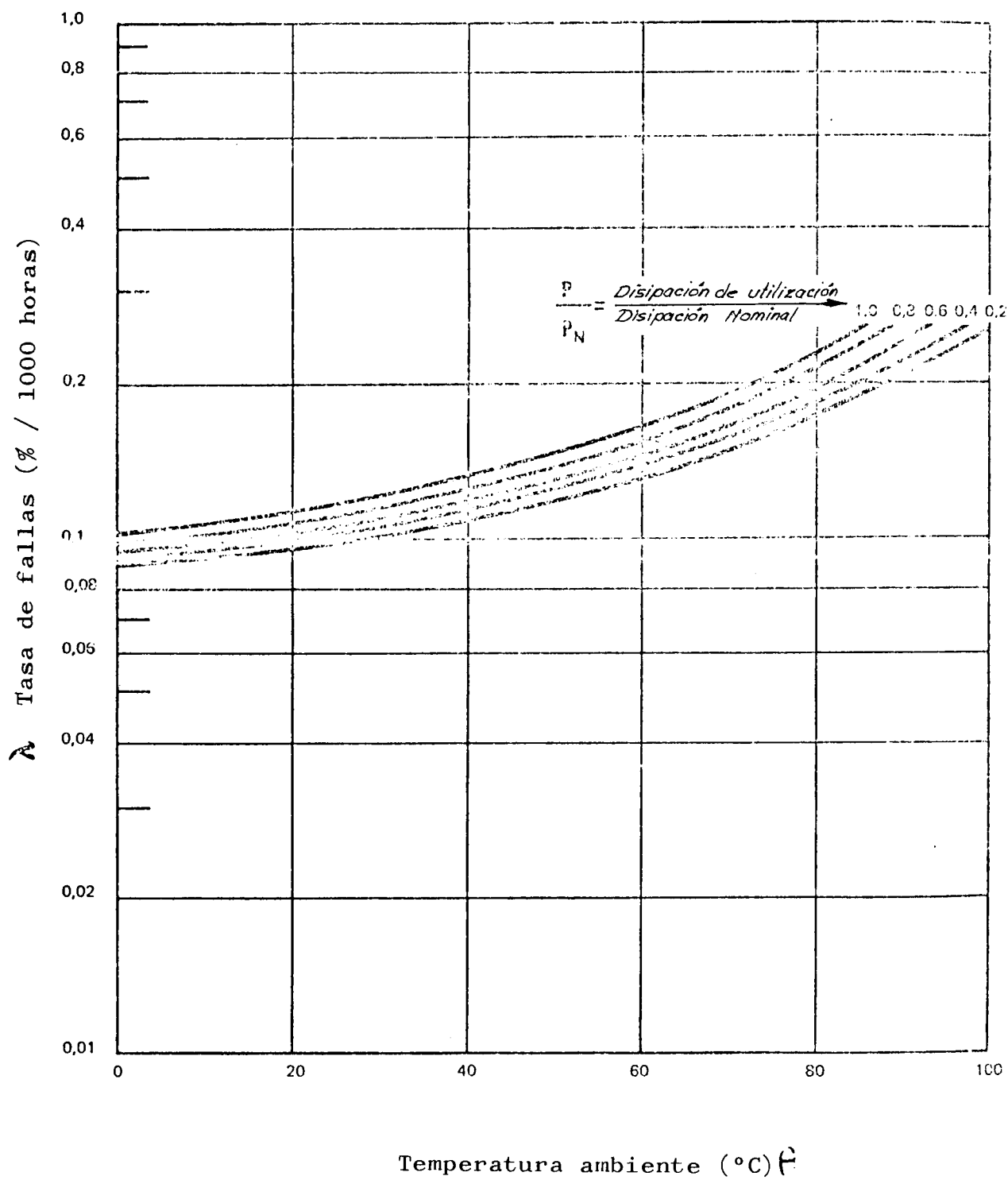


Figura 12

La tasa de fallas de las resistencias de alambre bobinados para alta disipación se presenta en las figuras 13 y 14. θ_M representa la temperatura máxima de utilización para disipación nula. Las figuras 15 y 16 son equivalentes a las anteriores pero para reóstatos.

La tasa de fallas de los condensadores se suele representar (para distintas relaciones de la tensión de utilización a la nominal) en función de la denominada temperatura equivalente. Se denomina temperatura equivalente a la suma de la temperatura ambiente (θ) y una temperatura adicional que depende de la frecuencia de la señal aplicada, de la amplitud máxima admisible en corriente alterna y de la tensión efectiva aplicada. Las figuras 17 a 20 presentan los valores de la tasa de fallas para condensadores comunes; la representación de $\Delta\theta$ (como parámetro) para distintas frecuencias y relaciones de tensión efectiva a nominal; y la relación entre amplitud máxima admisible de corriente alterna en función de la tensión nominal.

Las figuras 21 a 23 presentan la tasa de fallas para condensadores cerámicos de tres tipos distintos clasificados por su temperatura máxima de utilización (θ_M).

La tasa de falla para condensadores electrolíticos en función de la temperatura ambiente se presenta en la figura 24 en dos curvas. La curva N° 1 representa λ para condensadores con temperatura máxima de utilización (θ_M) menor a 70°C y la curva 2 para 70°C < θ_M < 85°C. Las curvas presentadas en las figuras 25 y 26 permiten determinar la tasa de fallas para capacitores electrolíticos de tantalio.

La tasa de falla para los condensadores de vidrio depende de las variables conocidas y del valor de la capacidad. La figura 27 presenta las curvas de la tasa de falla básica y una tabla que permite fijar la constante K que multiplicada por aquella tasa básica determina la tasa de falla.

Los circuitos magnéticos en general (como transformadores, inductancias, etc.) tienen una tasa de falla sumamente variable con el tipo de componente, modo de fabricación, etc. Sin embargo, se puede evaluar un valor aproximado en función de la categoría del aislante y de la suma (θ_c) de la temperatura ambiente (θ) y del sobrecalentamiento ($\Delta\theta$)

$$\theta_c = \theta + \Delta\theta \quad (\text{XLIX})$$

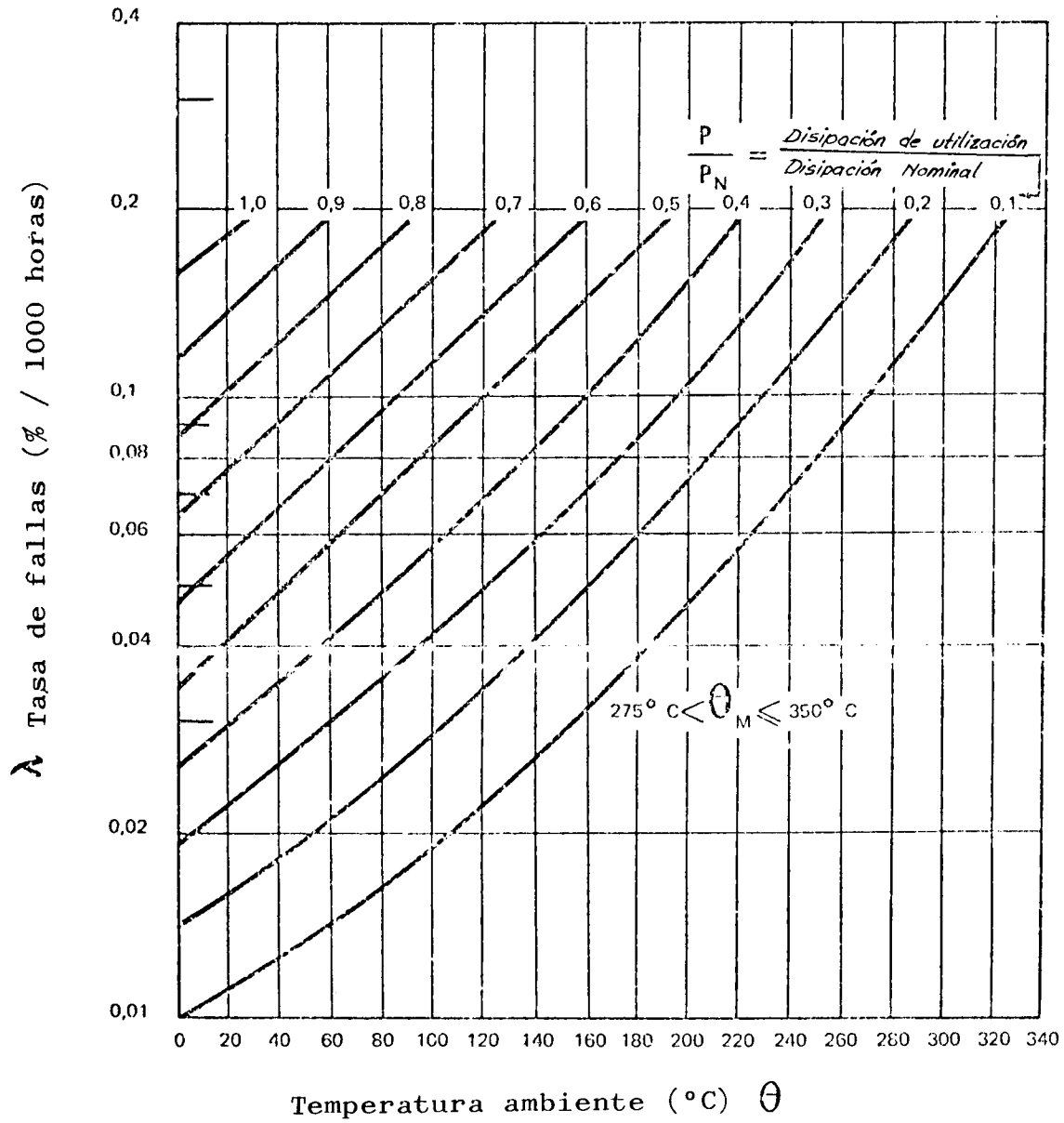


Figura 13

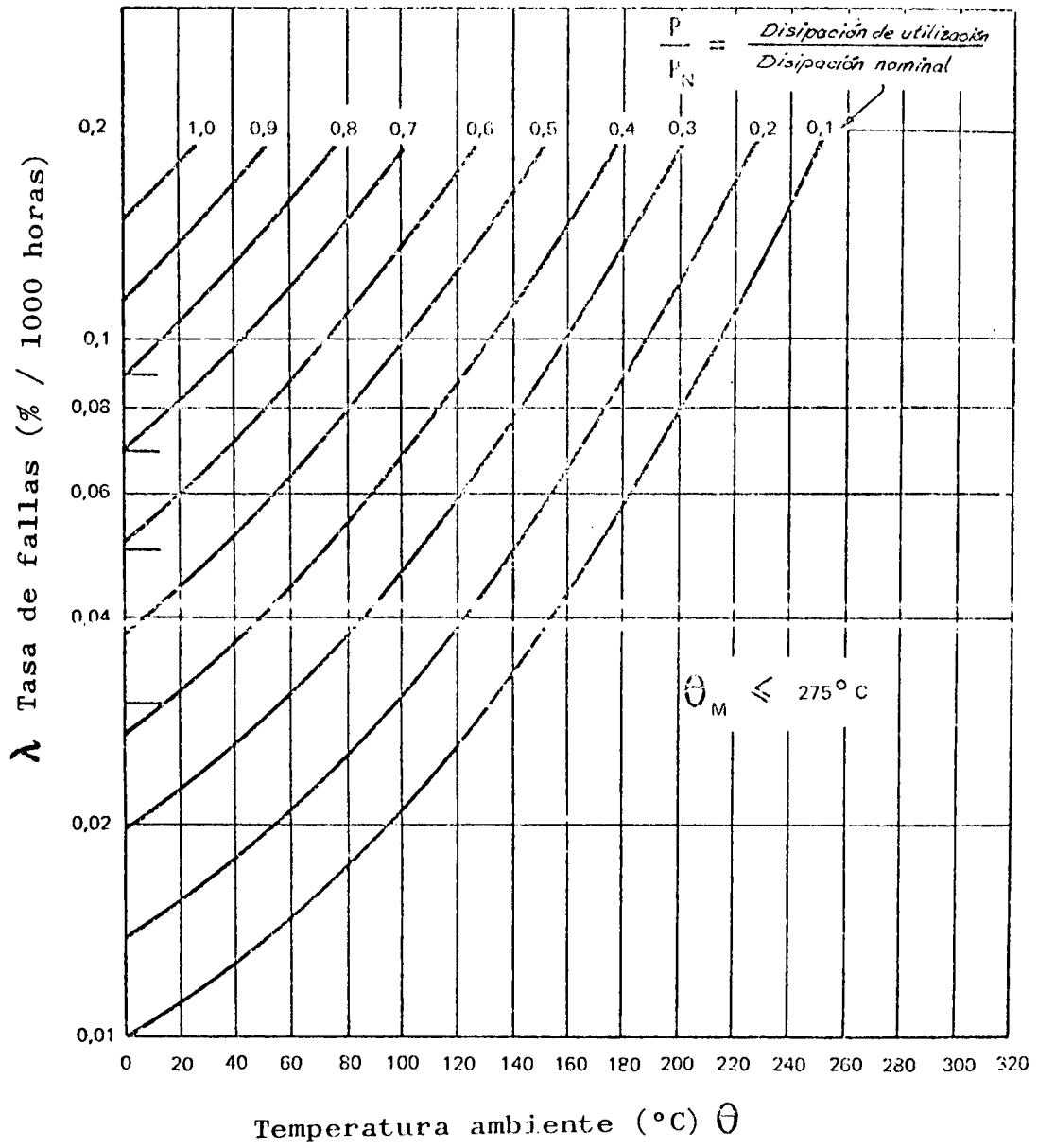


Figura 14

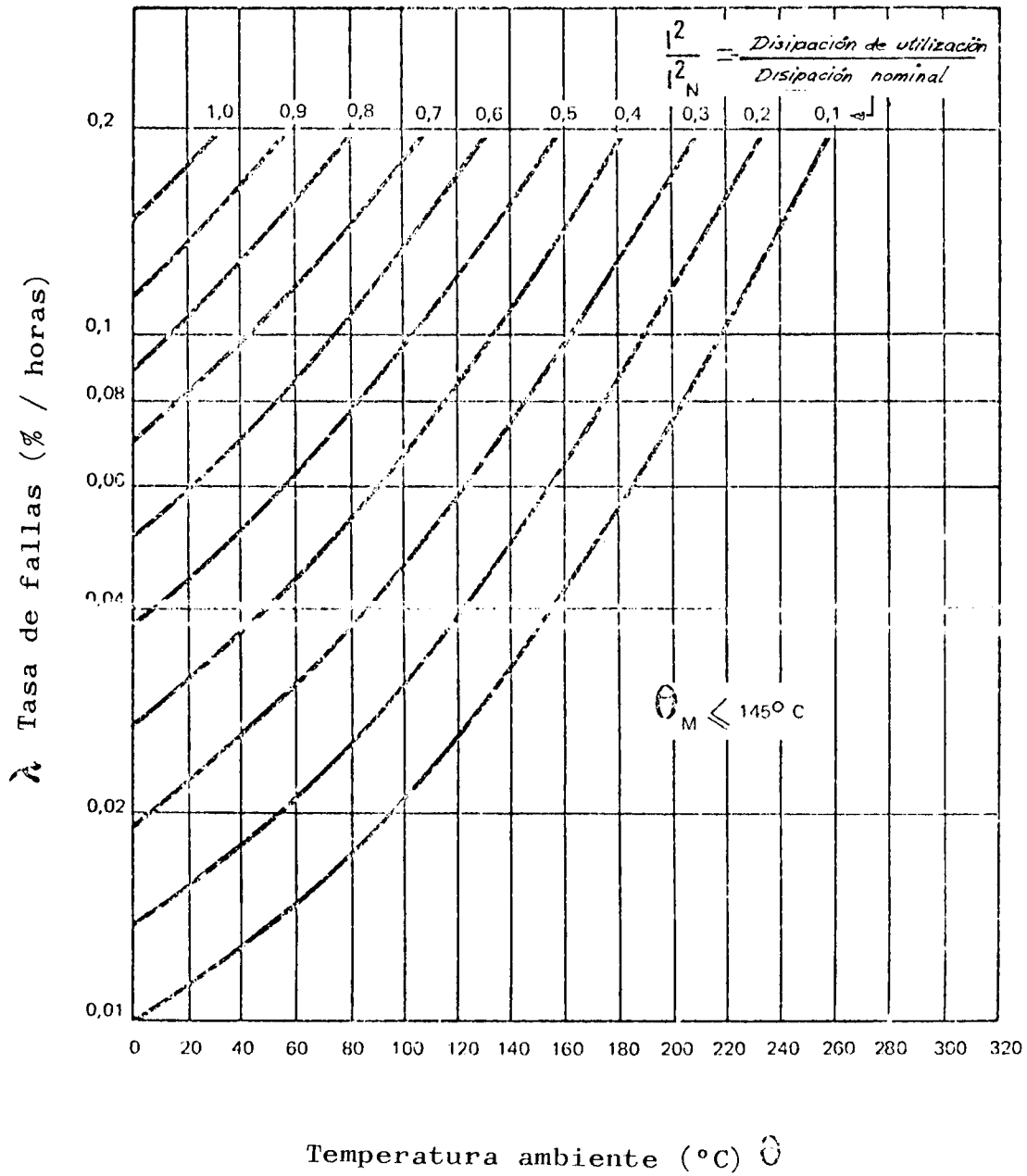


Figura 15

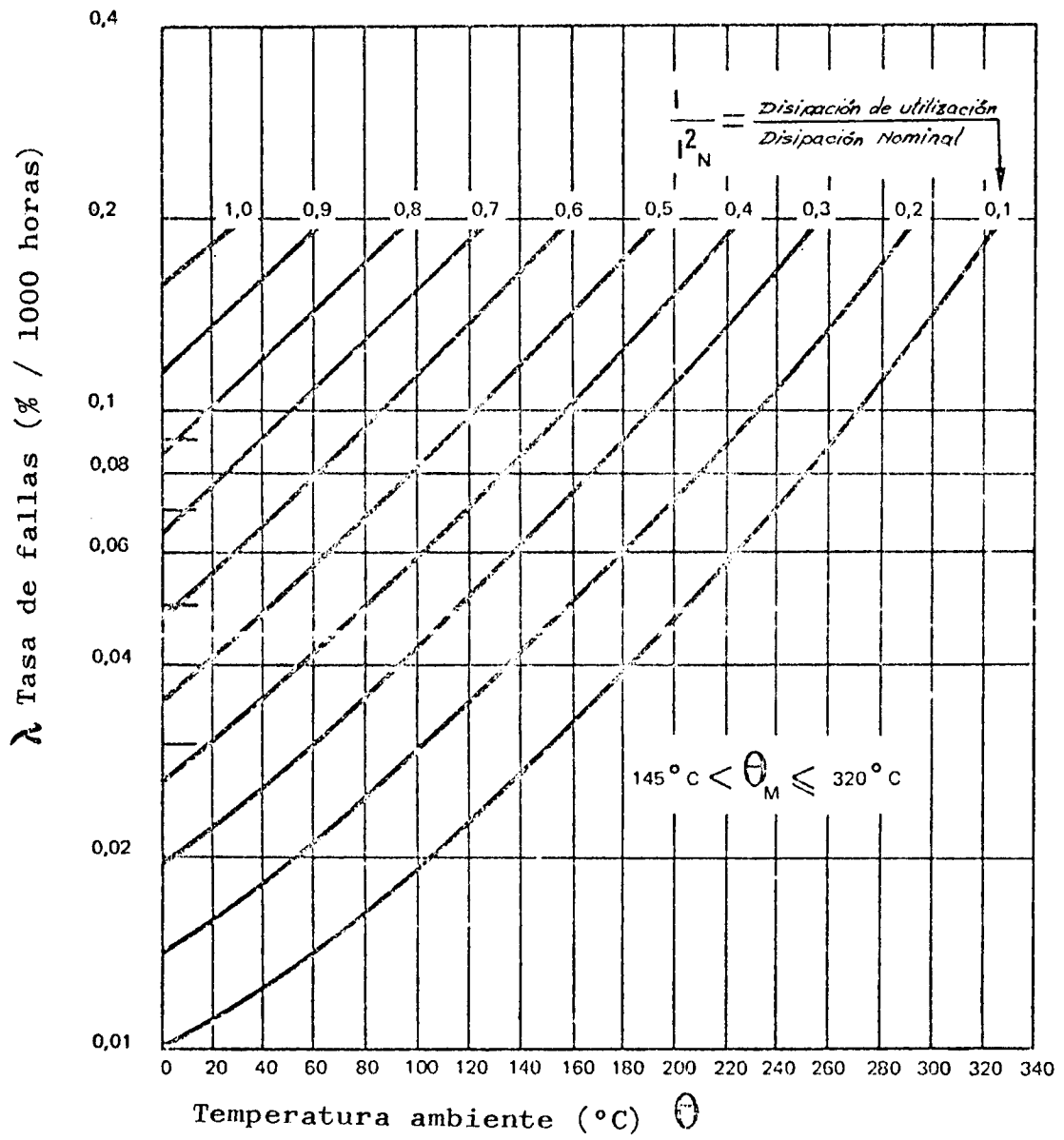


Figura 16

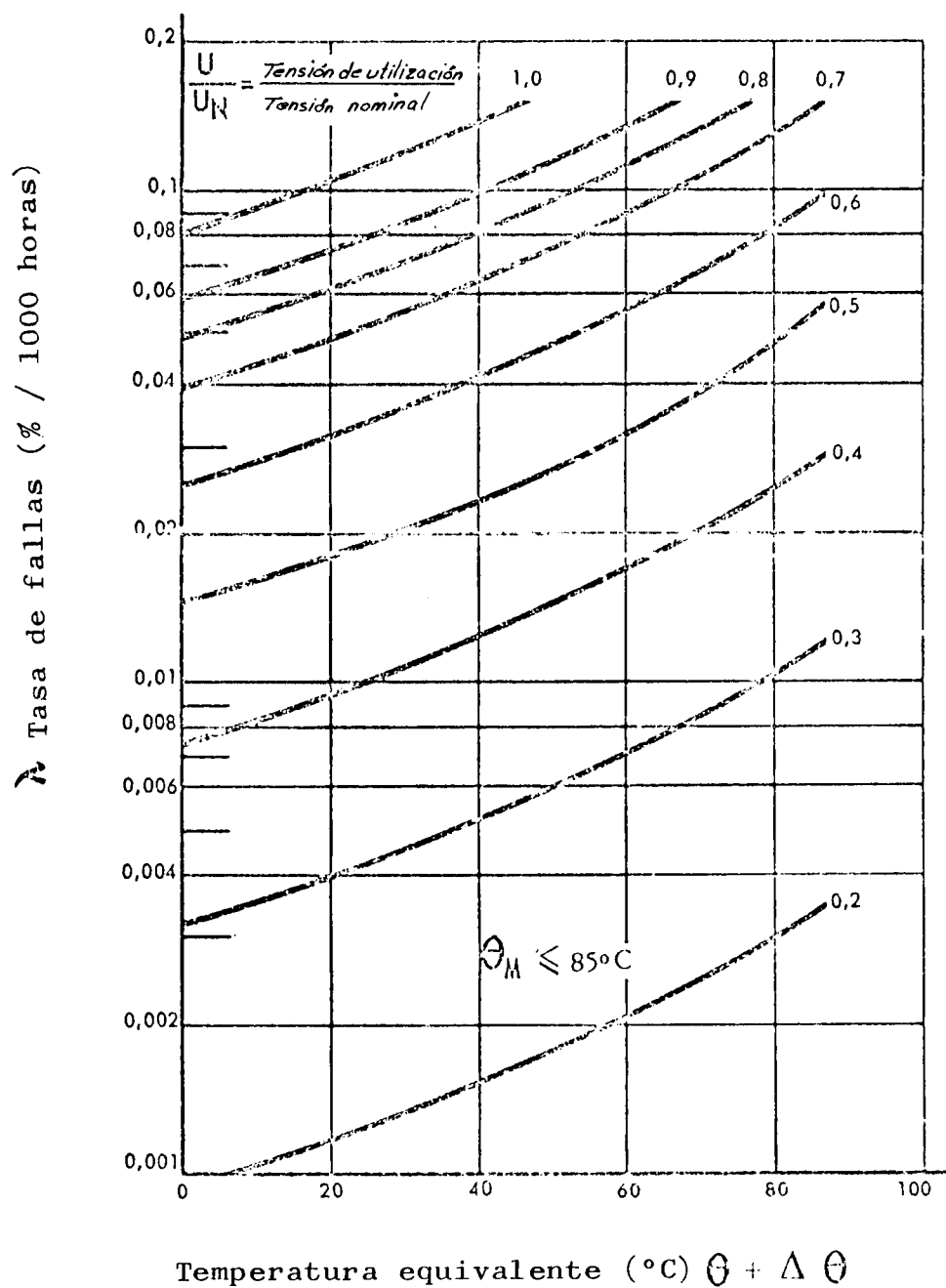


Figura 17

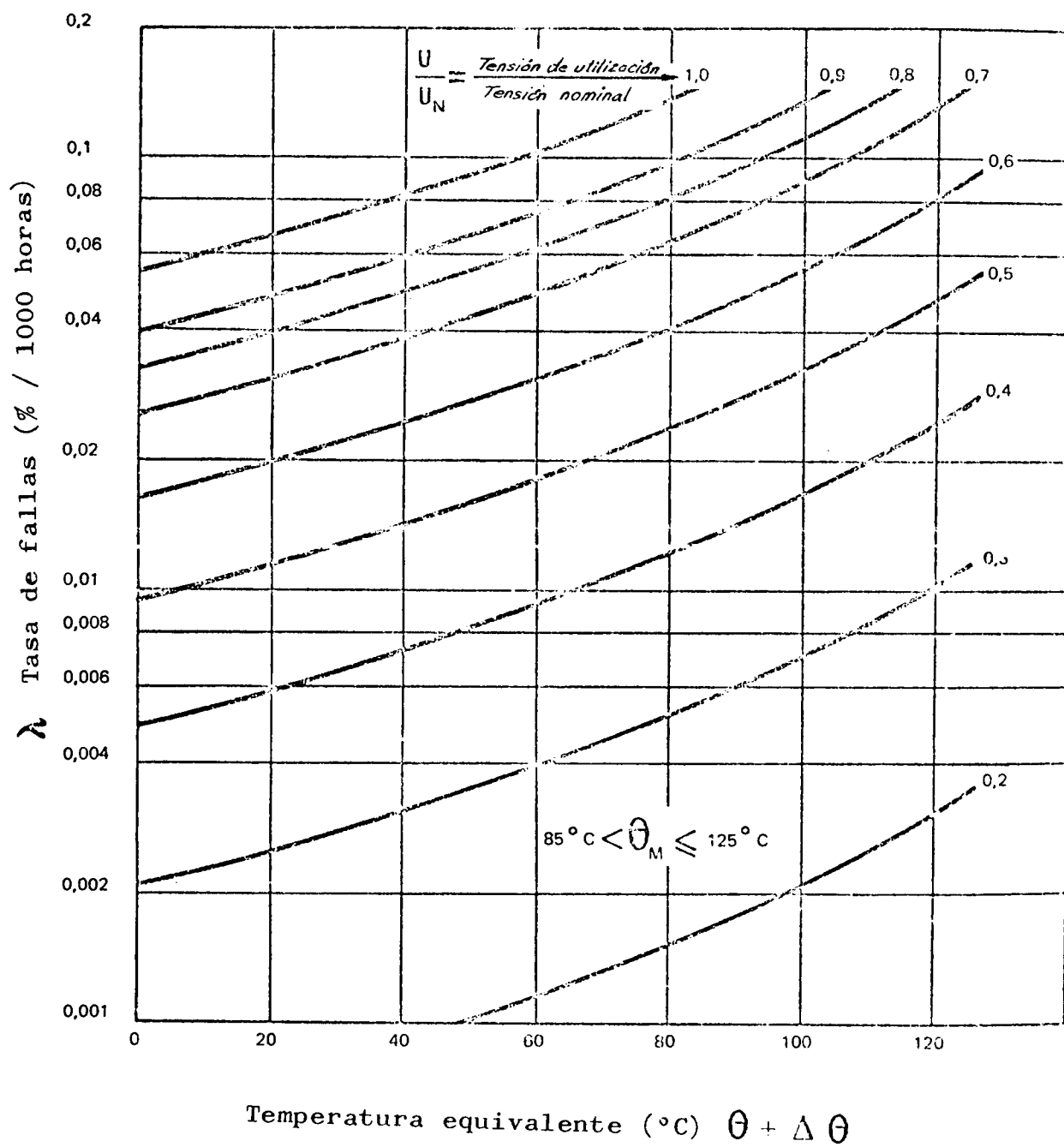


Figura 18

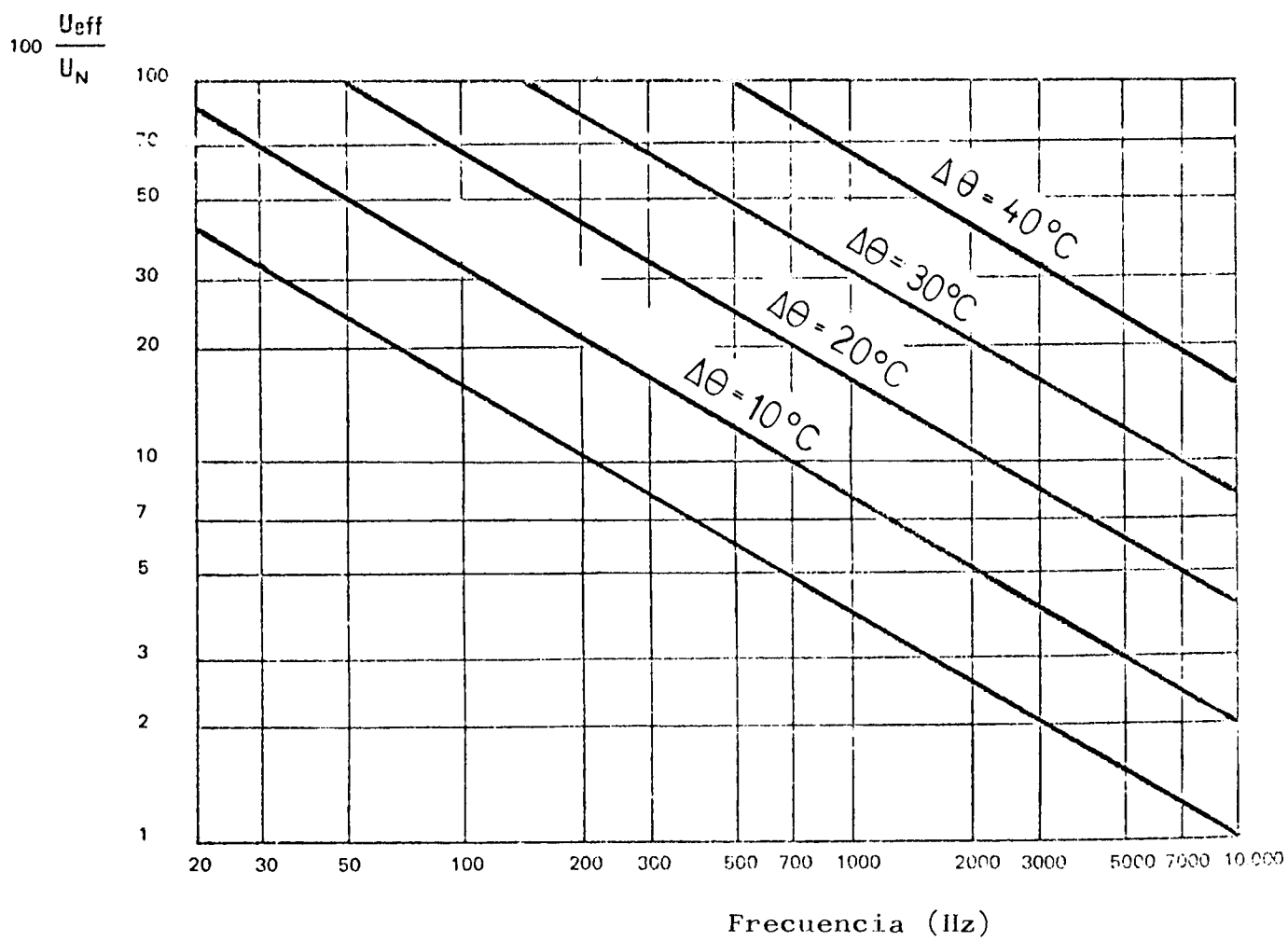


Figura 19

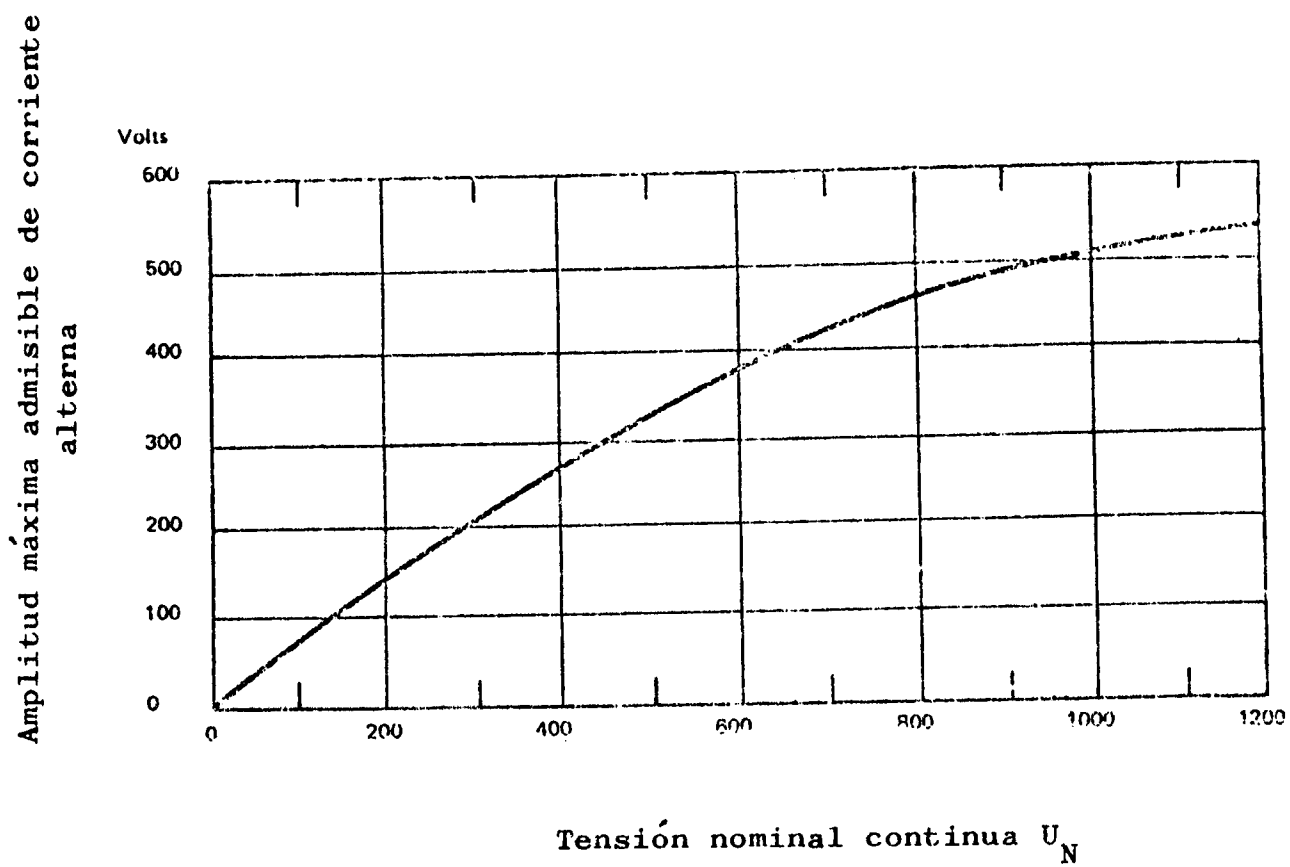


Figura 20

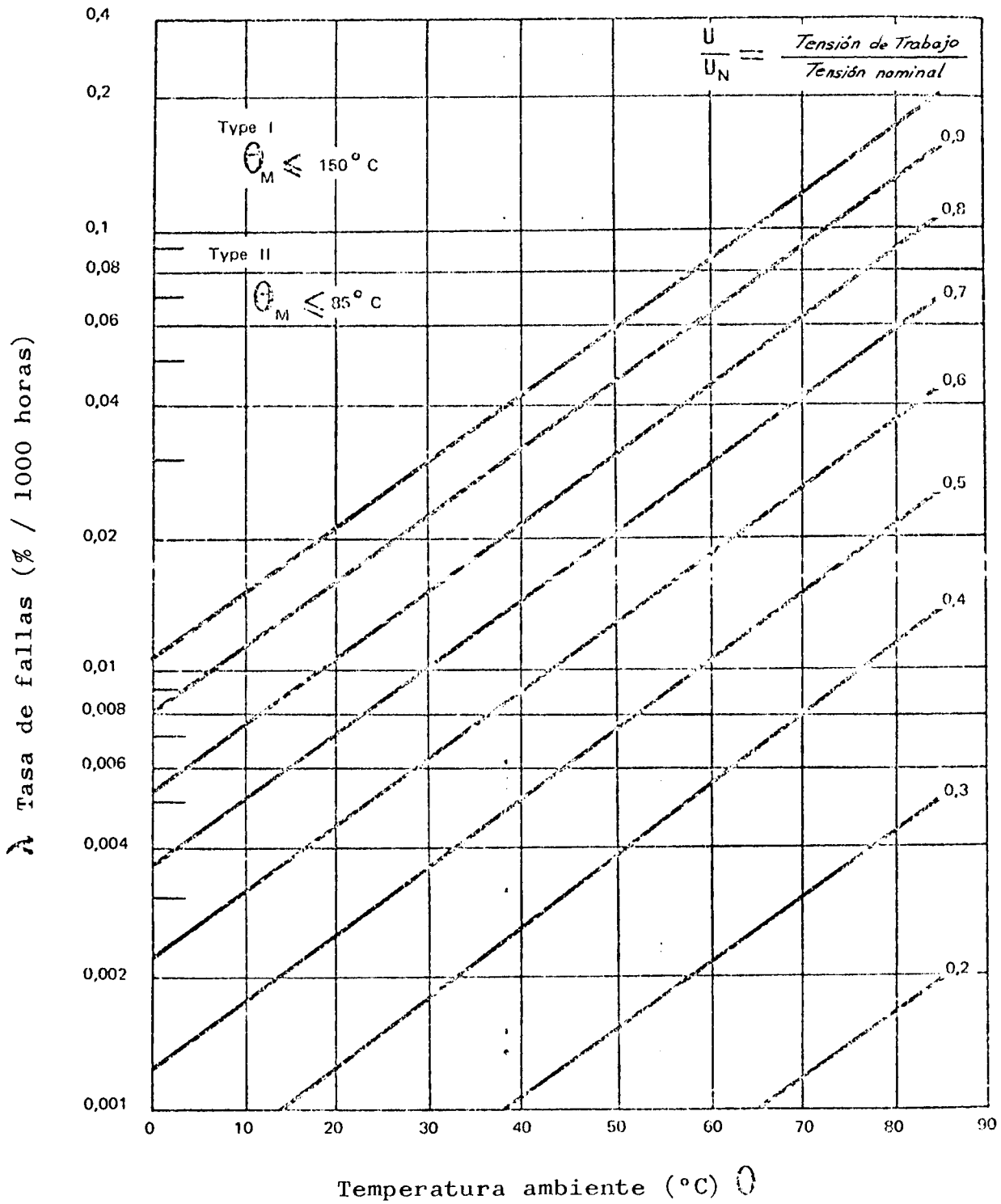


Figura 21

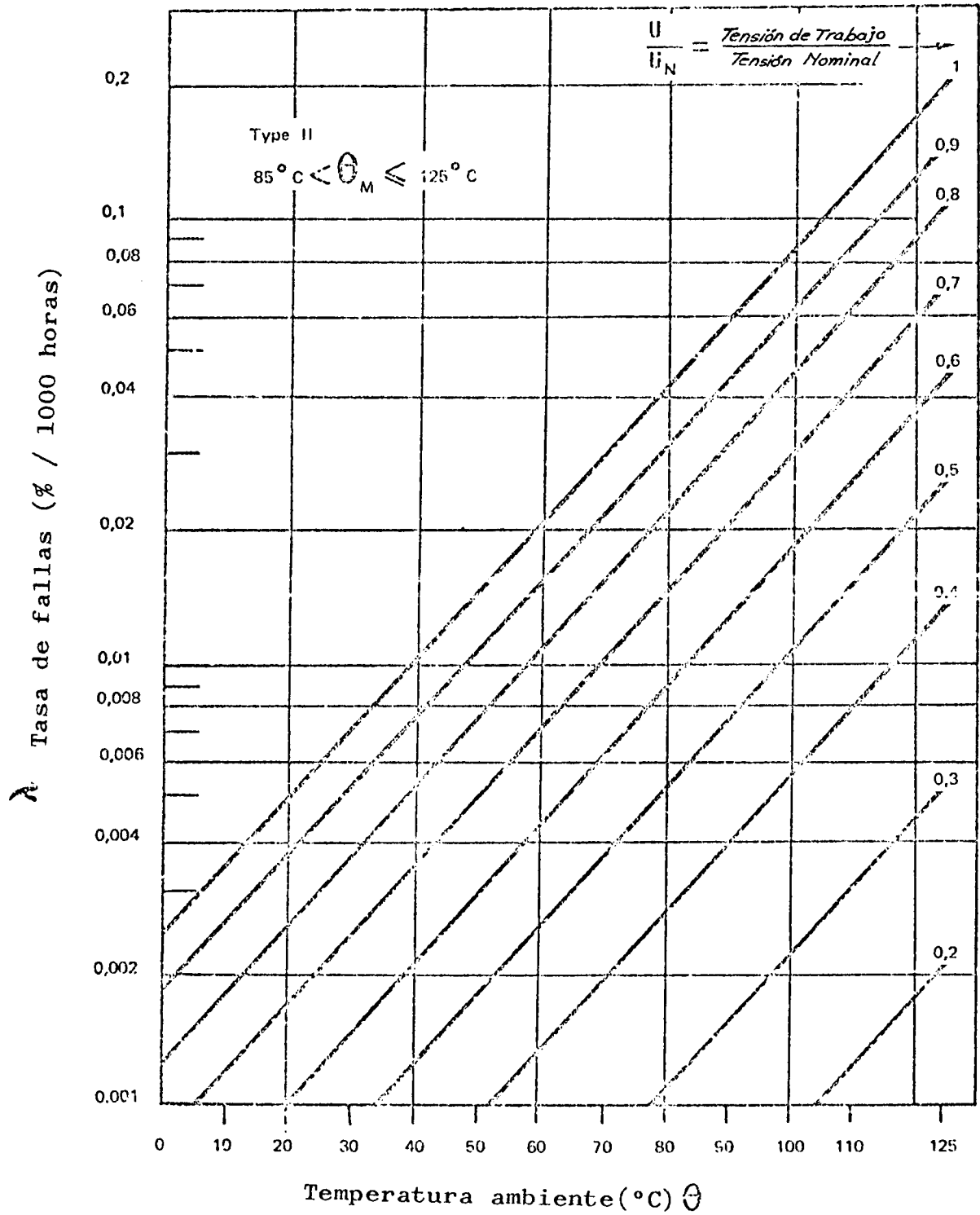


Figura 22

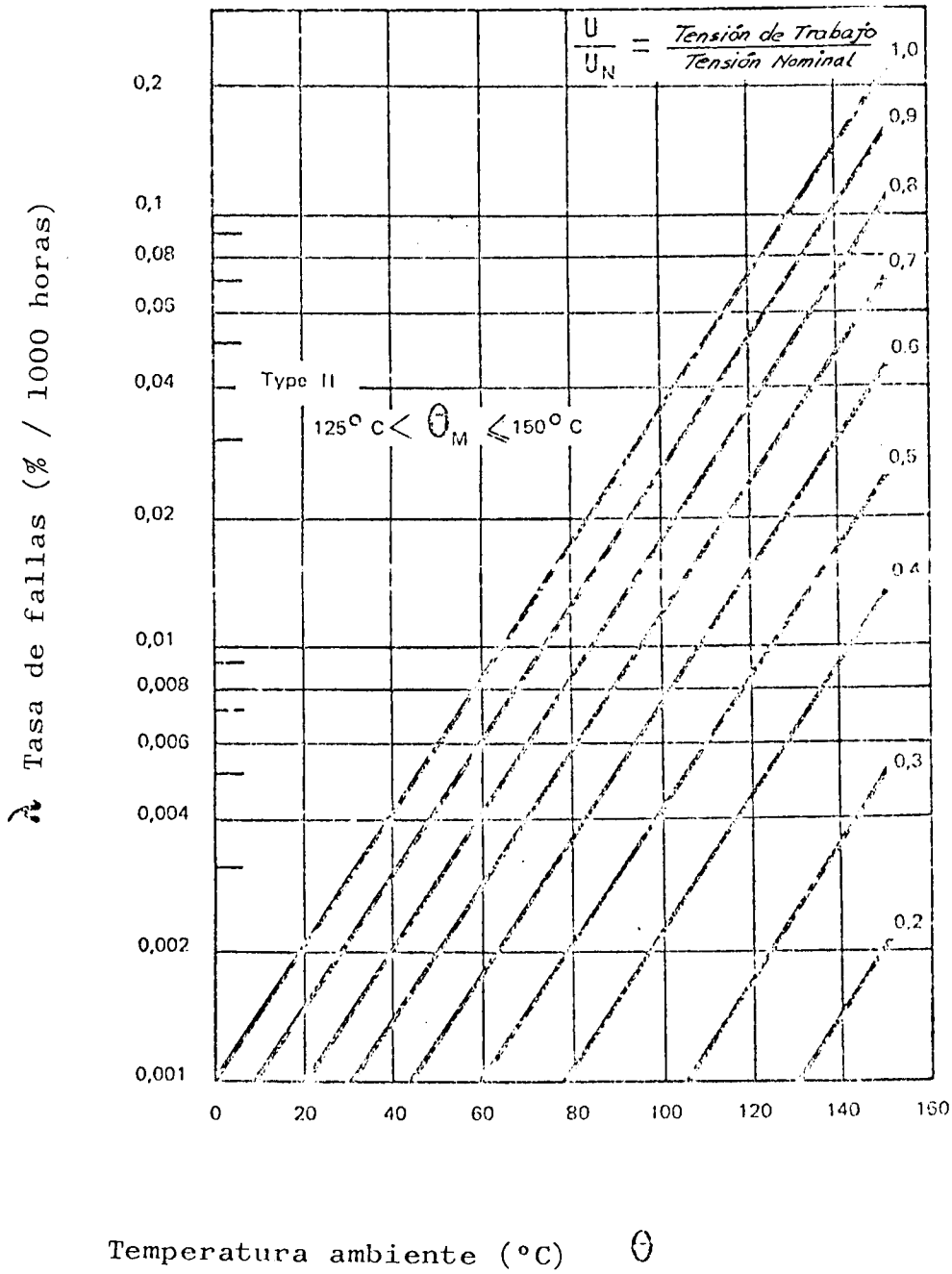


Figura 23

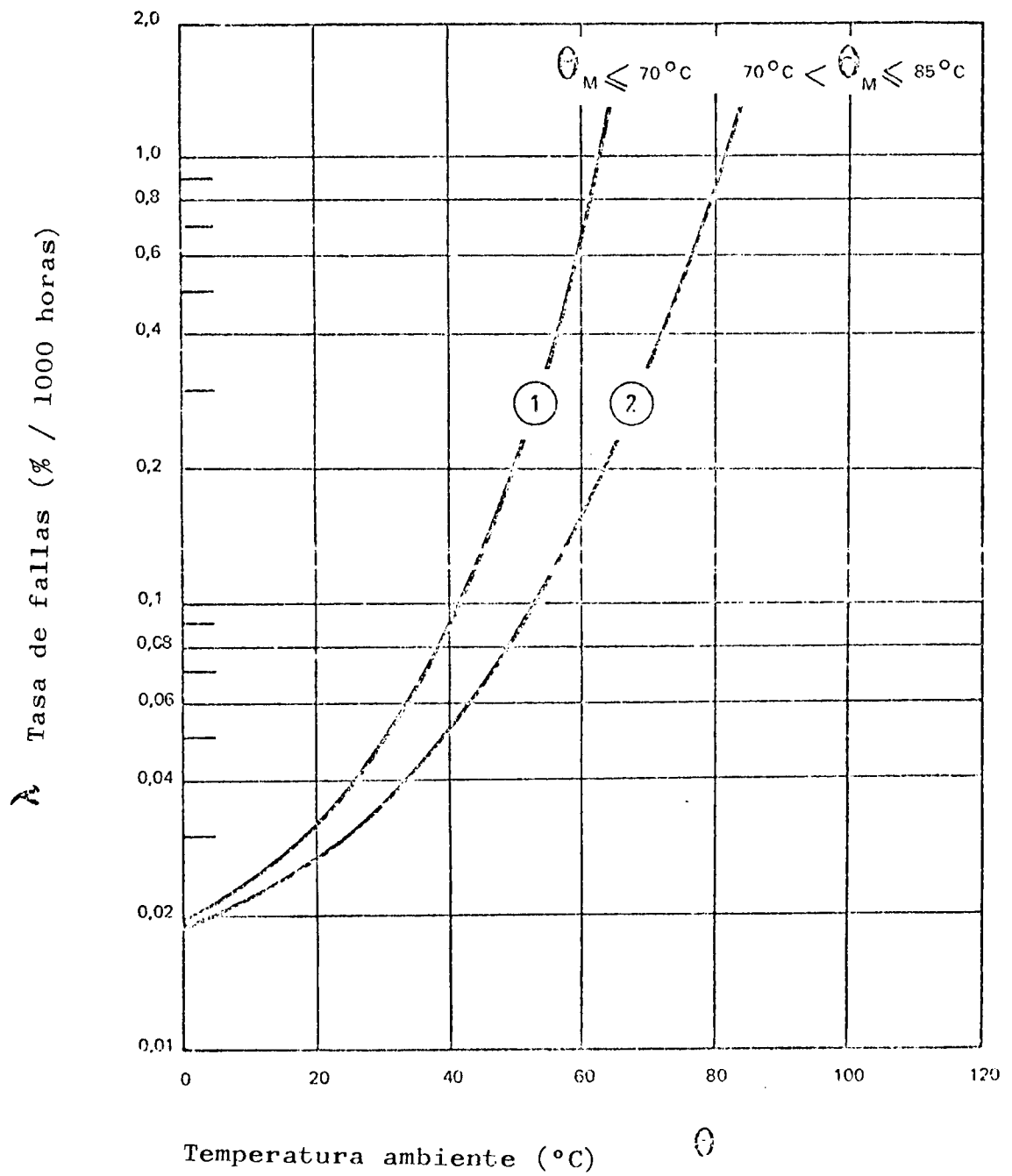


Figura 24

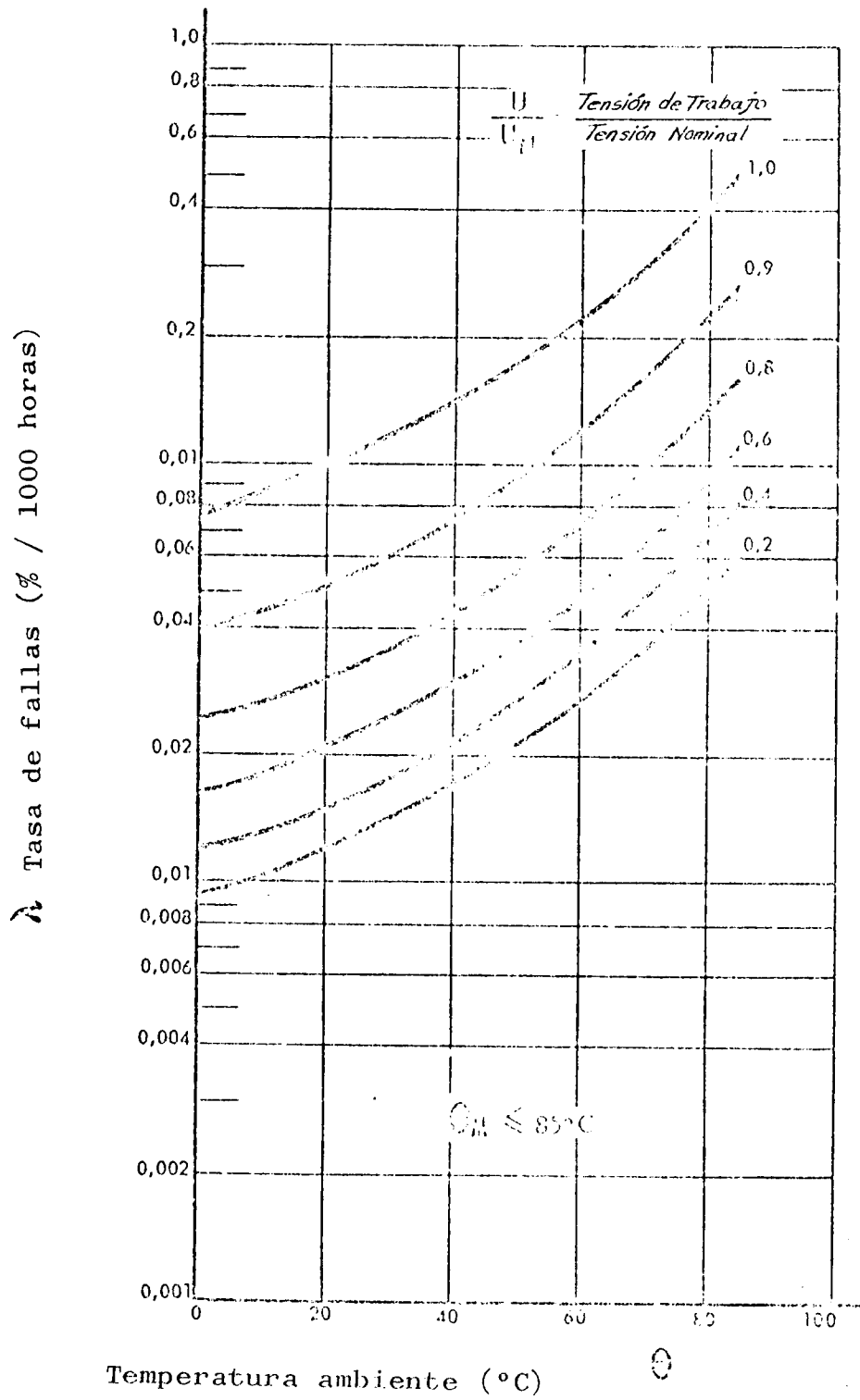


Figura 25

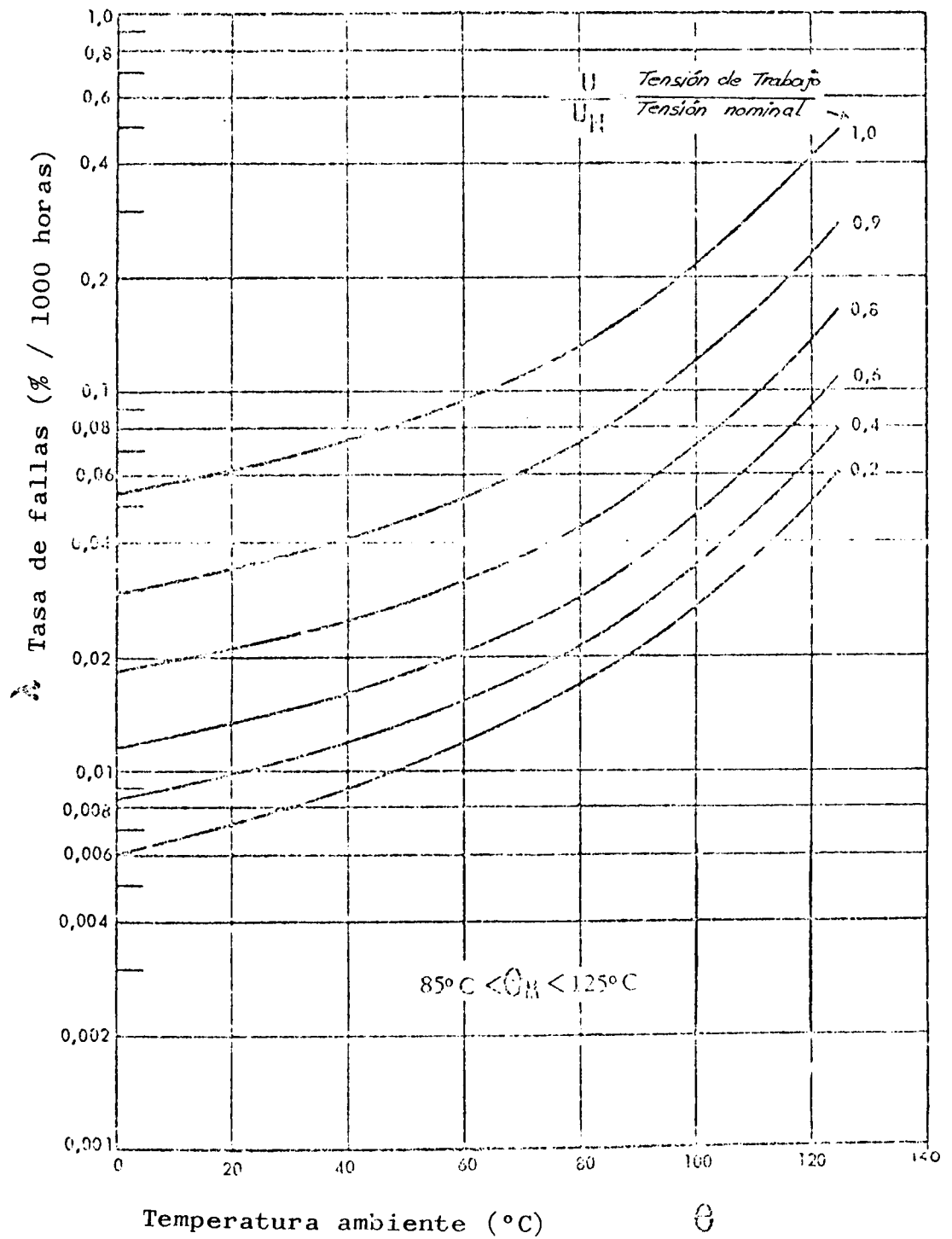


Figura 26

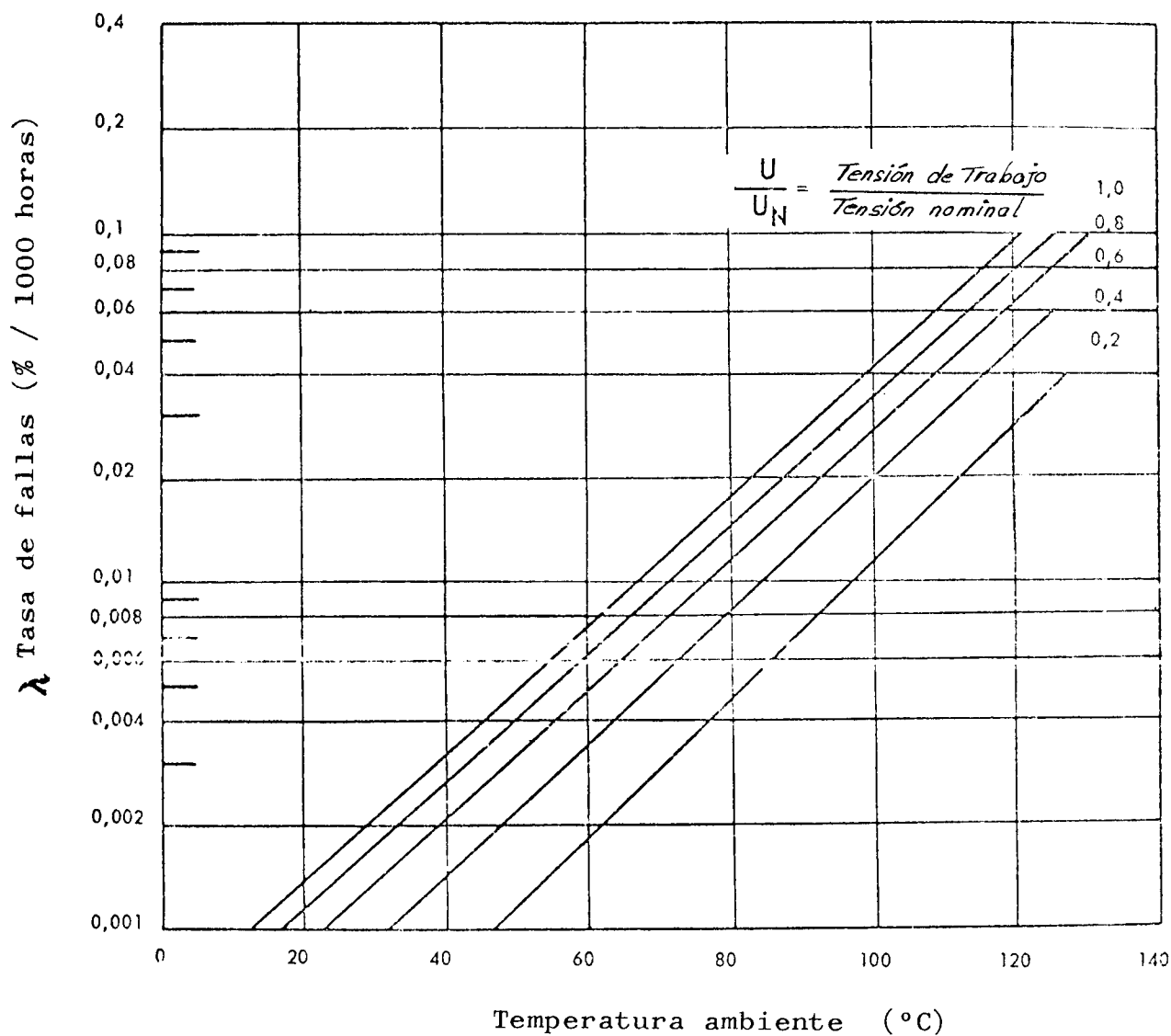


Figura 27

CAPACIDAD EN MICROFARAD				K
Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	
0,5 ã 10				0,2
12 ã 20	220 ã 240	560 ã 680		0,4
22 ã 30	270 ã 360	750 ã 1000		0,6
33 ã 39	390 ã 470	1100 ã 1300	3600 ã 4300	0,8
43 ã 47	510 ã 560	1500 ã 1800	4700 ã 5600	1,0
51 ã 100	620 ã 680	2000 ã 3600	6200 ã 10000	2,0
110 ã 150	750 ã 820	3700 ã 5100		3,0
160 ã 200	910			4,0
220 ã 300	1000 ã 1200			5,0

donde

$$\Delta \theta = 0,15 \theta_r + 0,85 \Delta \theta_r \cdot \frac{P}{P_N} \quad (L)$$

θ_r = temperatura del punto más caliente

$\Delta \theta_r = \theta_r - \theta_M$

θ_M = temperatura nominal del aislante

P = potencia total de utilización en el lado secundario

P_N = potencia nominal de utilización en el lado secundario

La figura 28 presenta los valores de la tasa de falla en función de θ_c llevando la categoría del aislante como parámetro. La tabla siguiente muestra las diferentes categorías de aislante y sus características.

Categoría del aislante	Características	Temperatura máxima adm.
1	Cartón, papel, fibras celulósicas, etc. sin impregnación	85°/90°C
2	Id.id.con impregnación	105°C
3	Amianto, fibra de vidrio, mica, etc. aglomerados con resinas o aceites	130°C
4	Id.id. con siliconas	170°/180°C
5	Porcelana, vidrio, cuero, mica con ligantes inorgánicos especiales o siliconas de estabilidad térmica elevada	170°/180°C

Se debe destacar que cada punto de la curva es válido hasta el tiempo de uso que se indica en las ordenadas de la derecha.

El valor de λ obtenido suele ser multiplicado por un factor que oscila entre 0.3 y 1 para los distintos tipos de circuitos magnéticos.

El valor de la tasa de fallas para circuitos magnéticos puede ser utilizado para motores y generadores eléctricos

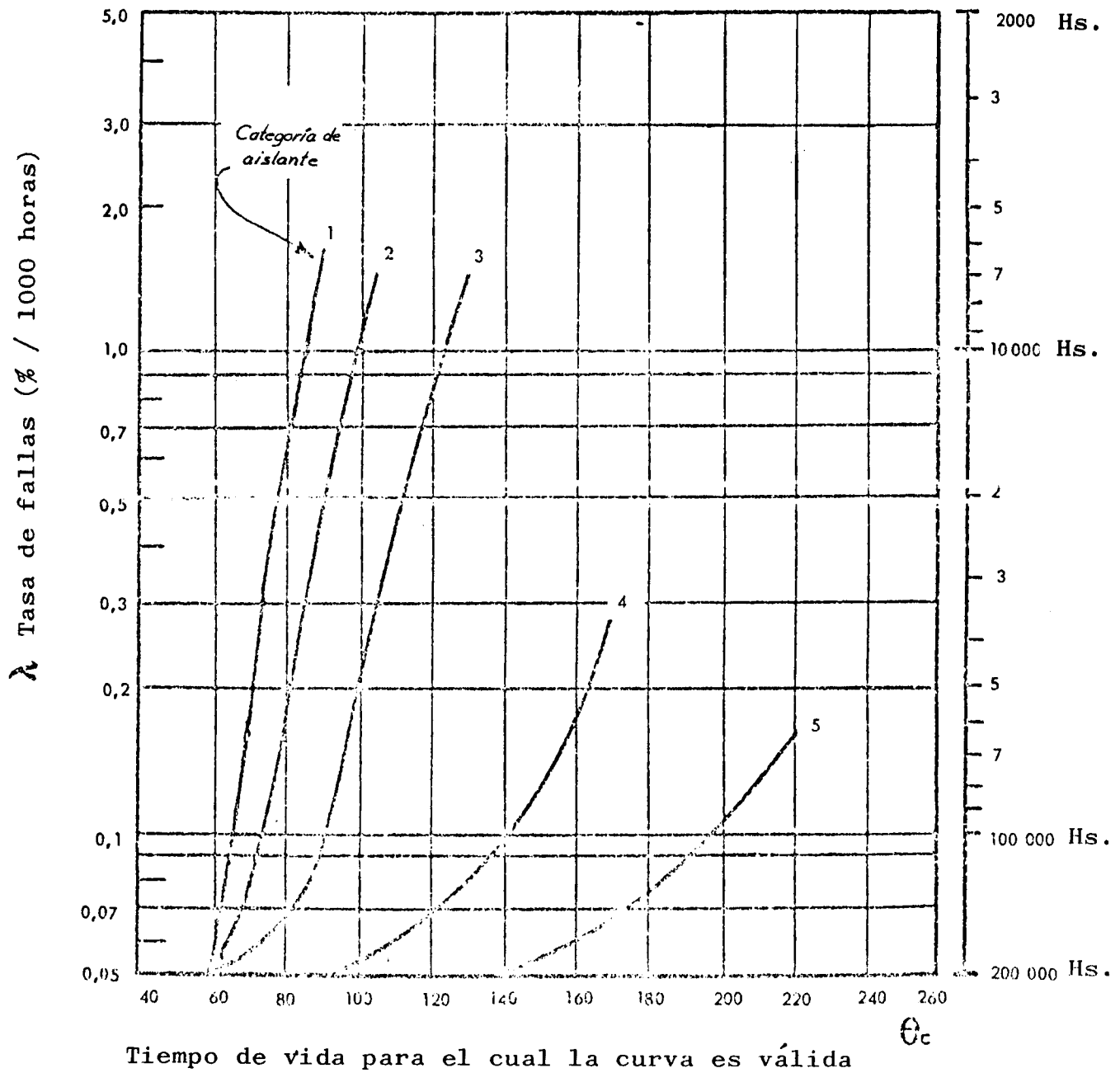


Figura 28

comunes multiplicándolos por un factor que depende del tipo de máquina según el siguiente detalle:

Máquina	Factor
Motores diversos y ventiladores	1,5
Generadores	1,3
Motores sincrónicos	0.5

y sumándole un valor de tasa de fallas diferencial ($\Delta\lambda$) que depende de la velocidad de rotación y de la existencia o no de escobillas. La función de $\Delta\lambda$ se presenta en la figura 29.

6 INFLUENCIA DEL TIEMPO DE OPERACION. VARIACION DE LA FUNCION DE DISTRIBUCION Y LA TASA DE FALLAS CON EL TIEMPO

Uno de los problemas esenciales de la teoría de la confiabilidad consiste en determinar la influencia del tiempo de operación en la función de distribución de las fallas, y consecuentemente, en la función de las fallas para cada familia de elementos.

La función de distribución puede ser de distinto tipo dependiendo entre otras cosas del periodo de vida del elemento para la cual se la considera. Durante el periodo denominado de "vida útil" (cuando solo ocurren fallas casuales) suele ser del tipo exponencial, en cambio las del periodo para el cual los elementos están muy usados (fallas de desgaste) la función es del tipo gaussiano y al comienzo de su utilización (fallas tempranas) es decreciente.

Se han propuesto funciones de distribución con gran variabilidad, en el sentido que previa asignación de valores oportunos a algunos parámetros de las mismas se pueden ser utilizadas para la descripción del comportamiento temporal de las fallas de diversos tipos de elementos.

Por otra parte, la función temporal de la tasa de fallas tendrá la forma de la derivada temporal de la función de distribución. Para los elementos más comunes suele tener una forma como la que presenta la figura 30.

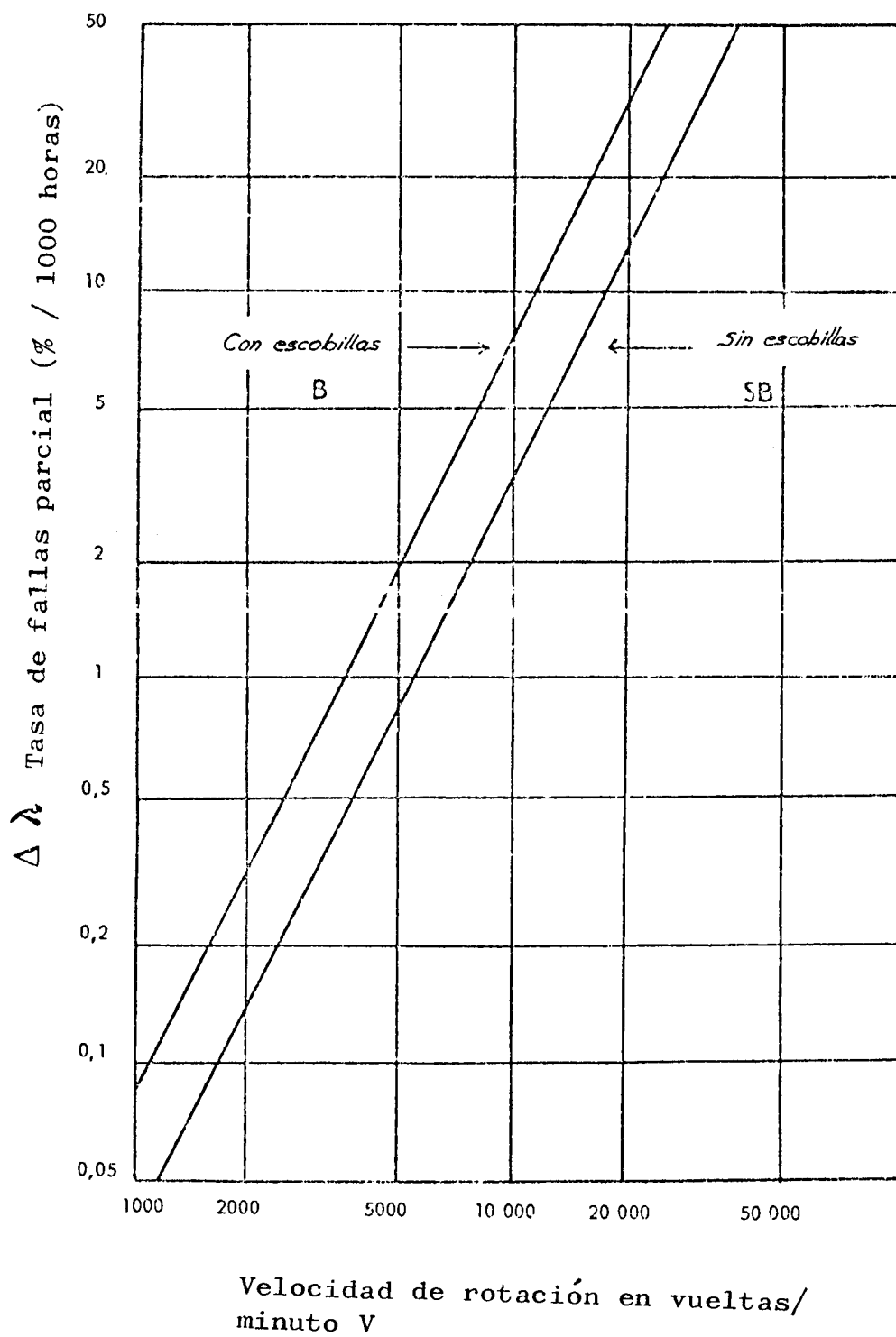


Figura 29

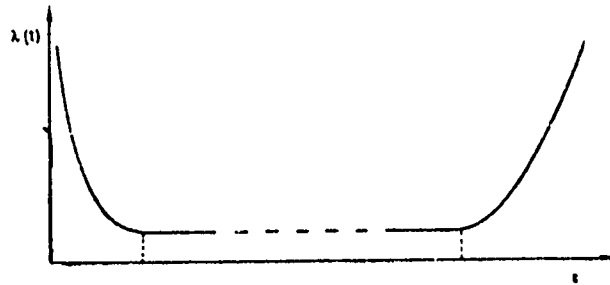


Figura 30

Cuando la tasa de fallas es constante, la expresión de la confiabilidad es una exponencial

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

Para valores pequeños de λt la (LI) se puede aproximar a

$$R(t) \cong 1 - \lambda t \quad (\text{LII})$$

La Tabla VI presenta para varios valores de λt el valor real y el valor aproximado de $R(t)$

TABLA VI

λt	$e^{-\lambda t}$	$1 - \lambda t$
0.01	0.99005	0.99000
0.05	0.95123	0.95000
0.10	0.90484	0.90000
0.15	0.86071	0.85000
0.20	0.81873	0.80000

El tiempo medio entre fallas es la inversa de la tasa de fallas

$$MTBF = m = \frac{1}{\lambda} \quad (\text{LIII})$$

luego, puede expresarse la confiabilidad con la expresión siguiente

$$R(t) = e^{-\frac{t}{m}} \quad (\text{LIV})$$

Un caso particular de tasa de fallas constante es

$$\lambda(t) = 1$$

En ese caso

$$R(t) = 1$$

es decir, se trata de componentes de durabilidad infinita.

Cuando la tasa de fallas se incrementa linealmente con el tiempo y además se inicia la vida del elemento con una dada tasa de fallas; es decir

$$\lambda = \lambda_0 + at \quad (\text{LV})$$

teniendo en cuenta que

$$\frac{dR}{R} = -(\lambda_0 + at) dt \quad (\text{LVI})$$

resulta que

$$R(t) = e^{-(\lambda_0 t + \frac{a}{2} t^2)} \quad (\text{LVII})$$

Si la tasa de fallas inicial es cero

$$\lambda = at$$

$$R(t) = e^{-\frac{a}{2} t^2} \quad (\text{LVIII})$$

En este caso el tiempo medio entre falla es

$$m = \int_0^{\infty} e^{-\frac{a}{2} t^2} at^2 dt \quad (\text{LIX})$$

llamando $\frac{a}{2} t^2 = z$ (LX)

resulta

$$m = \int_0^{\infty} e^{-z} \cdot 2 \cdot z \frac{dz}{\sqrt{2a} z^{1/2}}$$

$$\therefore m = \sqrt{\frac{2}{a}} \int_0^{\infty} e^{-z} \cdot z^{1/2} \cdot dz \quad (\text{LXI})$$

pero

$$\int_0^{\infty} e^{-z} \cdot z^{1/2} \cdot dz = \frac{1}{2} \cdot 1 = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \quad (\text{LXII})$$

luego

$$m = \sqrt{\frac{2}{a}} \cdot \frac{\sqrt{\pi}}{2} \cong 1,25 \cdot a^{-1/2} = \frac{1,25}{\sqrt{a}} \quad (\text{LXIII})$$

Otro caso interesante de considerar es aquel para el cual la tasa de fallas se incrementa exponencialmente con el tiempo

$$\lambda = \lambda_0 e^{at}$$

En este caso

$$R(t) = e^{-\frac{\lambda_0}{a}} (e^{at} - 1) \quad (\text{LXIV})$$

y

$$m = \int_0^{\infty} t \cdot e^{-\frac{\lambda_0}{a} e^{at}} \cdot e^{\frac{\lambda_0}{a}} \cdot \lambda_0 e^{at} dt \quad (\text{LXV})$$

Una de las funciones de distribución más flexibles de adaptar a diferentes variaciones temporales es la denominada función de Weibull que puede representarse por la siguiente ecuación

$$f(t) = \frac{b}{a} \cdot t^{b-1} e^{-\frac{t^b}{a}} \quad (\text{LXVI})$$

El parámetro "a" de la función de Weibull (denominado "factor de escala"), determina el orden de magnitud de la función; el parámetro b (denominado "factor de forma") determina la forma de la función.

La figura 31 presenta la función de Weibull para a=1 y diversos valores de b:

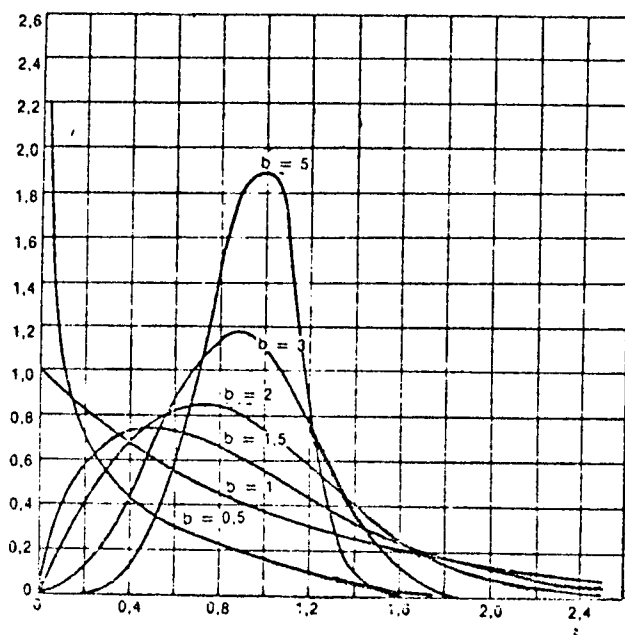


Figura 31

Las curvas con $b=1$ son del tipo exponencial y representan a la función de distribución de un componente durante su vida útil. Cuando $b > 1$ la función se aproxima al tipo gaussiano y representa a la función de distribución durante el periodo de vejez. Finalmente, cuando $b < 1$ la función es decreciente y representa a la función de distribución durante el periodo inicial de vida.

En el caso en que se utiliza como $f(t)$ a una función de Weibull la confiabilidad tendrá la expresión siguiente:

$$R(t) = e^{-\frac{t^b}{a}} \quad (\text{LXVII})$$

Como se ha visto, hay infinitas posibilidades de representar la variación temporal de las funciones representativas de la vida de los componentes. Sin embargo, en la práctica solo se estudian algunas formas particulares de estas variaciones temporales generalmente denominadas "curvas de vida".

Se estudian en genral cinco formas básicas de las curvas de vida y cada una de ellas es la expresión de un modelo matemático. La mayoría de las curvas de vida experimentales pueden

ser representadas por alguna o varias de estas cinco formas básicas. Algunas veces se trata de una única forma, pero en la mayoría de los casos se observan combinaciones, a veces complejas, dependiendo del número y naturaleza de las causas de fallas que actúen simultáneamente.

La figura 32 presenta el tipo C de forma de vida, o modelo de falla constante, donde la tasa de falla permanece constante a través de la vida. Se pueden observar dos curvas, una denominada (λ) que indica la tasa de falla para cualquier momento determinado de la vida, y la denominada N/N_0 que indica el número de componentes existentes en cada momento como una fracción del número de componentes en el lote original. Las formas de tipo C son causadas por defectos latentes, que pueden darse en cualquier momento de la vida de un componente.

Sin embargo, la tasa de fallas a través de la vida de un componente puede ser incrementada debido a la severidad de uso. La fatiga o desgaste de los sistemas o alguna de sus partes produce una probabilidad acumulativa de falla que origina la forma del tipo W, o de mecanismo de desgaste, presentada en la figura 33. Una forma tipo W es a menudo denominada una curva "Gaussiana" aunque su distribución estadística es del tipo gamma. La presencia de una curva W indica alguna variedad de deterioro, ya sea eléctrica, mecánica, física, o de otra naturaleza.

Cuando se encuentra una tasa desusadamente alta de falla inicial hasta que los defectos adulterantes son eliminados y después la vida puede proseguir en una forma del tipo C, entonces la curva de vida se denomina tipo T. Estas curvas se encuentran en las de mortalidad infantil y en las curvas de vida humana.

Existen diferentes tipos de tales transitorios iniciales, que en general se denominan tipos T, T2, U, D, etc., y que se agrupan bajo el nombre de forma tipo T, ilustrada en la fig. 34. En general, transitorios de este tipo son causados por adulteración de un lote por medio de una fracción de inferior calidad (adulteración no necesariamente intencional).

La figura 35 presenta una forma tipo N. Este tipo de transitorios es generalmente causado por el uso de los componentes a un nivel mas severo que aquél para el cual fueron diseñados los componentes.

La figura 36 presenta una forma tipo V. Esta curva presenta un transitorio intermedio, que puede apreciarse sólo después de cierto tiempo de vida, sube luego a una tasa de falla máxima

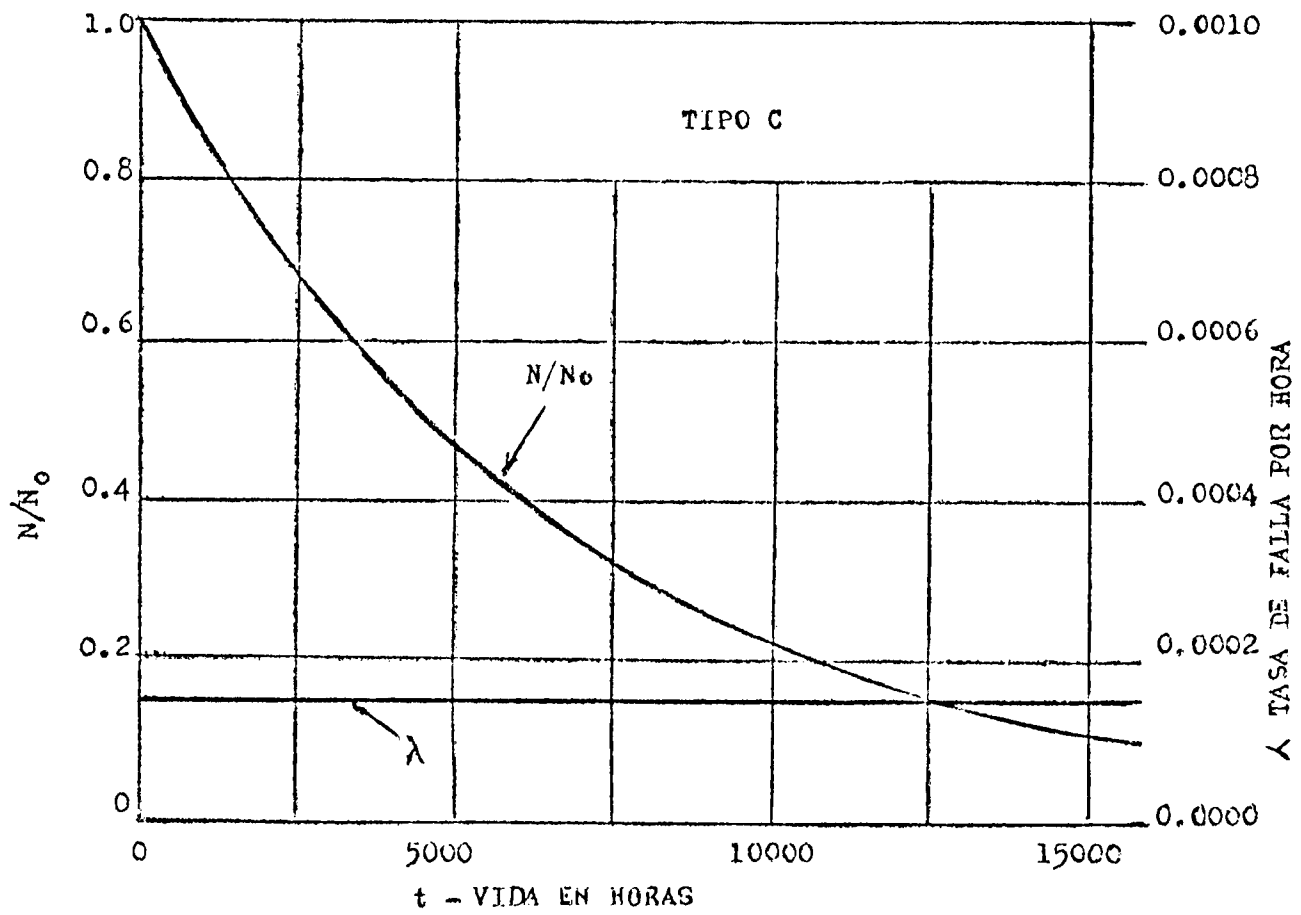


Figura 32

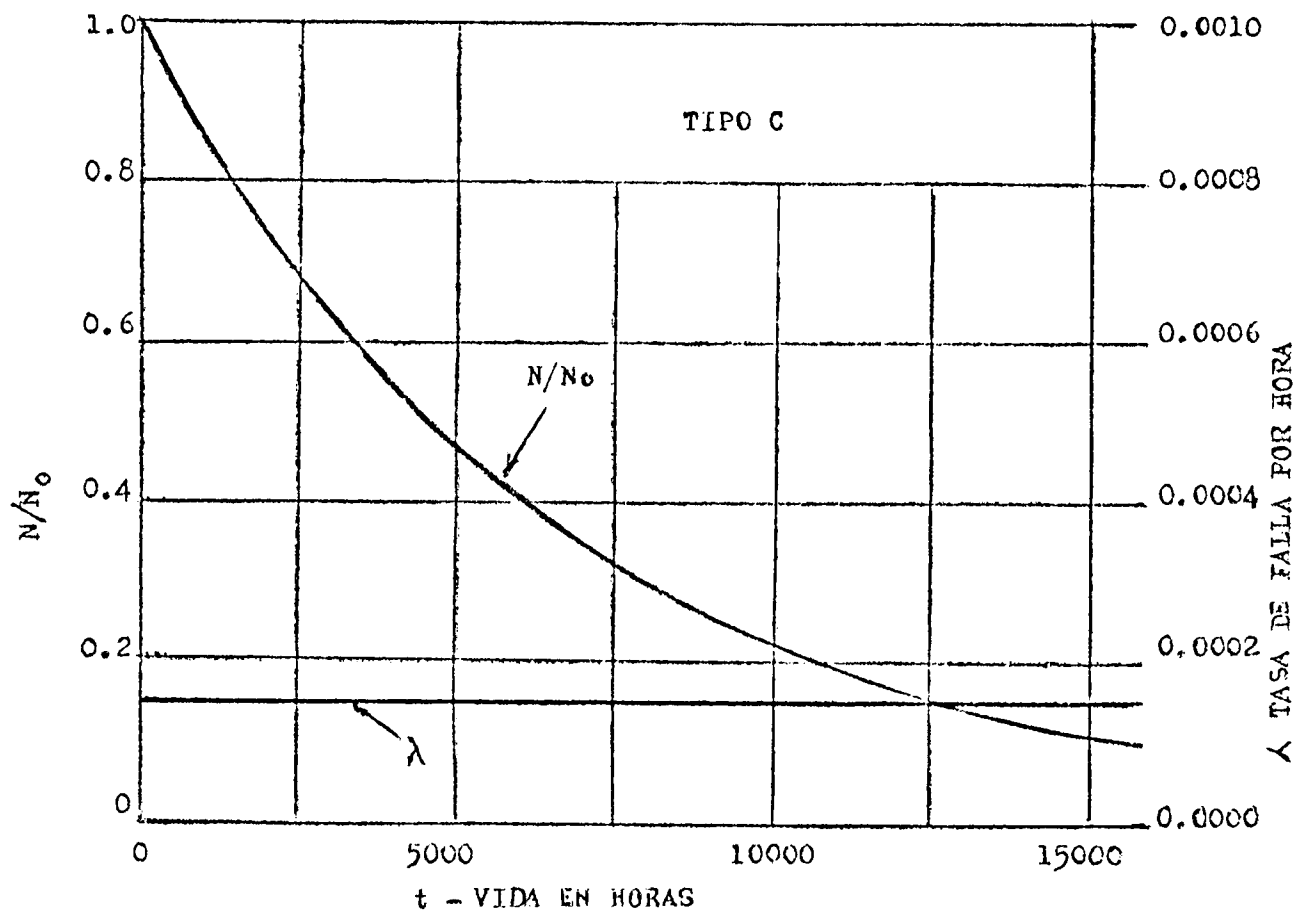


Figura 32

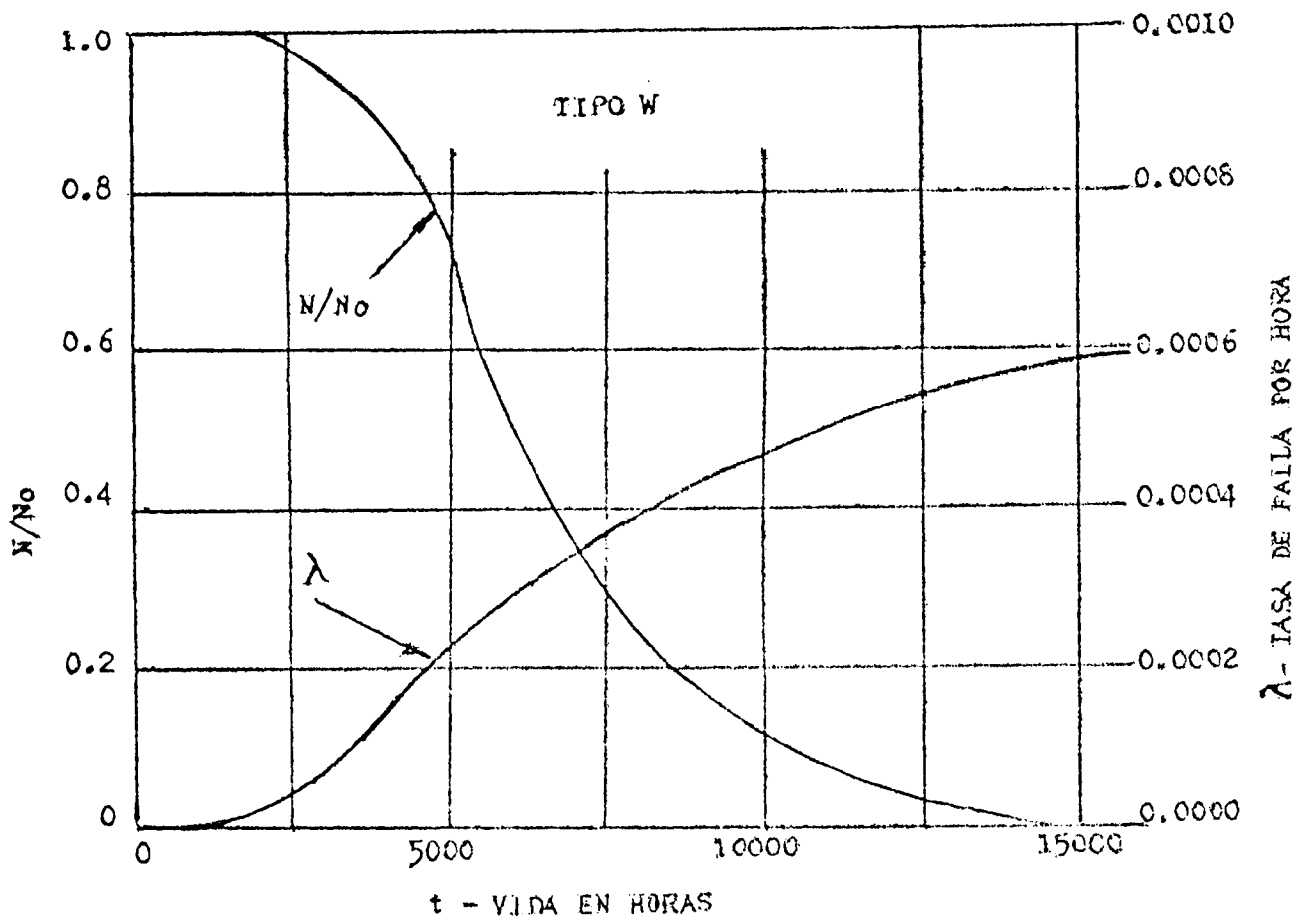


Figura 33

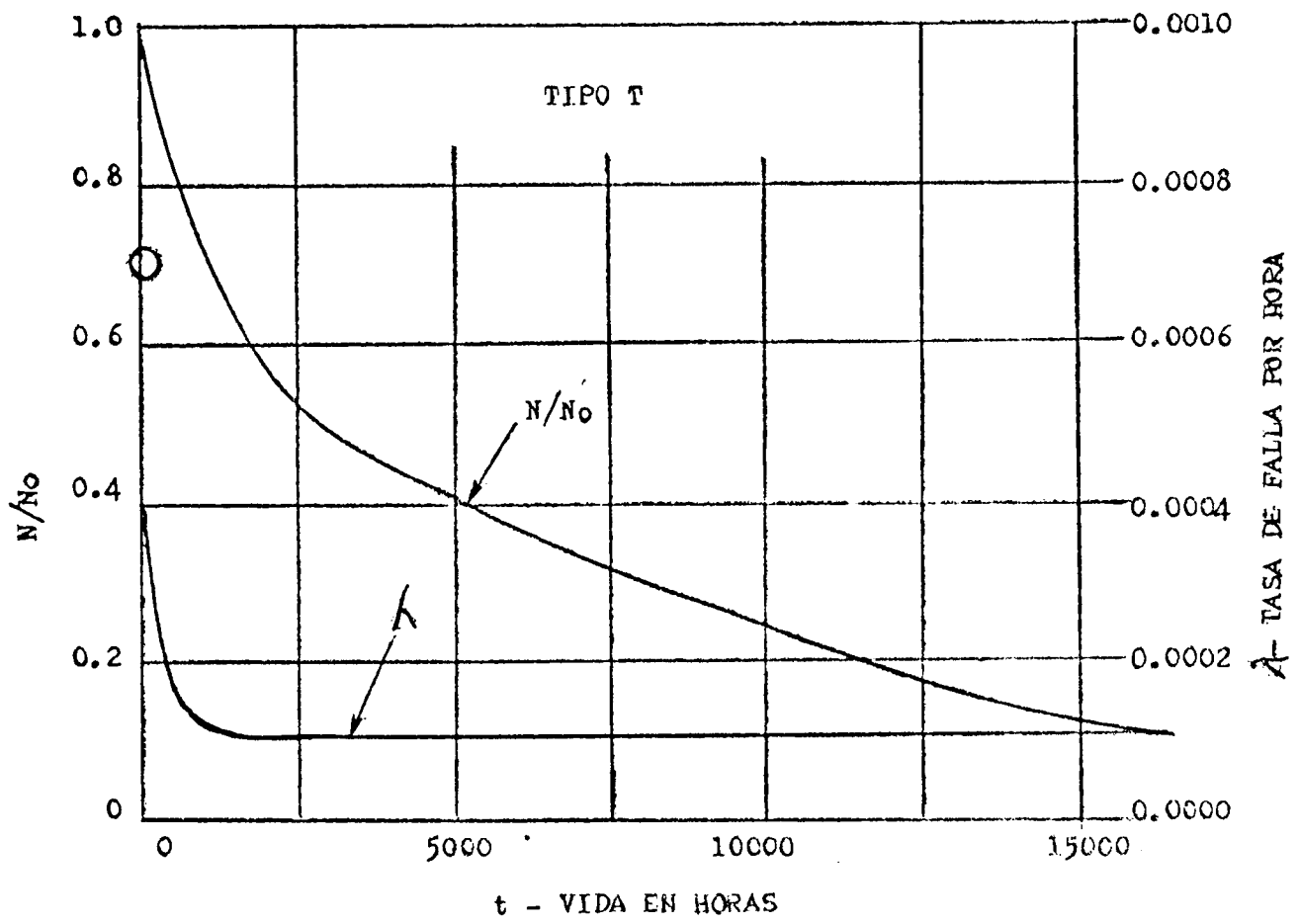


Figura 34

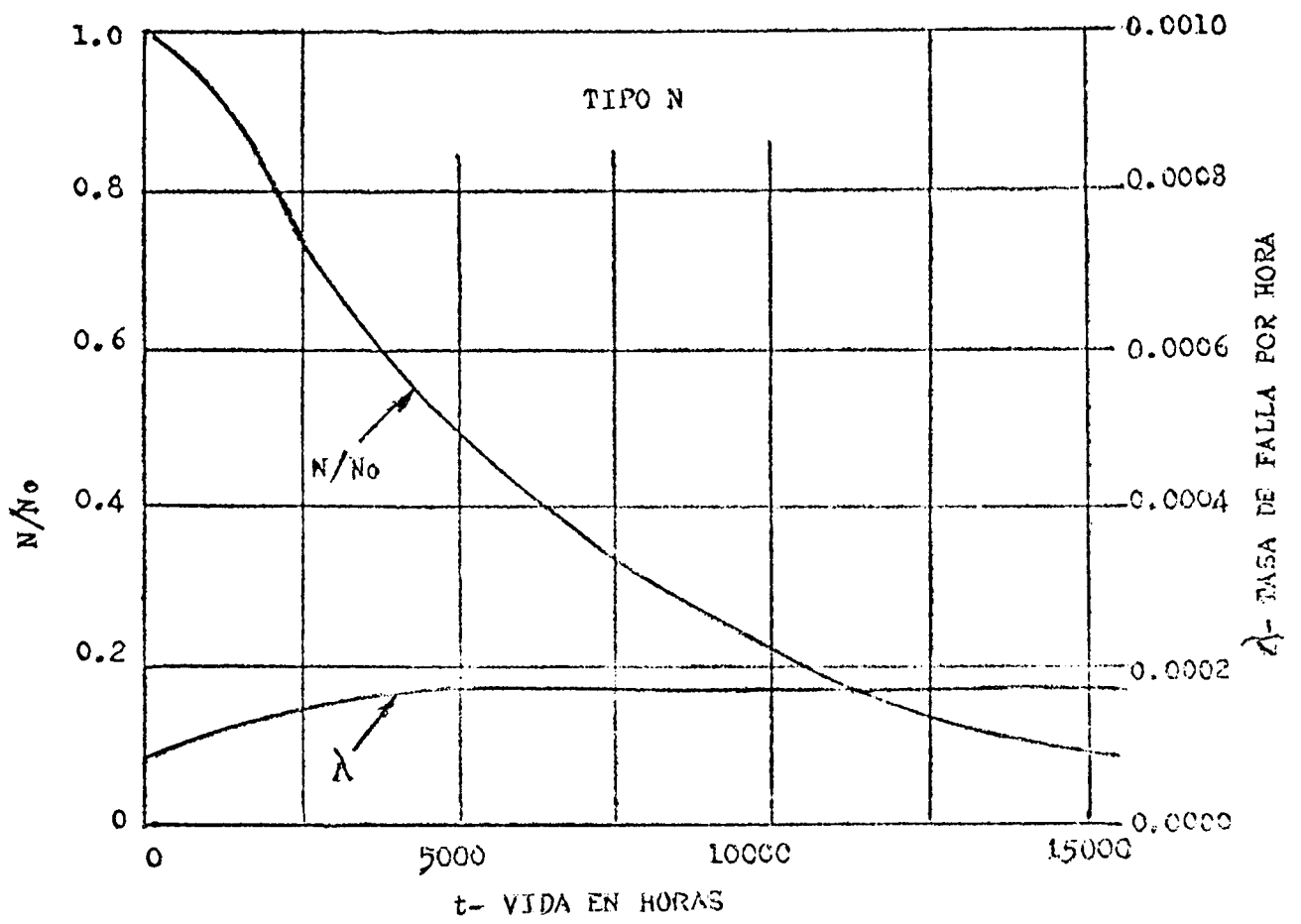


Figura 35

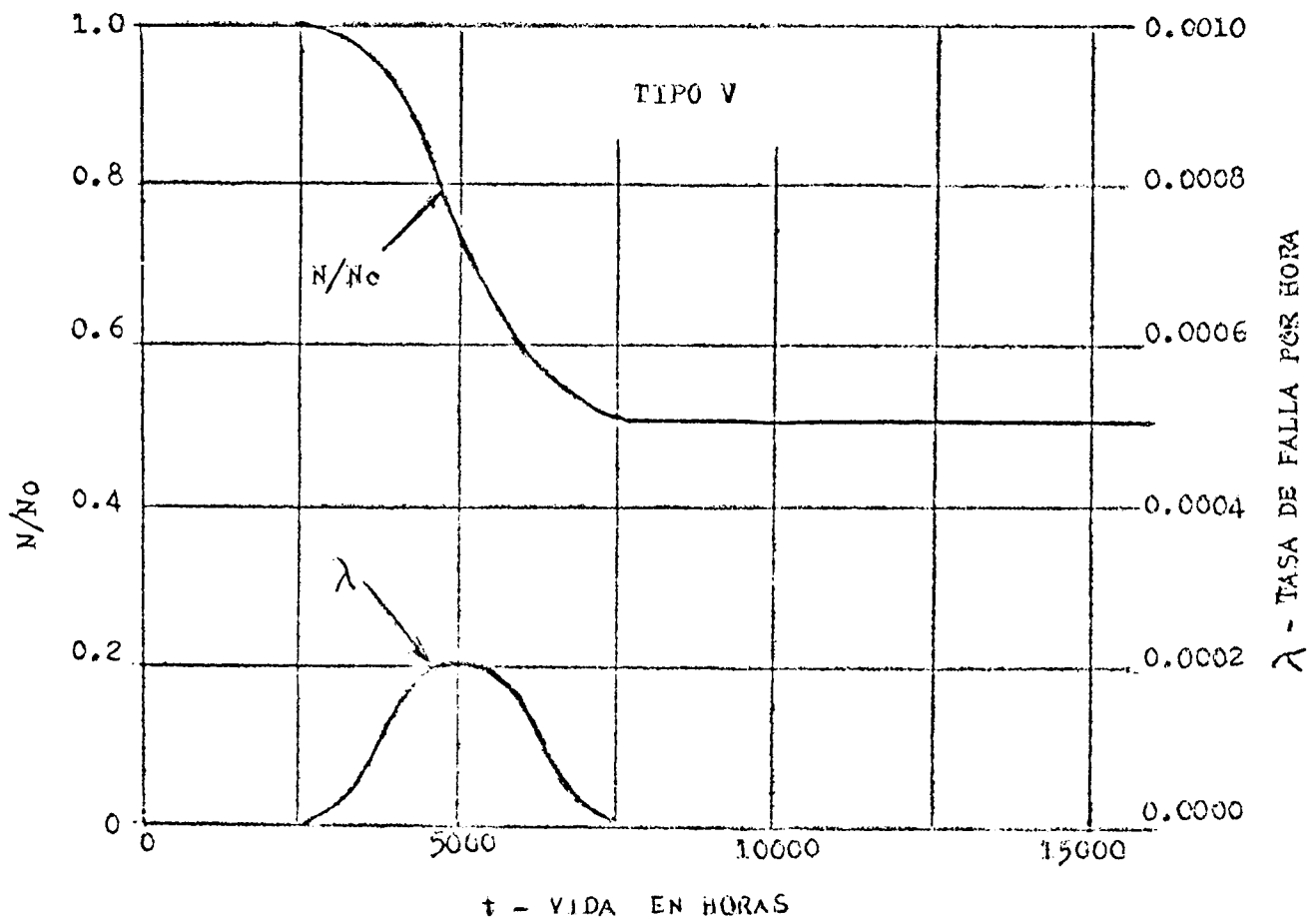


Figura 36

y luego decrece al valor a una tasa de falla determinada por otros tipos de fallas. Las formas tipo V son causadas por la adulteración de un lote por una fracción de componentes que posea características de desgaste anormales y más frecuentes que las del lote principal.

La mayoría de las curvas de vida están compuestas por más de una de las cinco formas básicas, y pueden contener mas de un tipo de transitorio de cada una de las formas. Por ende, las curvas de vida son relativamente complejas, y muy ocasionalmente se encuentran casos en los que sólo una forma predomine. La figura 30 presenta una de estas curvas compuestas. A menudo se encuentra que mientras un solo tipo de forma de vida puede ser relativamente simple de computar para obtener un dado resultado, la combinación de las formas usuales son difíciles de operar para lograr resultados exactos. Cuando los componentes no se adaptan a ninguna de las formas basicas se suele utilizar la función de Weibull mencionada anteriormente.

Como se dijo anteriormente, se desconoce la curva de vida de muchos componentes incluso algunos de uso comun. En esos casos solo se suele disponer del valor de la tasa de fallas en la zona de vida util. Se presentan a continuación los valores publicados de esas tasas de falla para algunos componentes especiales y para algunos equipos utilizados en los reactores nucleares.

Componente	$10^{-6}/h$
Reles	0.1-1
Soldaduras	10^{-8}
Wrapping	10^{-11}
Thermistors	0.3
Vibradores	10-40
Cristales de cuerpo	0.2
Fusibles	0.1
Lámparas de neón	0.2
Lámparas incandescentes	1
Instrumentos de bobina móvil	0.5

Equipo	Tasa de fallas $10^{-6}/h$
Transductor de presión diferencial	15-20
Transductor de presión diferencial	5-15
Transductor de temperatura	20
Monitores gamma G.M.	5-10
Bombas	5-10
Reguladores de temperatura	5.5
Reguladores de nivel de agua	15
Motores abre-válvulas	0.5
Generadores diesel	10.0
Turbogenerador de vapor	45.0
Transformadores de bloque	1.5
Llaves de alta tensión	0.3
Canales de medición	$10-10^3$
Fuentes de alimentación	20
Transformadores de aislación	0.3

