

Fiabilidad admisible de los sistemas de diseño^(*)

Por Prof. P. S. BÖRES

Catedrático de Puertos

E. T. S. de Ingenieros de Caminos, C. y P.

Se introducen los conceptos generales y la metodología de la FIABILIDAD ADMISIBLE DE LOS SISTEMAS DE DISEÑO, así como una primera estima, tentativa, de asignación de fiabilidad admisible. Se aplica esta estima a diversos casos prácticos: Presas (Ricobayo, Assuán), Puentes (Golden Gate), Naves (DC 10 S), Puertos (Bilbao, Rota).

CONCEPTOS GENERALES

Esta investigación es la obligada continuación de nuestras publicaciones de los tres últimos años, principalmente en esta Revista, en la que se introduce la Metodología para la determinación de la FIABILIDAD DE RUPTURA por FALLO elemental o integral, local y global de los SISTEMAS DE DISEÑO refiriéndonos especialmente a los SISTEMAS ESTRUCTURALES, de los que consideramos en detalle dos componentes: La componente elemental de fallo gradual del manto principal de los diques de escollera y la componente elemental de fallo instantáneo de los pantalanos.

Para mejor comprender la RUPTURA de los SISTEMAS ESTRUCTURALES podemos considerar el ejemplo del pantalan, imaginando a éste dotado de una serie de sensores en todos y cada uno de los puntos de sus elementos.

Como ya hemos señalado, la acción de los agentes ambientales, antrópicos, etc., transferida por los elementos estructurales del pantalan, produce en cada punto unas solicitaciones —registradas por los sensores— que como las acciones son, generalmente, procesos estocásticos [6], [8], [14].

Evidentemente la RUPTURA DEL SISTEMA ESTRUCTURAL ocurre cuando en uno de los puntos se produce una solicitación, deformación, fatiga, etcétera, superior a la que es capaz de resistir la sección.

Nuestro problema es ahora determinar si la PROBABILIDAD DE RUPTURA DEL SISTEMA ESTRUCTURAL o su correspondiente FIABILIDAD [1], [2], [13] es la adecuada, la que debiera haberse considerado en un DISEÑO correcto.

Generalmente las REALIZACIONES sólo son ELEMENTOS —SUBSISTEMAS— de SISTEMAS de

rango superior. Tal es el caso de los diques de abrigo, de los puentes, etc., que sólo son elementos de un puerto, de una carretera, etc. A su vez, tanto el puerto como la carretera serán, muy probablemente, simples elementos de otros sistemas de rango superior, seguramente de algún SISTEMA DE TRANSPORTE. Tales SISTEMAS DE TRANSPORTE serán, a su vez, muy probablemente, SUBSISTEMAS de un SISTEMA REGIONAL, o de un SISTEMA INTEGRADO DE TRANSPORTE de ámbito nacional, continental, etc.

Si por un proceso de agregación, sintético, puede alcanzarse un límite superior del rango —TOP— de cualquier clase de sistema funcional, estructural, etc., por un proceso contrario, analítico, puede alcanzarse así mismo un límite inferior del mismo —BASE—. En efecto, los ELEMENTOS del dique —espaldón, manto principal, etc., del puente, tablero, etc.—, no tienen posibilidad de existencia «separada» del sistema, constituyendo así ejemplos de SISTEMAS ESTRUCTURALES BASE.

Por supuesto, sólo desde un punto de vista funcional son posibles sistemas multisectoriales y/o de ámbito nacional, continental o global. La máxima complejidad de algunos sistemas estructurales se alcanza, precisamente, en casos tan sencillos como los diques de escollera, los puentes, las presas, etcétera, que constituyen así SISTEMAS ESTRUCTURALES TOP.

Denominamos SISTEMAS SIMPLES a aquellos que, como en los anteriores ejemplos —diques de escollera, puentes, etc.—, son a la vez BASE o TOP no teniendo elementos separados ni pudiendo integrarse en sistemas de rango superior de su misma clase. Muchas de las REALIZACIONES del hombre constituyen SISTEMAS ESTRUCTURALES SIMPLES.

Los SISTEMAS SIMPLES tienen existencia «per se», pudiendo estar integrados en una variedad de sistemas, no estructurales, de rango superior. Por ejemplo, un dique de escollera puede estar inte-

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, se pueden remitir a la Redacción de esta Revista, hasta 30 de junio de 1980.

grado, ser elemento, de un sistema de transporte, o pertenecer a un sistema de defensa de costas. Un puente puede estar integrado en un sistema ferroviario, en un sistema hidráulico, etc.

Los SISTEMAS FUNCIONALES, de TRANSPORTE, etcétera, pueden ser SIMPLES o MÚLTIPLES. Son sistemas de transporte simples el funicular de la Casa de Campo, la cinta transportadora de Fosbucraa, etc.

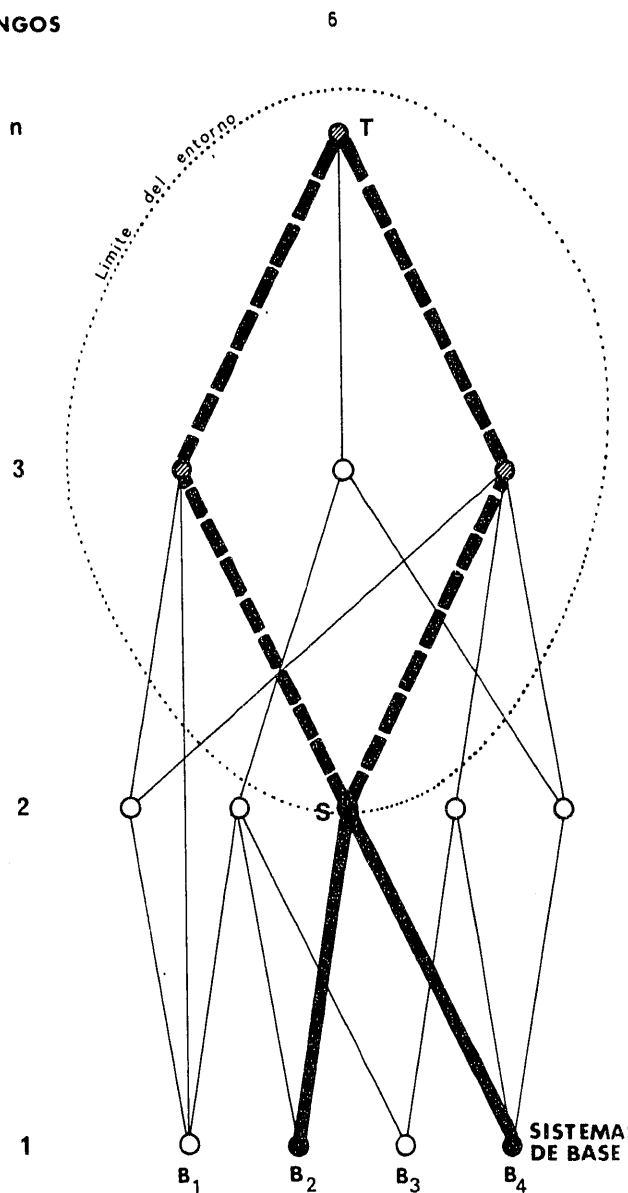
Decidida la FIABILIDAD DE DISEÑO DEL SISTEMA DE MAYOR RANGO se asignará la FIABILIDAD de los SUBSISTEMAS —SISTEMAS de los sucesivos rangos inferiores— hasta el SISTEMA BASE en la forma que veremos en el apartado siguiente. Esta decisión, sin embargo, es prácticamente imposible en muchos casos, con actividades multisectoriales y/o ámbitos supra-regionales, cuya complejidad es enorme. En tales casos la DECISION sobre la FIABILIDAD ADMISIBLE DEL SISTEMA DE DISEÑO deberá tomarse sobre un sistema de rango intermedio y muy frecuentemente sobre el SISTEMA BASE, particularmente si éste es un SISTEMA SIMPLE de alguna CLASE DE FALLO. En cualquier caso, nunca deberá olvidarse, como veremos más adelante, la existencia del conjunto de sistemas de rango superior al de diseño, conjunto al que denominaremos ENTORNO y al cual éste se encuentra vinculado.

En la DECISION DEL SISTEMA DE DISEÑO y su FIABILIDAD ADMISIBLE deben, así mismo, tenerse siempre muy presentes las siguientes consideraciones:

a) EXISTE una dependencia unívoca entre las componentes de fallo de un sistema en serie, no redundante, de manera que el fallo funcional de un sistema no afecta al fallo estructural de sus elementos. Sin embargo, el fallo estructural de los elementos de un sistema en serie, no redundante, sí afecta, necesariamente al fallo funcional. En consecuencia, la fiabilidad de las componentes estructurales de un sistema suele y probablemente deberá ser muy superior a la de las componentes de fallo funcional.

b) En general, NO EXISTE dependencia unívoca entre las componentes de las distintas clases de fallo de un sistema redundante. Sin embargo, el sistema pierde calidad económica, social, ambiental, etc., al hacerse más caro, peligroso, etc., el servicio por otra RUTA, con otra estrategia. Por tal motivo se procura que los sistemas de gran responsabilidad social, económica, etc. —tales como algunos servicios sanitarios, de abastecimiento, etcétera— sean muy redundantes, lo que aumenta su fiabilidad a niveles increíbles, aunque sea a costa de que algunas RUTAS o ESTRATEGIAS sean exageradamente caras, peligrosas, etc. Un caso extremo de redundancia intencional es el del sistema de seguridad de las centrales nucleares.

RANGOS



S — SISTEMA DE DISEÑO

T — SISTEMA TOP

B_i — SUBSISTEMAS O ELEMENTO DE S.

Fig. 1.—Esquema sistémico.

FIABILIDAD ADMISIBLE DE UN SISTEMA DE DISEÑO

En términos de probabilidad la SEGURIDAD ABSOLUTA, a todas y cada una de las clases de FALLO —MATERIAL, ESTRUCTURAL, FUNCIONAL AMBIENTAL, etc.— es una utopía. El RIESGO siempre existe. En general, deberían ser más SEGUROS los SISTEMAS cuyo FALLO —cuya RUPTURA— puede ocasionar la pérdida de vidas humanas, afecta

FIABILIDAD ADMISIBLE DE LOS SISTEMAS DE DISEÑO

la seguridad nacional, a integridad del medio y/o producir la pérdida y/o inmovilización de bienes importantes.

No debe valorarse, así, únicamente la IMPORTANCIA ECONOMICA DEL FALLO, sino, también, y en ciertos casos de manera preponderante, la IMPORTANCIA DE SU ENTORNO, definido sistemáticamente, como en el apartado anterior.

La DECISION sobre la FIABILIDAD a adoptar en caso debe depender, así, de la IMPORTANCIA de la ACTIVIDAD o ACTIVIDADES —DEFENSA, PRODUCCION, SERVICIOS, RECREO, etc.— y del SECTOR o SECTORES —AEREO, NAVAL, TERRESTRE, en el caso de la DEFENSA; MINERO, AGRARIO, etcétera, en el caso de la PRODUCCION; TRANSPORTES, etc., en el caso de los SERVICIOS, etc.— del ENTORNO DEL SISTEMA, así como del AMBITO —NACIONAL (o COMUNITARIO), REGIONAL o LOCAL—.

El FALLO —la RUPTURA— de ciertos SISTEMAS puede influir decisivamente sobre la integridad de sus correspondientes ENTORNOS, pudiendo ser la NECESIDAD DEL SISTEMA DE DISEÑO absoluta, lo que convierte a éste en INDISPENSABLE, o no, perturbando al ENTORNO sólo en menor o mayor grado.

Por ejemplo, un puente ferroviario, el sifón de un trasvase, etc., son SISTEMAS ABSOLUTAMENTE NECESARIOS, INDISPENSABLES, sin cuyo funcionamiento es imposible el del SISTEMA FERROVIARIO de aquella RUTA, el del SISTEMA DE TRASVASE, etc.

Concepto complementario del de NECESIDAD es el de MANTENIBILIDAD o MANTENIMIENTO, pues cualquier FALLO puede ser intrascendente para el ENTORNO si existe la posibilidad de REPARACION o RECAMBIO DEL SISTEMA. Por ejem-

plo, existe la posibilidad de REPARACION o RECAMBIO, sustitución, inmediata de un autobús. No existe, sin embargo, posibilidad de REPARACION, y menos de SUSTITUCION, inmediata de un puente con fallo estructural.

FACTOR DE FIABILIDAD DE DISEÑO de gran IMPORTANCIA en los SISTEMAS ESTRUCTURALES y en ciertos SISTEMA FUNCIONALES relacionados con las centrales nucleares, las industrias químicas de alta toxicidad, etc., es la PELIGROSIDAD.

Por las consecuencias del FALLO, de la RUPTURA, del SISTEMA DE DISEÑO distinguimos tres órdenes de PELIGROSIDAD:

ACCIDENTAL
CATASTROFICA
GENETICA

Consideramos que la PELIGROSIDAD DEL FALLO de un SISTEMA es ACCIDENTAL cuando sus efectos se restringen al marco personal, individual, y al presente, aunque pueda haber varios individuos afectados y alguno pueda quedar inválido. Tal es el caso de la mayor parte de los accidentes de circulación, de los accidentes laborales, etc.

Cuando las consecuencias del FALLO DEL SISTEMA alcanzan a un gran número de personas, como es el caso de la rotura de presas, de accidentes de aviación, etc., afectando al cuerpo social, la PELIGROSIDAD será denominada CATASTROFICA.

En los órdenes anteriores se excluye todo daño genético a la especie. En tal caso la PELIGROSIDAD será denominada GENETICA.

El FALLO de un SISTEMA puede afectar al MEDIO y/o al hombre. Esta segunda alternativa debería considerarse como de rango superior a la primera, en un orden. Por otra parte, la PELIGROSIDAD

ACTIVIDADES/REALIZACIONES/AMBITOS. (Primer listado (1979), con ejemplos.)

ACTIVIDAD (AMPO)	SECTOR	REALIZACION OBRA	AMBITO
DEFENSA	AEREO NAVAL TERRESTRE	BASE NAVAL	
PRODUCCION	MINERA AGRARIA		
SERVICIOS	COMUNICACIONES TRANSPORTES	PUERTO COMERCIAL	NACIONAL (o COMUNITARIO): Rotterdam REGIONAL: La Coruña LOCAL: Burriana, Torrevieja

FIABILIDAD ADMISIBLE DE LOS SISTEMAS DE DISEÑO

DAD puede ser en ciertos casos CONTROLADA, como en las instalaciones militares, en las que, generalmente, está prohibido el paso, o en los diques, en donde los días de temporal puede impedirse pasar. En la mayor parte de los SISTEMAS al menos algún tipo de PELIGROSIDAD es INCONTROLADA.

Las consideraciones anteriores nos muestran que, además del COSTE derivado directamente del FALLO del SISTEMA, existen otros FACTORES dependientes del ENTORNO y del MEDIO también afectados por el FALLO y cuya valoración no siempre puede realizarse en un contexto económico. La IMPORTANCIA de estos FACTORES debe, es obvio, influir sobre la FIABILIDAD DE DISEÑO de los SISTEMAS, pudiendo ser en algunos casos decisiva.

Admitiremos, así, que la FIABILIDAD ADMISIBLE de un SISTEMA DE DISEÑO debe ser función de su IMPORTANCIA TOTAL (I), económica, social, ambiental, estética, etc.

$$\phi = \phi(I) \quad (1)$$

siendo esta IMPORTANCIA, (I), dependiente en un primer análisis de los cuatro FACTORES siguientes:

- ENTORNO DEL SISTEMA, función de la ACTIVIDAD y AMBITO de aquél.
- COSTE derivado del FALLO, de la RUPTURA, del SISTEMA, en el propio SISTEMA, en el ENTORNO y en el MEDIO, incluido el DAÑO PSICOLOGICO.
- NECESIDAD del SISTEMA dentro del ENTORNO.
- PELIGROSIDAD derivada del FALLO, de la RUPTURA, del SISTEMA.

es decir:

$$I = I(\text{Entorno, Costo, Necesidad, Peligrosidad}) \quad (2)$$

Como ya hemos señalado, todos los FACTORES DE IMPORTANCIA dependen a su vez de otros: De la ACTIVIDAD y AMBITO en el caso de ENTORNO; del DAÑO PSICOLOGICO, con pérdida de IMAGEN, en el de COSTO; de la MANTENIBILIDAD en el de NECESIDAD; de las CONSECUENCIAS —de orden individual, catastrófico o genético— en el de PELIGROSIDAD.

En cada caso, pues, cada uno de los cuatro FACTORES DE IMPORTANCIA tendrá un PESO, como se indica en el correspondiente cuadro de FACTORES DE IMPORTANCIA, pudiendo con ellos escribirse en cada caso el funcional (2) en la forma particular:

$$I = I(F_{E, i, j} ; F_{C, k} ; F_{N, l} ; F_{P, m}) \quad (3)$$

Dentro del ENTORNO PARTICULAR ($F_{E, i, j}$), COSTE ($F_{C, k}$), NECESIDAD ($F_{N, l}$) y PELIGROSIDAD ($F_{P, m}$), cada SISTEMA tendrá su RANGO, su GRADO, que al depender de gran número de variables sólo cabe considerar en términos estadísticos.

El conocimiento de las correspondientes distribuciones nos permite, entonces, conocer con exactitud el GRADO DE IMPORTANCIA de cada FACTOR DEL SISTEMA. Ponderando estos GRADOS con los PESOS de los correspondientes FACTORES podremos obtener, finalmente, la IMPORTANCIA TOTAL DEL SISTEMA.

FACTORES DE IMPORTANCIA. (Primer listado.)

ENTORNO	ACTIVIDAD/AMBITO	NACIONAL	REGIONAL	LOCAL
	DEFENSA PRODUCCION/SERVICIOS RECREEO	$F_{E, 1, 1}$ $F_{E, 2, 1}$ $F_{E, 3, 1}$	$F_{E, 1, 2}$ $F_{E, 2, 2}$ $F_{E, 3, 2}$	$F_{E, 1, 3}$ $F_{E, 2, 3}$ $F_{E, 3, 3}$
COSTE (*)	IMAGEN	MAYOR $F_{C, 1}$	MEDIA $F_{C, 2}$	MENOR $F_{C, 3}$
NECESIDAD	MANTENIBILIDAD (**)	MAYOR $F_{N, 1}$	MEDIA $F_{N, 2}$	MENOR $F_{N, 3}$
PELIGROSIDAD		GENETICA $F_{P, 1}$	CATASTROFICA $F_{P, 2}$	ACCIDENTAL $F_{P, 3}$

(*) COSTE DEL FALLO, incluidos los BIENES DEFENDIDOS.

(**) Posibilidad de REPARACION o SUSTITUCION.

FIABILIDAD ADMISIBLE DE LOS SISTEMAS DE DISEÑO

FIABILIDAD DE DISEÑO DE LAS COMPONENTES

En el estudio de FIABILIDAD de los SISTEMAS DE DISEÑO es de gran interés la valoración de la FIABILIDAD de las distintas COMPONENTES, una vez conocida la FIABILIDAD ADMISIBLE O DE DISEÑO DEL SISTEMA.

El análisis económico es el mejor criterio para la asignación de la FIABILIDAD ADMISIBLE O DE DISEÑO de las COMPONENTES, ya que ninguno de los tres FACTORES: ENTORNO, NECESIDAD y PELIGROSIDAD, ni sus GRADOS resultan afectados, por conservarse la FIABILIDAD DE DISEÑO DEL SISTEMA.

La FIABILIDAD de un SISTEMA DE DISEÑO viene dado por la expresión (4):

$$\phi = \phi_1 \cdot \phi_2 \dots = \prod_i \phi_i \quad (4)$$

y su COSTE PROBABLE por:

$$CP = CP_1 + CP_2 + \dots = \sum_i CP_i \quad (5)$$

Con un diseño correcto el COSTE PROBABLE de los ELEMENTOS afectados por el SISTEMA, CP , debiera ser mínimo, lo que nos permite, variando la FIABILIDAD de las COMPONENTES, con la condición (4), determinar las CARACTERISTICAS, las DIMENSIONES, OPTIMAS de los ELEMENTOS DEL SISTEMA.

En el caso de un SISTEMA DE DISEÑO de dos COMPONENTES, como puede apreciarse en la figura 2, al aumentar la fiabilidad de la componente (1), (ϕ_1) , el costo del elemento al que ésta corresponde aumentará. Por otra parte, al aumentar la fiabilidad de la componente (1) disminuye la fiabilidad de la componente (2), ya que, de acuerdo con la expresión (4), se verifica:

$$\phi_2 = \frac{\phi}{\phi_1}$$

disminuyendo, en consecuencia, su COSTE PROBABLE.

Como muestra la figura 2, el COSTE PROBABLE TOTAL del sistema:

$$CP = CP_1 + CP_2$$

tendrá un mínimo.

La extensión de este razonamiento a cualquier número de componentes es inmediata, ya que puede considerarse al sistema dividido en dos subsistemas y a éstos en otros dos hasta determinar la fiabilidad de todas las componentes. Cuando se trata de determinar la fiabilidad de uno solo de los elementos, como hacemos en el caso del DC 10 S,

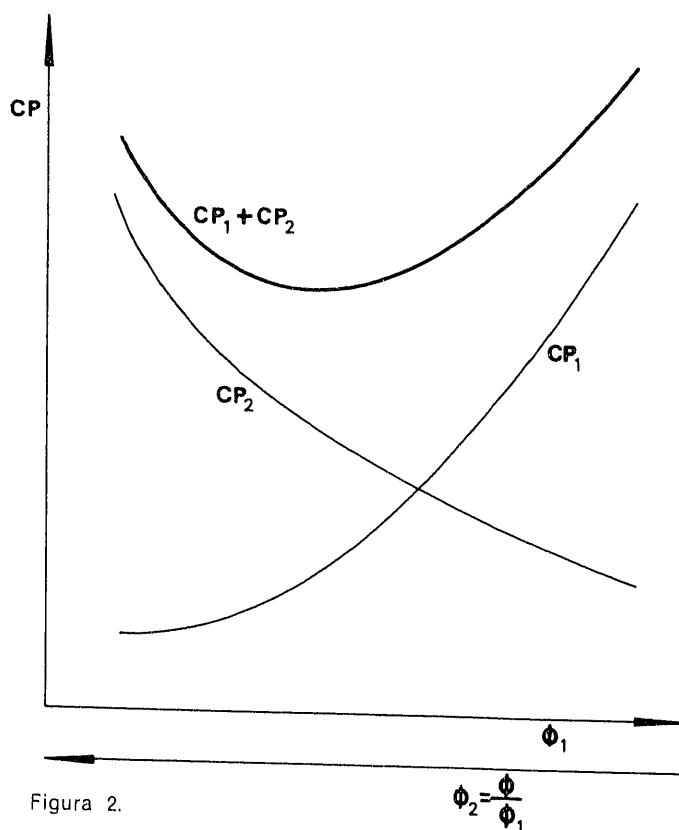


Figura 2.

basta considerar a éste como un subsistema, mientras que el resto del avión constituye el otro subsistema.

La asignación de la FIABILIDAD a las COMPONENTES debe realizarse con todas y cada una de las CLASES de SISTEMAS DE DISEÑO —FUNCIONAL, ESTRUCTURAL, etc.— pues ciertos elementos son comunes a dos o más CLASES de SISTEMAS. El valor superior obtenido debe ser considerado, en general, como FIABILIDAD DE DISEÑO.

PRIMERA ESTIMA DE LA FIABILIDAD DE DISEÑO DEL SISTEMA

Dada la gran urgencia en disponer de valores, aunque sólo sean ESTIMATIVOS de la FIABILIDAD de algunos SISTEMAS, para su aplicación a esta investigación admitimos las siguientes HIPOTESIS PROVISIONALES, TENTATIVAS:

1. Los PESOS medios de los dos factores ENTORNO y NECESIDAD y los PESOS menores del COSTO y PELIGROSIDAD son iguales a uno, es decir:

$$F_{E,2,2} = F_{N,2} = F_{C,1} = F_{P,1} = 1$$

2. Las relaciones entre los PESOS de cada FACTOR son sencillas, de razón dos, potencial en

FIABILIDAD ADMISIBLE DE LOS SISTEMAS DE DISEÑO

FACTORES DE IMPORTANCIA. (PRIMERA ESTIMA, TENTATIVA.)

ENTORNO	ACTIVIDAD/AMBITO	NACIONAL	REGIONAL	LOCAL
	DEFENSA	1/4	1/2	1
	PRODUCCION/SERVICIOS	1/2	1	2
	RECREO	1	2	4
COSTE (*)	IMAGEN	MAYOR 1/4	MEDIA 1/2	MENOR 1
NECESIDAD	MANTENIBILIDAD (**)	MAYOR 2	MEDIA 1	MENOR 1/2
PELIGROSIDAD		GENETICA 10 ²	CATASTROFICA 10 ¹	ACCIDENTAL 10 ⁰

(*) COSTE DEL FALLO, incluidos los BIENES DEFENDIDOS.

(**) Posibilidad de REPARACION o SUSTITUCION.

GRADOS DE IMPORTANCIA (RANGOS). PRIMERA ESTIMA, TENTATIVA

SISTEMAS	RANGO	MENOR	MEDIO	MAYOR
	ORDINARIOS	0.5	0.75	0.9
	EXTRAORDINARIOS	0.9	0.95	0.99
	EXTREMOS	0.99	0.999	0.9999

todos los casos excepto en el PELIGROSIDAD, que admitimos otra escala, exponencial, con base diez.

3. El GRADO DE IMPORTANCIA de cada FACTOR admite tres niveles, correspondiendo a los conceptos de MAYOR, MEDIO Y MENOR, en cada uno de los tres casos:

ORDINARIO
EXTRAORDINARIO
EXTREMO

con los valores que se proponen en el cuadro.

4. Consideramos como primera estima de la IMPORTANCIA de un SISTEMA DE DISEÑO a la media geométrica de sus GRADOS ponderados por los PESOS de los correspondientes FACTORES, en la forma:

$$I = \left[\left(\prod_{i=1}^3 G_i^{F_i} \right)^{1/3} (G_4^{F_4}) \right]^{1/2} \quad (1)e$$

5. La función (1) admite desarrollo en serie y, como primera estima consideramos el término no lineal, con coeficiente una, es decir:

$$F = I \quad (2)e$$

En los cuadros a continuación se presentan la PRIMERA ESTIMA, TENTATIVA, de los PESOS que corresponden a las hipótesis (1) y (2) y los GRADOS que se proponen, de acuerdo con la hipótesis (3).

Para poder comparar resultados se aplican los valores de los PESOS y GRADOS de los cuadros a diferentes casos, comprendiendo un amplio espectro de las OBRAS del hombre.

PRIMERA ESTIMA, TENTATIVA, DE LA FIABILIDAD DE DISEÑO DE LAS COMPONENTES

Por los motivos apuntados en el apartado anterior, referidos al SISTEMA, en este apartado sólo con el objeto de obtener unos valores ORIENTATIVOS, que pueden ser tomados como INICIALES del método general presentado en el apartado «FIABILIDAD DE DISEÑO DE LAS COMPONENTES», admitimos las siguientes HIPOTESIS PROVISIONALES:

1. El COSTE PROBABLE, $C P_i$, de un ELEMENTO (i), es función creciente de su valor inicial, C e inversamente proporcional a su RIESGO ($1 - \phi_i$)

FIABILIDAD ADMISIBLE DE LOS SISTEMAS DE DISEÑO

FIABILIDAD DE DISEÑO ESTRUCTURAL (PRIMERA ESTIMA)

P U E N T E S

PASARELA	1 0.50	1 0.50	0.50 0.50	10 0.95	0.906	505 (*)
TORDESILLAS	0.50 0.90	0.50 0.75	0.50 0.90	10 0.95	0.947	923
GOLDEN GATE	0.50 0.95	0.50 0.95	0.50 0.99	10 0.99	0.989	4612
					ϕ	τ

(*) Ciclos: años.

FIABILIDAD DE DISEÑO ESTRUCTURAL (PRIMERA ESTIMA)

P R E S A S

PIEDRAS	1 0.50	1 0.50	1 0.75	10 0.90	0.864	342
RICOBAYO	0.50 0.75	0.50 0.95	1 0.75	10 0.99	0.977	2175
ASSUAN	0.50 0.99	0.50 0.999	1 0.99	10 0.999	0.9988	40180
					ϕ	τ

FIABILIDAD DE DISEÑO ESTRUCTURAL (PRIMERA ESTIMA)

N A V E S

CARGO	1 0.75	1 0.75	1 0.50	10 0.95	0.918	$4.66 \cdot 10^{-5}$ (*)
TRANSATLANTICO	0.50 0.90	0.25 0.99	1 0.75	10 0.99	0.981	$1.07 \cdot 10^{-5}$
DC 10 S	0.50 0.90	0.25 0.90	0.50 0.75	10 0.99	0.984	$1.81 \cdot 10^{-6}$
					ϕ	

(*) Ciclos: operaciones, viajes.

FIABILIDAD DE DISEÑO ESTRUCTURAL (PRIMERA ESTIMA)

P U E R T O S

ANUS	1 0.75	0.5 0.50	1 0.75	1 0.75	0.743	169 (*)
BILBAO	0.50 0.90	1 0.75	1 0.90	1 0.75	0.804	230
LOTA	0.25 0.99	1 0.9	1 0.99	1 0.75	0.849	306
					ϕ	τ

(*) Ciclos: años.

2. En el entorno del óptimo, el incremento del COSTE PROBABLE de la componente (1) es proporcional, de razón (k) y signo contrario al de la componente (2).

Corol.—En el entorno del óptimo las líneas CP_1 y CP_2 son rectas.

Como consecuencia de estas hipótesis provisionales podemos escribir:

$$\frac{C_1}{1 - \phi_1} = \frac{k C_2}{1 - \phi_2} \quad (3)e$$

y recordando que:

$$\phi = \phi_1 \phi_2 \quad (4)e$$

inmediatamente se deduce:

$$\phi_1 = \frac{\left| \frac{k C_2 - C_1}{C_1} + \left(\frac{k C_2 - C_1}{C_1} \right)^2 + 4 \frac{k C_2}{C_1} \phi \right|}{\frac{2 k C_2}{C_1}} \quad (5)e$$

Espectacular a este respecto es el caso de los aviones DC 10 S, cuyo fallo, que conmovió al mundo, se producía por el de un ELEMENTO DE COSTE ridículamente pequeño, comparado con el de los restantes ELEMENTOS DEL SISTEMA, de la aeronave.

Como parece demostrar la investigación realizada la FIABILIDAD DEL PASADOR posterior de sujeción de los reactores delanteros, probablemente era inferior a la FIABILIDAD CONJUNTA del resto de las COMPONENTES DEL SISTEMA, de la aeronave. Admitiendo que fuese igual, recordando los resultados del apartado anterior, inmediatamente se deduce:

$$\phi_{pas.} = \phi^{1/2} = |0.986|^{1/2}$$

$$\phi_{pas.} = 0.99298$$

El COSTE de un DC 10 S es del orden de cuarenta millones de dólares:

$$C_1 = 40.000.000$$

mientras que el del pasador, incluso convenientemente dimensionado, no hubiera pasado de los diez mil dólares, aunque la adaptación de los nuevos pasadores ha costado del orden de los quinientos mil dólares. Así:

$$C_2 = 10.000$$

De la expresión (3)e inmediatamente se deduce, considerando que ($k = 1$):

$$\phi_{pas.} = 0.9999965$$

BIBLIOGRAFIA GENERAL

- [1] BAZOVSKY: "Reliability Mathematics: Fundamentals". McGraw-Hill Book Co. New York, 1916.
- [2] BORES, P. S.: "Multivariate Risk and Optimum Economic Analysis in Maritime Structures". Symposium on Rubble Mound Breakwaters. Isle of Wight. Reprinted in R.O.P. April 1979. Madrid, 1977.
- [3] BORES, P. S.: "Análisis Aleatorio Multivariado: Terminología y Conceptos Básicos". R.O.P. Noviembre. Madrid, 1977.
- [4] BORES, P. S.: "Sistemas Aleatorios Multivariados de Estabilidad". R.O.P. núm. 3168. Madrid, 1979.
- [5] BROWN, D. B.: "Systems Analysis and Design for Safety". Prentice Hall Inc. New Jersey, 1976.
- [6] FELLER, D.A.S.: "An Introduction to Probability Theory". Volume 1: John Wiley and Sons Inc. New York, 1957.
- [7] GINEDENKO, B. V., and others: "Mathematical Methods of Reliability Theory". Academic Press. New York, 1968.
- [8] GUMBEL, E. J.: "Statistics of Extremes". Columbia Univ. Press. New York, 1968.
- [9] PIERUSCHA, E.: "Principles of Reliability". Prentice Hall Inc. New Jersey, 1963.
- [10] POLOVKO, A. M.: "Fundamentals of Reliability Theory". Academic Press. New York, 1968.
- [11] RASMUSSEN, N. C.: "Reactor Safety Study". Nat. Tech. Information Service. Virginia, 1975.
- [12] WEXLER, A. ed.: "Large Engineering Systems". Proc. Intern. Symposium. Pergamon Press, 1977.
- [13] WARLETA, J.: "Fiabilidad: Bases Teóricas y Prácticas". Inst. Nac. de Técnica Aeroespacial. Madrid, 1979.
- [14] WILKS, S. S.: "Mathematical Statistics". Wiley and Sons Inc. New York, 1961.