

Sistemas aleatorios multivariados de estabilidad. Aplicación a las Obras Marítimas^(*)

Por Prof. P. S. BORES

Catedrático de Puertos

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

Se introduce la Teoría General de los Sistemas Aleatorios Multivariados de Estabilidad aplicados a las Obras Marítimas. Se consideran las componentes de estabilidad y sus modalidades de fallo, así como su Análisis Aleatorio Multivariado. Se considera, finalmente, la fiabilidad de las componentes y la fiabilidad de los sistemas.

SISTEMA DE ESTABILIDAD. COMPONENTES

Todas las obras, tanto terrestres como marítimas, se construyen para realizar una cierta FUNCION —abrigo, vialidad, etc.— y como tales son ELEMENTOS de un SISTEMA DE JERARQUIA SUPERIOR —puerto, autopista, etc.— debiendo satisfacer un SERVICIO —acceso, conservación, etcétera— y tener ESTABILIDAD suficiente para resistir la ACCION CONJUNTA de todos los AGENTES AMBIENTALES —climáticos (atmosféricos e hidrosféricos), geodinámicos, etc.— ANTROPICOS, etcétera, durante su VIDA PREVISIBLE o de SERVICIO con una FIABILIDAD, o RIESGO DE FALLO, admisible.

Como la FUNCION y el SERVICIO, la ESTABILIDAD de las obras no depende, en general, si están debidamente proyectadas, de uno solo de sus ELEMENTOS —espaldón, manto principal, etcétera, en el caso de los diques de escollera— a una cierta ALTERNATIVA DE FALLO —vuelco, deslizamiento, etc., en el caso de los espaldones— sino de la de TODOS Y CADA UNO DE LOS ELEMENTOS A TODAS Y CADA UNA DE LAS ALTERNATIVAS DE FALLO POSIBLES. Dicho de otra manera y con carácter general, la ESTABILIDAD, SERVICIO y FUNCION de una obra considerados como SISTEMAS —SISTEMAS DE ESTABILIDAD, FUNCIONAL o de SERVICIO, que en general podemos denominar SISTEMAS DE DISEÑO— depende de la de TODAS SUS COMPONENTES.

Cada COMPONENTE de un SISTEMA DE DISEÑO, por otra parte, puede tener varias VARIABLES, EXOGENAS y/o ENDOGENAS. Por ejemplo, la COMPONENTE DE ESTABILIDAD de los diques de escollera *Fallo, por avería progresiva, del manto principal*, depende de las VARIABLES EXOGENAS AMBIENTALES —altura de ola, período, per-

sistencia, etc.— y, además, de ciertas VARIABLES ENDOGENAS, tales como la propia avería del manto.

Como ya señalábamos al introducir la terminología y conceptos básicos del análisis aleatorio multivariado de una componente, Bores (1977b), cuando un cierto agente —oleaje, viento, etc.— admite un modelo estocástico, tanto sus VARIABLES DE ESTADO —altura de ola significativa, período óptimo, velocidad del viento estándar, etcétera— como las VARIABLES DE ESTADO DE SUS RESPUESTAS sobre flotadores, obras, estructuras, etc., quedan perfectamente determinadas por sus distribuciones de probabilidad en el año medio —régimen de alturas de ola, régimen de oscilaciones, etc.— y en condiciones límites por sus correspondientes distribuciones extremas o, en su defecto, por sus distribuciones asintóticas.

Salvo casos excepcionales, como podría ocurrir con el diseño de algunos elementos de las centrales nucleares, de ciertas instalaciones y dispositivos militares, etc., en que es obligada la MAXIMA SEGURIDAD, no es lógico, ni económico, que todas las variables, de las acciones o de sus respuestas, se consideren en condiciones extremas, DISEÑO LIMITE [5].

Cuando alguna variable se presenta en condiciones extremas, lo más probable es que todas las restantes variables tengan valores moderados, quedando perfectamente determinadas por sus correspondientes regímenes anuales. Hemos denominado VARIABLE PRINCIPAL a la variable extremal, de acción o respuesta, del DISEÑO EXTREMAL [5].

Como las variables de una componente, los componentes de un sistema de diseño pueden ser INDEPENDIENTES o DEPENDIENTES, como en el caso de la componente de *fallo de estabilidad del espaldón al vuelco*, que depende de la avería del manto.

También, como con las variables, con las com-

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que pueden remitirse a la Redacción de esta Revista, hasta el 30 de junio de 1979.

ponentes de un sistema de diseño ocurre que algunas de ellas tienen una probabilidad tan pequeña, comparada con las de las otras componentes, que su inclusión en el ANALISIS ALEATORIO DEL SISTEMA es irrelevante. Denominamos entonces COMPONENTES CARACTERISTICAS de un SISTEMA DE DISEÑO a aquellas componentes que influyen decisivamente en el análisis aleatorio de éste y, en consecuencia, su inclusión en él es esencial.

Un primer listado de las COMPONENTES del SISTEMA DE ESTABILIDAD de los DIQUES DE ESCOLLERA no rebasables por el oleaje es:

Fallo, por avería progresiva, del manto principal.

Fallo por derrabe, en masa, del manto principal.

Fallo por descalce del manto principal.

Fallo por vuelco del espaldón.

Fallo por deslizamiento del espaldón.

Fallo por descalce del espaldón.

Fallo por deslizamiento profundo de la cimentación.

Fallo por asentamiento de la cimentación.

Fallo del núcleo.

Fallo de los mantos de filtro, secundarios.

A su vez, tanto el MORRO como el ARRANQUE DEL DIQUE actúan como SUBSISTEMA DE ESTABILIDAD, con sus correspondientes COMPONENTES.

Por diversas razones —constructivas, etc.— algunos de los ELEMENTOS de las obras, particularmente los más baratos, se sobredimensionan, con lo que la probabilidad de fallo de sus componentes llega a ser despreciable.

Con las secciones de DIQUES DE ESCOLLERA NO REBASABLES proyectadas usualmente en España, las COMPONENTES CARACTERISTICAS DEL SISTEMA DE ESTABILIDAD suelen quedar reducidas a dos: La de *fallo, por avería progresiva, del manto principal* y la de *fallo por vuelco del espaldón*.

En el caso de nuestro DIQUE REBASABLE ANULADOR DE ENERGIA, actualmente en construcción en la Toma de Agua de Refrigeración de la Central Térmica de Cubelles, la estabilidad al vuelco del espaldón es muy grande, debido a la anchura que éste necesita para instalar en él los conos anuladores de energía. En consecuencia, sobredimensionando los restantes elementos —núcleo, etc.— que en este caso son poco importantes económicamente, podemos considerar que el SISTEMA DE ESTABILIDAD queda constituido por una sola COMPONENTE CARACTERIS-

TICA: La de *fallo, por avería progresiva, del manto principal*.

ANALISIS ALEATORIO MULTIVARIADO DE LAS COMPONENTES DE ESTABILIDAD. FUNCION CRITICA DE FALLO

El FALLO de toda COMPONENTE DE UN SISTEMA DE ESTABILIDAD ocurre siempre según una de las tres alternativas siguientes, Bores (1968): Por UNA SOLA ACCION del agente principal, por VARIAS ACCIONES SEPARADAS, sin interacción, o por VARIAS ACCIONES CONSECUTIVAS INTERACTUANTES, con período cercano al del de la obra, pero tanto en la primera alternativa como en la tercera el FALLO es INSTANTANEO y total, mientras que en la segunda el FALLO es GRADUAL, con una FASE DE AVERIAS.

Esta dicotomía es, obviamente, aplicable a otros SISTEMAS DE DISEÑO, aunque en muchos casos sólo cabe, para todas las COMPONENTES DEL SISTEMA, la modalidad de FALLO INSTANTANEO.

Las variables exógenas de las acciones, sobrecargas, sollicitaciones, etc., de los agentes ambientales, antrópicos, etc., pueden ser relacionadas en el ANALISIS ALEATORIO MULTIVARIADO de CADA UNA DE LAS COMPONENTES DE ESTABILIDAD —por *fallo al vuelco del espaldón*, por *fallo al deslizamiento del espaldón*, por *fallo, por avería progresiva, del manto principal*, etc., etc., en el caso de diques de escollera —con las variables endógenas— estructurales, funcionales, etcétera— por medio de un modelo matemático, físico, etc., definido por la función

$$K(v_1, \dots, v_i, \dots) = 0$$

que caracteriza las CONDICIONES CRITICAS DE FALLO, TOTAL o PARCIAL, y sirve de límite de integración de la FUNCION DE DENSIDAD DE PROBABILIDAD (f),

$$(1) \quad F = \int_K f(v_1, \dots, v_i, \dots) dg(v_1) \dots dg(v_i) \dots$$

al NIVEL DE FALLO que se considere [4], [5].

Con la modalidad de FALLO INSTANTANEO sólo existe una alternativa, una sola HIPERSUPERFICIE CRITICA DE FALLO (K). Con FALLO GRADUAL caben tantas alternativas, tantas HIPERSUPERFICIES CRITICAS DE FALLO, como niveles de avería, de FALLO, se consideren, desde el cero al cien por cien.

En general, pueden considerarse seis u once niveles de avería (A_j) con los intervalos

$$(0/0,2/0,4/0,6/0,8/1)$$

y

$$(0/0,1/0,2/0,3/0,4/0,5/0,6/0,7/0,8/0,9/1)$$

respectivamente, aunque en ciertos casos puede ser suficiente una partición con tres niveles

(0/0.5/1)

Análisis previos —de política nacional, regional, empresarial, etc., de mercado, de operaciones, etc.— e incluso la propia realización del ANALISIS ALEATORIO MULTIVARIADO DE LAS COMPONENTES deciden, muy frecuentemente, la adopción de valores concretos de algunas variables, particularmente endógenas.

Si la desviación estándar de estas variables es muy pequeña, como sucede con algunas variables derivadas de ciertos procesos de fabricación, construcción, etc. —tales como la cota de coronación de los espaldones de los diques de escollera, el peso de los cantos del manto principal cuando aquéllos son artificiales, etc.— podemos considerarlas como PARAMETROS, deterministas, DEL SISTEMA.

El uso directo de las distribuciones de probabilidad de las variables características no es, evidentemente, más que una alternativa, la más simple, en la que se ponderan por igual todos los tipos de INFORMACION, DATOS, de PROYECTO y de CONSTRUCCION, admitiéndose, además, un comportamiento uniforme de la totalidad, de todos los puntos de la COMPONENTE. Se trata de un ANALISIS GLOBAL, ya que se considera a la COMPONENTE en su conjunto, como un todo.

La precisión de los DATOS depende de la abundancia y exactitud de las observaciones y de la del modelo adoptado. Las observaciones con registradores son, indudablemente, las más exactas, siempre que se realicen con la instrumentación, el programa y el proceso oportunos, pudiendo alcanzarse errores inferiores al cinco por ciento, mientras que las realizadas con métodos de previsión pueden superar ampliamente esta cifra, no sobrepasándose, probablemente, el diez por ciento con nuestro METODO INTEGRADO. Estos errores no se refieren a las observaciones en particular, sino en su conjunto, como distribución media anual o extremal de la variable característica.

La precisión del PROYECTO depende fundamentalmente de la adecuación del modelo adoptado —determinista o aleatorio— al comportamiento del prototipo y de su complejidad —número de variables y/o parámetros característicos considerados—. Deben introducirse uno o más coeficientes correctores si se utiliza, en predimensionamiento, un ANALISIS ALEATORIO UNIVARIADO y con mayor razón si aún se proyecta con un método determinista. La aplicación de estos coeficientes correctores, que pueden ser estimados en relación con los límites de confianza de las variables ca-

racterísticas y con el tipo de modelo adoptado, puede hacerse sobre las variables exógenas, preferiblemente la principal o, en su caso, aquellas que más directamente influyen en los resultados, pudiendo ser utilizadas directamente las distribuciones de las restantes variables características.

Incluso en laboratorio, en donde la precisión de CONSTRUCCION es, por razones obvias, casi perfecta, el fallo de algunas COMPONENTES de ciertos ELEMENTOS LINEALES de los SISTEMAS DE ESTABILIDAD, se produce en PUNTOS LOCALIZADOS, extendiéndose progresivamente la avería hasta afectar a la totalidad de la sección del ELEMENTO, mientras que en otros puntos del mismo la avería puede ser moderada e incluso incipiente.

La LOCALIZACION de la avería es, lógicamente, mucho más acusada en la naturaleza que en los modelos, ya que los métodos de construcción y el control no pueden ser tan precisos en aquélla como en el laboratorio.

En cualquier caso esta LOCALIZACION de la avería nos permite considerar el ELEMENTO como constituido por un agregado de celdas o tramos elementales, pudiendo entonces determinarse la probabilidad de avería en UNO DE ELLOS, lo que equivale a un ANALISIS LOCAL, en un conjunto de tramos sucesivos, ANALISIS ZONAL, o en la TOTALIDAD DEL ELEMENTO, ANALISIS GLOBAL [5].

ANALISIS DE FIABILIDAD DE LAS COMPONENTES DE ESTABILIDAD. RIESGO DE FALLO

En términos de probabilidad la seguridad absoluta es una utopía. Las COMPONENTES DE ESTABILIDAD de los vehículos, de las naves, de los edificios, de las obras públicas, de todo lo fabricado o construido por el hombre tiene un RIESGO DE FALLO, que en ciertos casos, por su magnitud y/o características, puede adquirir caracteres de catástrofe.

En general debieran ser más seguras, tener mayor FIABILIDAD, las componentes de las obras cuyo fallo puede ocasionar la pérdida de vidas humanas, afectar a la seguridad nacional, a la integridad del medio o producir la pérdida y/o inmovilización de bienes importantes, defendidos por o dependientes de ellas. La DECISION sobre la FIABILIDAD a adoptar en cada caso debe depender así de la FUNCION, UBICACION e IMPORTANCIA de la obra, así como de su VIDA PREVISIBLE o de SERVICIO [3].

Por su VIDA PREVISIBLE o de SERVICIO hemos clasificado a las obras marítimas en dos grupos [3]: Al primero pertenecen las obras cuya

vida previsible, (V), es perfectamente conocida o puede ser estimada con fiabilidad en la fecha del proyecto, mientras que en el segundo grupo incluimos todas aquellas cuya estancia en el punto de ubicación tiene una duración imprevisible en aquella fecha. Ya que las obras que pertenecen al primero de los grupos llevan explícito un sentido de vida limitada las hemos denominado OBRAS TEMPORALES, mientras que llamamos OBRAS PERMANENTES a las del segundo.

Parece lógico admitir, en principio, que el período de retorno de la ruina completa de la obra esté relacionado con la VIDA PREVISIBLE por lo que se impone introducir algún criterio adicional que nos permita estimar la vida previsible de las OBRAS PERMANENTES. Hemos basado este criterio, Bores (1968), en la FINALIDAD de la obra.

De acuerdo con este criterio de FINALIDAD cabe distinguir entre OBRAS PORTUARIAS, comprendiendo los diques de abrigo, las instalaciones en mar abierto, etc., y las OBRAS DE DEFENSA.

La diferencia fundamental entre ambas es que siendo las primeras elementos fundamentales del transporte habrán de evolucionar con éste y es muy difícil imaginar que en el plazo de un siglo y más probablemente de medio no hayan de ser modificadas y más probablemente anuladas, bien por ampliación, bien por un cambio radical en el concepto funcional de este tipo de instalaciones. En consecuencia, la VIDA PREVISIBLE DE LAS OBRAS PORTUARIAS —salvo que otras razones permitan cifrar el plazo de su existencia— deberá ser estimada en unos cincuenta años.

Más larga debe ser la duración estimada para la VIDA PREVISIBLE de las OBRAS DE DEFENSA DE COSTAS, aunque nunca debe valorarse ésta hasta extremos en que otros agentes —geológicos, climáticos, etc.— subsistencia, variación eustática del nivel del mar, descomposición de los materiales de construcción por agresión química, biológica, etc., del medio, etc., puedan ser decisivos.

Una VIDA PREVISIBLE o de SERVICIO comprendida entre uno y cinco siglos nos parece, en la mayor parte de los casos, dependiendo de las características y función de la obra, la más recomendable.

La posible consideración de otros agentes que los que acabamos de destacar no debe restringirse, por supuesto, a las obras de defensa de costas, aunque en ellas sean más importantes e incluso decisivos.

Si como hemos visto (1),

$$(2) \quad F = F \{ \chi (v_1, \dots, v_i, \dots) \leq K_i \}$$

es la distribución de probabilidad multivariada para NO EXCEDENCIA al nivel de avería, o fallo, (i), la probabilidad de no excedencia de este nivel de avería (i) en UN AÑO será

$$(3) \quad p_i = F_i$$

y en los (V) años de VIDA PREVISIBLE de la obra [9]

$$(4) \quad p_v = (F_i)^V$$

Siendo la FIABILIDAD, por definición [10], [17] la probabilidad de que una componente preste un servicio, en condiciones especificadas, durante una duración determinada, evidentemente

$$(5) \quad R_i = p_v = (F_i)^V$$

El RIESGO DE FALLO es [3], [9]

$$(6) \quad \rho_i = 1 - R_i = 1 - (F_i)^V$$

de donde, denominando (τ), PERIODO DE RETORNO, al tiempo medio de presentación de condiciones ambientales-temporales-antrópicas, etc., que cumplen

$$\chi (v_1, \dots, v_i, \dots) \geq K_i$$

es decir

$$(7) \quad \tau = \frac{1}{1 - F_i}$$

la expresión (6) puede escribirse en la forma general

$$(8) \quad \rho_i = 1 - \left| 1 - \frac{1}{\tau} \right|^V$$

Cuando el período de retorno (τ) es grande, lo que ocurre en la mayor parte de los casos prácticos, puede admitirse

$$(9) \quad \rho_i = \lim_{\tau \rightarrow \infty} \left| 1 - \left| 1 - \frac{1}{\tau} \right|^{\tau \frac{V}{\tau}} \right| = 1 - e^{-\frac{V}{\tau}}$$

y si (V/τ) es muy pequeño, desarrollando (9) en serie,

$$(10) \quad \rho_i = \left| 1 - \left\{ 1 - \frac{V}{\tau} + 0 \left| \frac{V}{\tau} \right| \right\} \right|$$

y en el límite

$$(11) \quad \rho_i = \frac{V}{\tau}$$

ANALISIS DE FIABILIDAD DE LOS SISTEMAS DE ESTABILIDAD. MATRIZ DE FIABILIDAD

A pesar de que los estudios de FIABILIDAD se inician en la segunda guerra mundial —Lusser y otros— su aplicación ha tenido un gran desarrollo principalmente en la aeronáutica primero y en la astronáutica y centrales nucleares después, en donde la seguridad es fundamental, recibiendo especial atención el caso de componentes independientes con modalidad de fallo instantáneo, denominada aquí "catastrófico", por sus tremendas consecuencias.

La enorme complejidad de las unidades y la necesidad de garantizar unos altísimos niveles de seguridad en ambos casos hace que el número de componentes sea asombroso —varias decenas de miles en algunos casos— lo que ha impulsado el desarrollo y uso de aquellos métodos que permiten la localización de alternativas —árbol de fallos, etc.— [6], [15].

Muy diferente es el caso de las obras marítimas en las que el número de componentes de estabilidad es reducido, pero éstas son en muchos casos dependientes y con modalidad de fallo gradual.

Denominando

$$R_{j, k, \dots, n}^i$$

a la FIABILIDAD de la componente de estabilidad (*i*) al nivel de fallo (A_i), cuando las averías de las componentes (*j*), (*k*), ..., (*n*) son inferiores a (A_j), (A_k), ..., (A_n) y denominando, análogamente, en general

$$R_{i, j, \dots, n}^k$$

a la FIABILIDAD de la componente de estabilidad (*k*) al nivel de fallo (A_k), cuando las averías de las componentes (*i*), (*j*), ..., (*n*) son inferiores a (A_i), (A_j), ..., (A_n), la FIABILIDAD DEL SISTEMA DE ESTABILIDAD vendrá dada por el PRODUCTO DE LAS FIABILIDADES DE LAS COMPONENTES, o sea,

$$(12) \quad R_{i, j, k, \dots, n} = R_{j, k, \dots, n}^i \dots R_{i, j, \dots, n}^k \dots R_{i, j, \dots, n}^n$$

Dos ejemplos sencillos, aplicados a diques de escollera, son presentados a continuación, con el fin de mostrar la ordenación de los cálculos.

Como ya destacamos anteriormente al estudiar una componente de estabilidad, la FIABILIDAD DE UN SISTEMA DE ESTABILIDAD debe depender de la FUNCION —militar, industrial, recreativa, etc.— de la UBICACION —inaccesible, etc.— y de la IMPORTANCIA —política, económica, etc., valo-

rada, si es posible, en términos de los BIENES DEFENDIDOS y/o DEPENDIENTES— de la obra, debiendo aumentarse la fiabilidad drásticamente cuando el colapso de ésta afecta de forma importante a la seguridad humana, nacional o ambiental, como ocurre con las centrales nucleares, las instalaciones militares y ciertas obras de defensa de costas.

En toda obra debidamente proyectada la fiabilidad de los términos de la MATRIZ DE FIABILIDAD debe crecer con la avería sobre filas, columnas, caras, bloques, etc., debiendo verificarse, en consecuencia, que el término

$$R_{1, 1, 1, \dots, 1}$$

es el menor de la matriz y su término diagonal

$$R_{I, J, K, \dots, N}$$

el mayor. Por supuesto (*I*), (*J*), ... son los límites superiores de (*i*), (*j*), ...

Como recomendábamos hace ya más de una década, la FIABILIDAD DE LOS SISTEMAS DE ESTABILIDAD, en los casos ordinarios, debe verificar

$$0.9 \geq R_{I, J, K, \dots, N} \geq 0.5$$

ANALISIS DE FIABILIDAD DE UN SISTEMA DE ESTABILIDAD CON DOS COMPONENTES CARACTERISTICAS

1. COMPONENTE DE FALLO GRADUAL DEL MANTO PRINCIPAL. Tres niveles de fallo.

$$A_m \leq 0 \quad 0.5 \quad 1$$

2. COMPONENTE DE FALLO INSTANTANEO POR VUELCO DEL ESPALDON. Un nivel de fallo.

$$A_v \leq 1$$

$$R_{1,1} = R(A_m \leq 0 \mid A_v \leq 1) \cdot R(A_v \leq 1 \mid A_m \leq 0)$$

$$R_{2,1} = R(A_m \leq 0.5 \mid A_v \leq 1) \cdot R(A_v \leq 1 \mid A_m \leq 0.5)$$

$$R_{3,1} = R(A_m \leq 1 \mid A_v \leq 1) \cdot R(A_v \leq 1 \mid A_m \leq 1)$$

MATRIZ DE FIABILIDAD DEL SISTEMA

$$R_{i, 1} = [R_{1,1} \ R_{2,1} \ R_{3,1}]$$

ANALISIS DE FIABILIDAD DE UN SISTEMA DE ESTABILIDAD CON DOS COMPONENTES CARACTERISTICAS

1. COMPONENTE DE FALLO GRADUAL DEL MANTO PRINCIPAL

$$A_m \leq 0 \quad 0.5 \quad 1$$

2. COMPONENTE DE FALLO GRADUAL POR DESLIZAMIENTO DEL ESPALDON

$$A_d \leq 0 \quad 0.5 \quad 1$$

$$R_{1,1} = R(A_m \leq 0 \mid A_d \leq 0) \cdot R(A_d \leq 0 \mid A_m \leq 0)$$

$$R_{2,1} = R(A_m \leq 0.5 \mid A_d \leq 0) \cdot R(A_d \leq 0 \mid A_m \leq 0.5)$$

$$R_{3,1} = R(A_m \leq 1 \mid A_d \leq 0) \cdot R(A_d \leq 0 \mid A_m \leq 1)$$

$$R_{1,2} = R(A_m \leq 0 \mid A_d \leq 0.5) \cdot R(A_d \leq 0.5 \mid A_m \leq 0)$$

$$R_{2,2} = R(A_m \leq 0.5 \mid A_d \leq 0.5) \cdot R(A_d \leq 0.5 \mid A_m \leq 0.5)$$

$$R_{3,2} = R(A_m \leq 1 \mid A_d \leq 0.5) \cdot R(A_d \leq 0.5 \mid A_m \leq 1)$$

$$R_{1,3} = R(A_m \leq 0 \mid A_d \leq 1) \cdot R(A_d \leq 1 \mid A_m \leq 0)$$

$$R_{2,3} = R(A_m \leq 0.5 \mid A_d \leq 1) \cdot R(A_d \leq 1 \mid A_m \leq 0.5)$$

$$R_{3,3} = R(A_m \leq 1 \mid A_d \leq 1) \cdot R(A_d \leq 1 \mid A_m \leq 1)$$

MATRIZ DE FIABILIDAD DEL SISTEMA

$$R_{i,j} = \begin{vmatrix} R_{1,1} & R_{2,1} & R_{3,1} \\ R_{1,2} & R_{2,2} & R_{2,3} \\ R_{1,3} & R_{2,3} & R_{3,3} \end{vmatrix}$$

ABSTRACT

The general theory of the Random Multivariable Svstems is introduced applied to the Maritime Structures. The Stability Components and their modality of failure are considered together with their Multivariable Random Analysis. Components Reliability as well as Stability Svstems Reliability are finally considered.

BIBLIOGRAFIA

- [1] AGREE (1957): "Reliability of Military Electronic Equipment". Govern. Printing Office. Washington, D.C.
- [2] BAZOVSKY, I. (1961): "Reliability Mathematics: Fundamentals". McGraw-Hill Book Co. New York.
- [3] BORES, P. S. (1968): "Ola de Cálculo". Ministerio de Obras Públicas. Madrid.
- [4] BORES, P. S. (1977a): "Multivariate Risk and Optimum Economic Analysis in Maritime Structures". Symposium on Rubblemound Breakwaters. Isle of Wight.
- [5] BORES, P. S. (1977b): "Análisis Aleatorio Multivariado. Terminología y Conceptos Básicos". Revista de Obras Públicas, núm. 3151. Madrid.
- [6] BROWN, D. B. (1976): "Systems Analysis and Design for Safety". Prentice Hall Inc. Englewood Cliffs. New Jersey.
- [7] FELLER, D. A. S. (1957): "An Introduction to Probability Theory". Vol. 1. John Wiley and Sons Inc. New York.
- [8] GNEDENKO, B. V y otros (1968): "Mathematical Methods of Reliability Theory". Academic Press. New York.
- [9] GUMBEL, E. J. (1968): "Statistics of Extremes". Columbia Univ. Press. New York.
- [10] IRESEON, W. G., ed. (1966): "Reliability Handbook". McGraw-Hill Book Co. New York.
- [11] LLOYD, D. K., and LIPOW, M. (1963): "Reliability: Management Methods and Mathematics". Prentice Hall Inc. Englewood Cliffs. New York.
- [12] MOTOROLA Inc. (1955): "Reliability and Component Handbook. Scottsdale Arizona.
- [13] PIERUSCHKA, E. (1963): "Principles of Reliability". Prentice Hall Inc. Englewood Cliffs. New York.
- [14] POLOVKO, A. M. (1968): "Fundamentals of Reliability Theory". Academic Press. New York.
- [15] RASMUSSEN, N. C. (1975): "Reactor Safety Study". Nat. Techn. Information Service. Springfield Virginia 22161.
- [16] WEXLER, A., ed (1977): "Large Engineering Svstems". Proc. Intern. Symposium. Pergamon Press.
- [17] WARLETA, J. (1973): "Fiabilidad: Bases Teóricas y Prácticas". Inst. Nac. de Técnica Aeroespacial. Madrid.
- [18] WILKS, S. S. (1961): "Mathematical Statistics". Wiley and Sons Inc. New York.