

**E**l objetivo de este trabajo es presentar los aspectos teóricos fundamentales del modelamiento y análisis de la incertidumbre y la imprecisión de la información en los problemas de ingeniería, considerada a diferentes niveles de abstracción.

El análisis de la incertidumbre y su correcto modelamiento son fundamentales en los problemas de diseño de elementos y obras de ingeniería y cada vez juegan un papel más importante en la toma de decisión sobre las alternativas de diseño para lograr resultados económicos, confiables y seguros.

El metamodelamiento permite establecer modelos a un mayor nivel de abstracción y por lo tanto aplicables a diferentes aspectos o problemas de incertidumbre e imprecisión. Se analizan, en este trabajo, los conceptos de metamodelamiento y de la incertidumbre para mostrar que la solución de problemas de ingeniería en donde existe el riesgo, incertidumbre o imprecisión en las variables consideradas, pueden tratarse a través de diferentes niveles de abstracción que permiten descifrar la intervención de estas variables y sus características aleatorias y cómo patrones similares se pueden aplicar en problemas tan diversos como el diseño de aislamientos eléctricos y el diseño estructural.

Los ejemplos que

se presentan corresponden a casos reales de obras analizadas, diseñadas y realizadas en el país, siguiendo metodologías probabilísticas como una aproximación en el tratamiento de la incertidumbre. De esta manera,

como una metodología que permite al diseñador, analizar las variaciones e implicaciones de todas las decisiones de diseño. La teoría de sistemas se aplica explícita o implícitamente, con la utilización de algoritmos

matemáticos o heurísticos, en el diseño. Los algoritmos heurísticos son procedimientos con un número finito de pasos, que aseguran el logro de una solución satisfactoria en un problema y aunque pueden basarse en la experiencia y la intuición, se desarrollan con un análisis riguroso del

problema y de las variables y factores involucrados. Esto significa que, aunque en muchos casos un diseñador no utiliza intencionalmente el método de sistemas, la heurística que utiliza implícitamente contiene los elementos de esta teoría que conducirán a un diseño sano. En general, los diseños complejos requieren tanto de la utilización de algoritmos como de la heurística para asegurar soluciones satisfactorias. Los algoritmos ayudan en la toma de decisiones programables mientras que la heurística soporta la toma de decisiones complejas, inusuales o en el enfrentamiento de problemas nuevos.

El diseño de un sistema, en ingeniería, requiere cuestionar su naturaleza, su papel en el contexto del sistema mayor del cual hará parte, para entender su funcionamiento y su interrelación con sistemas externos. La metodología de diseño se caracteriza principalmente en



**Alvaro Torres M.**

Ingeniero Electricista, UIS.  
Master en Computadores e Ingeniería de Sistemas.  
Dr. Eng. Sistemas de Potencia, RPI, USA. Profesor de Ingeniería Eléctrica, Uriandes. Area de Especialización: Sistemas de Potencia.

se quiere mostrar la importancia del metamodelamiento para reducir problemas del modelamiento de diferentes elementos de la realidad, tan complejos como lo son la incertidumbre y la imprecisión y además, para demostrar que la aplicación de estas teorías permite aproximarse más a la realidad y obtener diseños de ingeniería con mayor racionalidad.

## 1. Introducción

La base fundamental del diseño en ingeniería, es la consideración y aplicación de la teoría de sistemas



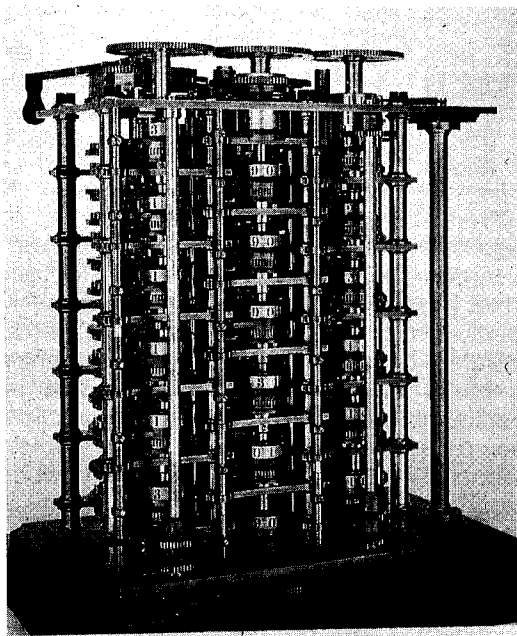
que los objetivos del sistema radican en su relación con el sistema mayor y en que involucra procesos de inducción y síntesis en donde la innovación y la creatividad juegan papeles importantes. El diseño óptimo no proviene simplemente del mejoramiento incremental de diseños actuales sino de la implementación de alternativas innovativas y creativas que parten del sistema mayor.

Para diseñar sistemas, en ingeniería, se requiere entender y modelar la realidad en la cual se desenvuelve. El modelamiento es un proceso de abstracción en el cual se interpreta la realidad para crear una representación simplificada que contiene las características más prominentes de la realidad y las mismas características o propiedades pero que por su simplicidad, puede ser fácilmente analizado para obtener soluciones ante diferentes eventos externos. El modelamiento es un primer paso de abstracción de la realidad.

Si el mismo proceso de abstracción que se aplica para interpretar la realidad, se aplica a los modelos, se establecen las guías, especificaciones o requerimientos para los modelos y los métodos para obtenerlos. De esta manera, se obtiene un modelo para el proceso de modelamiento. Esto es el metamodelamiento.

El proceso de metamodelamiento es una segunda instancia de abstracción de la realidad que permite regular el proceso de

modelamiento y estandarizar métodos y modelos. Este metamodelamiento permite la replicación de conceptos y modelos en diferentes aspectos, áreas o campos del diseño en ingeniería. Inclusive, el metamodelamiento puede visualizarse como la base de la reutilización de elementos en la



ingeniería de software. La aplicación de conceptos y procesos de modelamiento similares, bajo la teoría de grafos y redes, a redes eléctricas, a estructuras, redes de conducción de líquidos o redes de transporte, es posible porque estos modelos se han obtenido siguiendo los fundamentos del metamodelamiento. El metamodelamiento, aplicado en el diseño ingenieril, es base de la

innovación y crea un ambiente motivante de la creatividad del ingeniero.

Otro aspecto fundamental en el diseño es la información y la incertidumbre e imprecisión asociada. No existe, prácticamente, ningún problema de diseño en ingeniería en donde se tenga la información total sobre todas las variables y en donde esta información no tenga ningún grado de incertidumbre e imprecisión. Un problema de ingeniería, con todos los datos y completamente determinístico no es un problema real. En ingeniería y específicamente en el diseño, se debe manejar apropiadamente la información y la incertidumbre. Su adecuado tratamiento y consideración es el que conduce a diseños sanos, confiables, económicos y seguros. El tratamiento de la incertidumbre a través del modelamiento y el establecimiento de reglas y especificaciones para este modelamiento, a través del metamodelamiento, es el tema central de este artículo.

## 2. Modelamiento y metamodelamiento en el diseño

El objetivo de este artículo no es entrar en detalle en el proceso de diseño de ingeniería. Sin embargo, es importante mencionar sus características básicas para mostrar la influencia de la incertidumbre y la importancia de su modelamiento, dentro de este proceso.

El diseño en ingeniería es un proceso de toma de decisiones cíclico, compuesto principalmente de tres fases:

- Fase de planeamiento o de políticas
- Fase de evaluación
- Fase de implementación

En la fase de planeamiento y establecimiento de políticas y

estrategias, se define de manera específica el problema y se establecen las premisas, hipótesis y métodos básicos a utilizar. También se establecen el tipo de resultados que se obtendrán y se plantean la forma de generar las alternativas y las alternativas fundamentales.

En la fase de evaluación se analizan las alternativas para medir su grado de cumplimiento de las metas y de las restricciones, escogiendo previamente métodos o modelos de comparación e indicadores que permitan observar el funcionamiento de cada alternativa con respecto a las metas y objetivos del sistema.

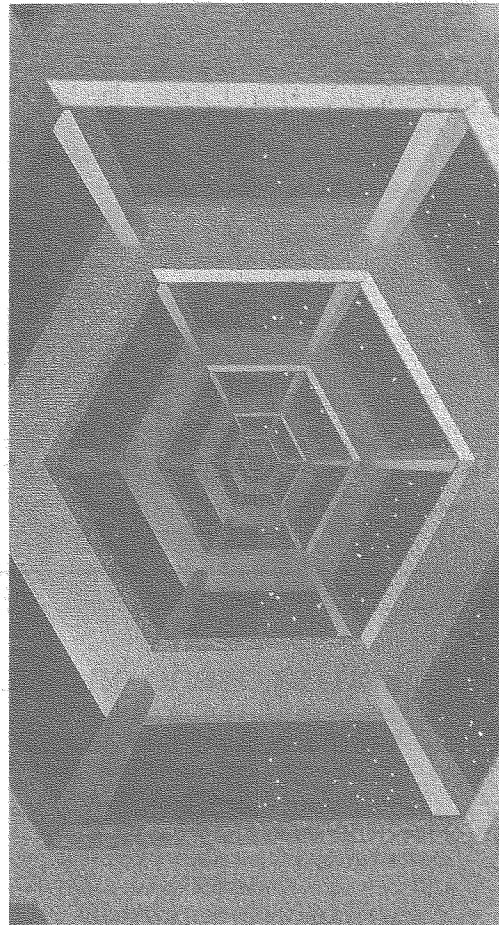
En la fase de implementación se realizan actividades de optimización de la alternativa seleccionada, el estudio de diferentes aspectos no evaluados en la fase anterior y la verificación de la satisfacción de los requerimientos establecidos a través de una realimentación hacia las fases anteriores. El diseño detallado de la alternativa seleccionada se realiza en esta fase.

Este proceso puede mostrarse con un ejemplo de diseño de una línea de transmisión de alta tensión. En la primera fase se establece plenamente el problema de diseño, con base en el estudio de planteamiento del sistema en donde se han tomado decisiones previas sobre el nivel del voltaje y configuración básica (circuito sencillo o doble). Se establecen los objetivos de funcionamiento con respecto a diferentes parámetros tales como regulación, pérdidas, estabilidad de estado estable, cargabilidad, parámetros de evaluación económica y financiera y se plantean alternativas de configuración de conductores, estructuras y de corredores.

En la fase de evaluación se definen claramente los criterios de comparación de alternativas y se hacen los estudios descriptivos de

cada alternativa. Por ejemplo, se establecen diferentes alternativas de conductores y estructuras a utilizar, así como los conductores de cada alternativa. Se realizan estudios de sensibilidad para verificar que el orden de elegibilidad no cambie con variaciones esperadas en las variables críticas. En muchos casos, es posible que se obtenga como definición del diseño dos alternativas similares y que estas se mantengan hasta el proceso de

como herrajes, aisladores, amortiguadores, separadores, etc. Se verifica el cumplimiento de las metas y requerimientos. Dentro de esta fase se pueden hacer variaciones en los requerimientos generales para hacer la solución óptima en confiabilidad, economía y seguridad. Finalmente se obtienen las especificaciones de la obra para comenzar el proceso de construcción, en donde también existe un ciclo similar de toma de decisiones que conducirá finalmente al éxito.



La Fig. 1 muestra el proceso de toma de decisión en el diseño de ingeniería, de manera general, aplicable a cualquier proceso de diseño. Este diagrama muestra el paradigma de diseño que racionaliza el proceso de decisión correspondiente. A medida que un diseño sea más complejo, el seguimiento de este patrón es más explícito. Este diagrama representa el metamodelo del diseño en ingeniería. <sup>(1)</sup>

El modelo de un sistema del mundo real es una representación que tiene las siguientes características principales: simplicidad, formalidad, solucionabilidad y generalidad. Esto se logra a través de la abstracción en la observación de la realidad y de los fenómenos y con el seguimiento de técnicas de modelamiento establecidas con base en un segundo paso en la abstracción misma. No siendo el propósito aquí, explicar los procesos de modelamiento, no se extenderá sobre este aspecto general.

licitación en donde finalmente se seleccione la mejor alternativa.

En la fase de implementación, la alternativa o alternativas seleccionadas se diseñan en mayor detalle conduciendo estudios adicionales que no eran importantes en el proceso de decisión entre alternativas. Por ejemplo, se refina el plantillado, se seleccionan componentes tales

El proceso de diseño involucra inherentemente la consideración de la incertidumbre e imprecisión en muchos aspectos que van desde, la interpretación de la realidad y de las variables y fenómenos incluidos, hasta el proceso mismo de toma de decisión en diferentes partes del diseño. Este es el aspecto central de este trabajo.

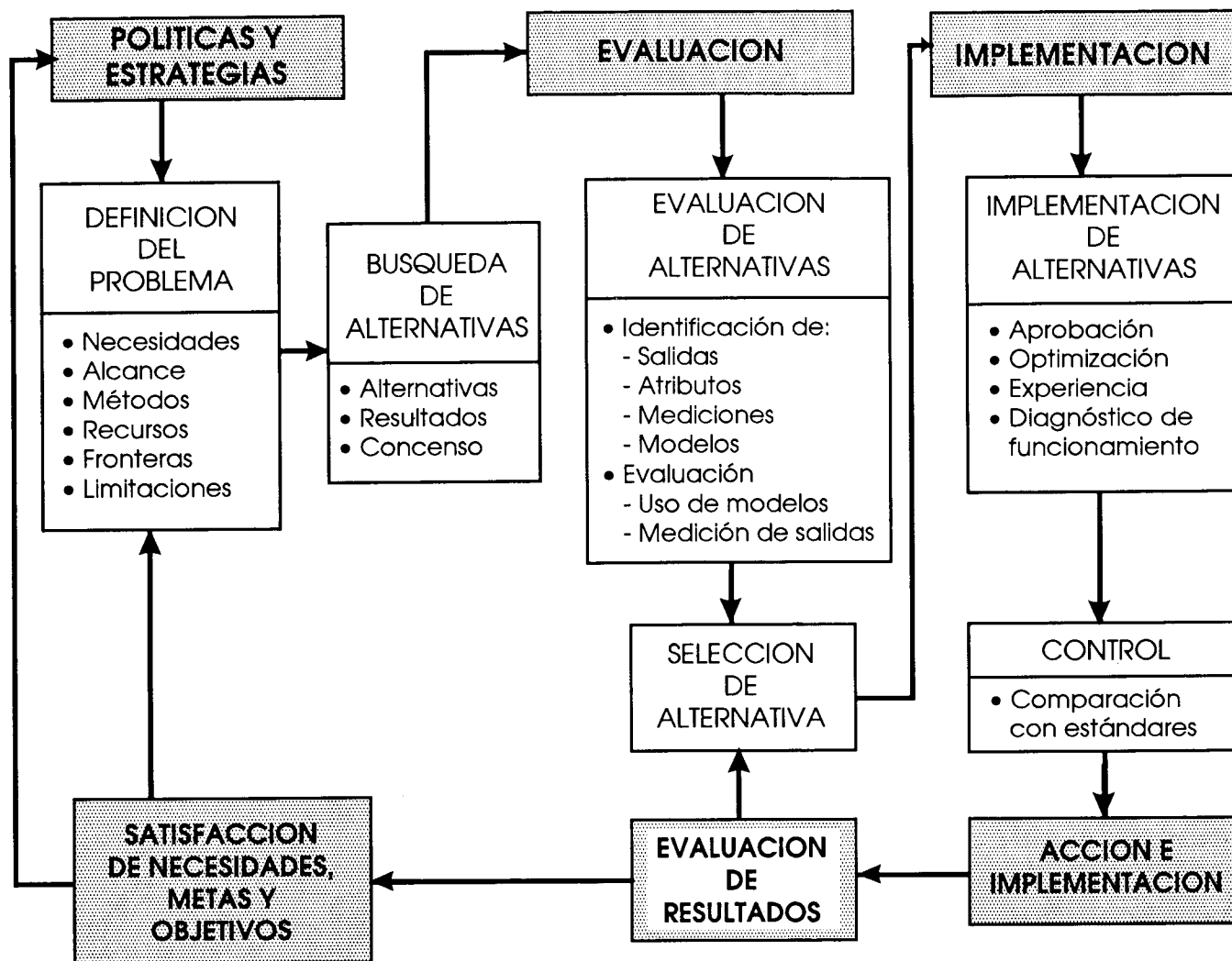


FIG.1 - Patrón de diseño en ingeniería

### 3. Incertidumbre

El mundo alrededor está lleno de incertidumbres, algunas que provienen de los fenómenos mismos y otras de nuestra percepción y modelamiento de la realidad. El diseño por lo tanto, está íntimamente relacionado con estas incertidumbres e imprecisiones acerca de la realidad. Una forma de manejar la incertidumbre ha sido, tradicionalmente, a través de la teoría de la probabilidad, sin embargo, cuando se toman decisiones importantes en diseño,

el diseñador experimentado, a pesar de que formalmente puede utilizar las probabilidades en sus cálculos, las decisiones las toma con base en "juicio de ingeniería", lo cual realmente es una interpretación subjetiva o aplicación de la definición subjetiva de las probabilidades, o de manera más general, de la teoría de las posibilidades.

La principal dificultad al trabajar con la incertidumbre es precisamente sus características inciertas. Todo intento de determinar estas características es reducir el nivel de incertidumbre.

Se puede decir que, en el diseño se manejan situaciones con diferentes grados o niveles de incertidumbre, así:

- Certidumbre o deterministicidad
- Riesgo
- Incertidumbre (Probabilística)
- Ambigüedad y vaguedad

• Certidumbre: Cuando se tiene un conocimiento perfecto de los valores de los resultados y de la ocurrencia de los estados externos.

• Situaciones de riesgo: Cuando se conocen los valores de los

resultados y las probabilidades relativas de los posibles estados. El riesgo se aplica a situaciones para las cuales los resultados no se conocen con certidumbre pero, acerca de los cuales se cuenta con la información sobre su probabilidad.

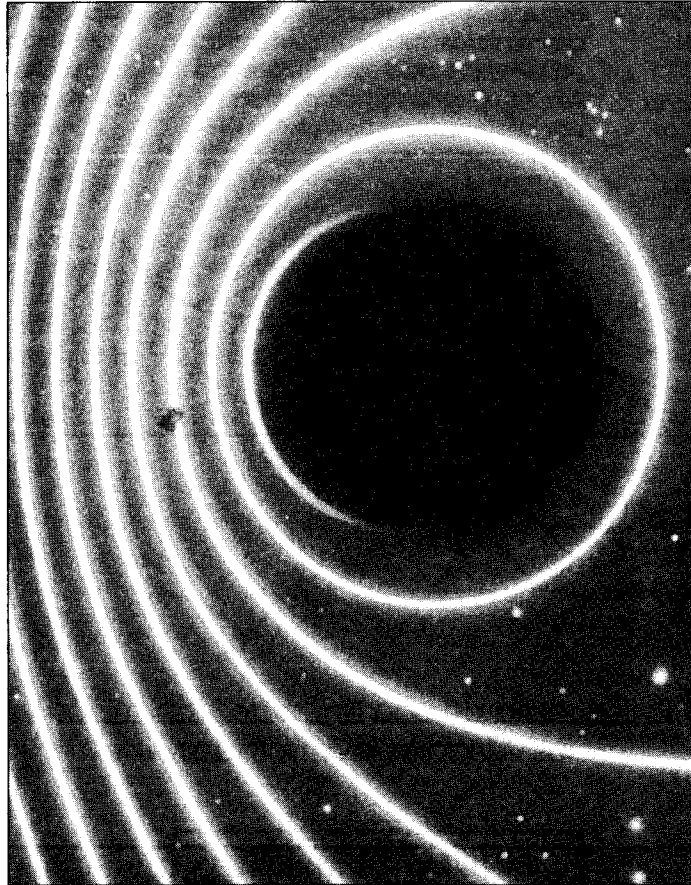
- Situaciones de incertidumbre: Los valores de los resultados pueden conocerse pero no se tiene información sobre la probabilidad de los eventos. Sin embargo, se trabaja con la ocurrencia o no ocurrencia de fenómenos bien definidos.

- Situaciones de ambigüedad y vaguedad: En este caso los eventos no están definidos o están vagamente definidos y son difíciles de especificar.

Incetidumbre y ambigüedad o vaguedad son conceptos diferentes, aunque tradicionalmente han sido considerados similares en el contexto de la teoría de la probabilidad. Sin embargo, el tratamiento de la ambigüedad o imprecisión debe hacerse bajo conceptos más generales que las probabilidades, tales como las teorías de Depster-Shafer o la teoría de las posibilidades, haciendo uso de la teoría de conjuntos difusos de Zadeh (2)-(5). Estos conceptos son fundamentales en la aplicación de la inteligencia artificial a la solución de problemas de decisión en diseños y en el planteamiento de metamodelos de la incertidumbre.

La aplicación de la lógica difusa, de la teoría de las posibilidades, de

las teorías de Depster-Shafer, de los factores de certidumbre, en problemas de diseño en ingeniería es cada vez mayor y continuamente se desarrollan



métodos matemáticos para el tratamiento de la incertidumbre y la imprecisión en el modelamiento y el diseño (6)-(10). Sin embargo, en la práctica del diseño en ingeniería, todavía no existen métodos ampliamente aceptados para el tratamiento de la imprecisión y la incertidumbre con base en esta teoría. Hasta ahora, se han venido aceptando modelos probabilísticos para representar la incertidumbre y con hipótesis y simplificaciones para reducir el problema de imprecisión a problemas de incertidumbre y luego a problemas de riesgo. En este trabajo se mostrarán ejemplos de estos procedimientos en el manejo de la incertidumbre en el diseño.

## 4. Análisis de riesgo en el diseño

El grado de adecuación de un diseño en ingeniería, se mide a través de la estimación de su capacidad o habilidad para responder a los requerimientos establecidos e implica la aceptación de un determinado nivel de riesgo. El balance entre el grado de adecuación y el riesgo, depende generalmente de factores económicos, sociales o de seguridad. La evaluación de riesgo de falla de un sistema, requiere estimar cuantitativa o cualitativamente la posibilidad de funcionamiento adecuado del sistema durante un período especificado de tiempo y bajo las condiciones de operación previstas. Esto significa que el nivel de riesgo está asociado con el concepto de

confiabilidad de un sistema y depende de la estimación de esta confiabilidad.

Aunque el análisis de confiabilidad de un sistema se ha realizado tradicionalmente con base en la teoría de probabilidades, la teoría de conjuntos difusos está siendo propuesta para considerar de manera más amplia las imprecisiones de las variables involucradas (11)-(13).

Consideremos aquí, de manera específica modelos de confiabilidad dentro de un metamodelo de carga-resistencia. Es decir, sistemas diseñados para una capacidad definida y que están sometidos a demandas o

cargas dadas por las condiciones del sistema externo mayor o de subsistemas externos. Este es el caso de elementos tales como estructuras, aislamientos eléctricos o sistemas tales como sistemas de generación, líneas de transmisión, etc.

Las incertidumbres en el problema provienen de diferentes aspectos

relacionados tanto con los componentes internos del sistema como con el sistema externo. Considérese por ejemplo, el caso de una línea de transmisión, en donde existen un conjunto de estructuras sometidas a cargas ambientales, tal como se muestra en la Fig.2. Cada estructura a su vez, es un subsistema compuesto por diferentes elementos. Las

incertidumbres en el modelo estructural del sistema se pueden representar esquemáticamente como se muestran en la Fig.3. El sistema de aislamiento (aire, porcelana) a su vez debe soportar las cargas eléctricas (rayos, sobretensiones de maniobra), las cuales contienen a su vez grados de incertidumbre.

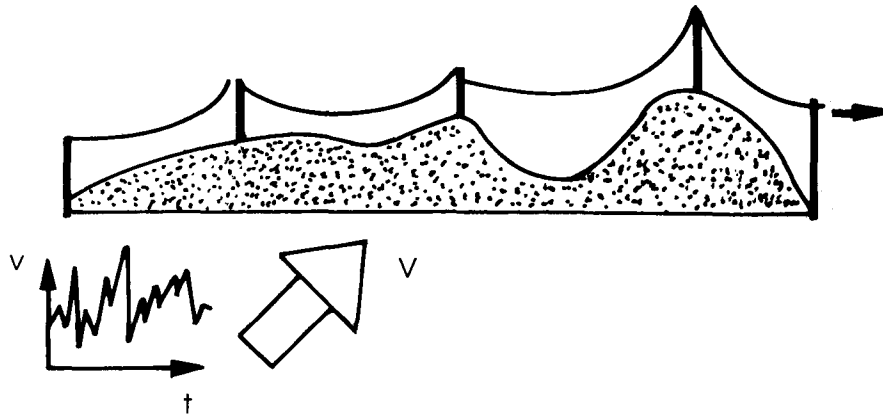


FIG.2. Esquema de una Línea de Transmisión y las variables involucradas

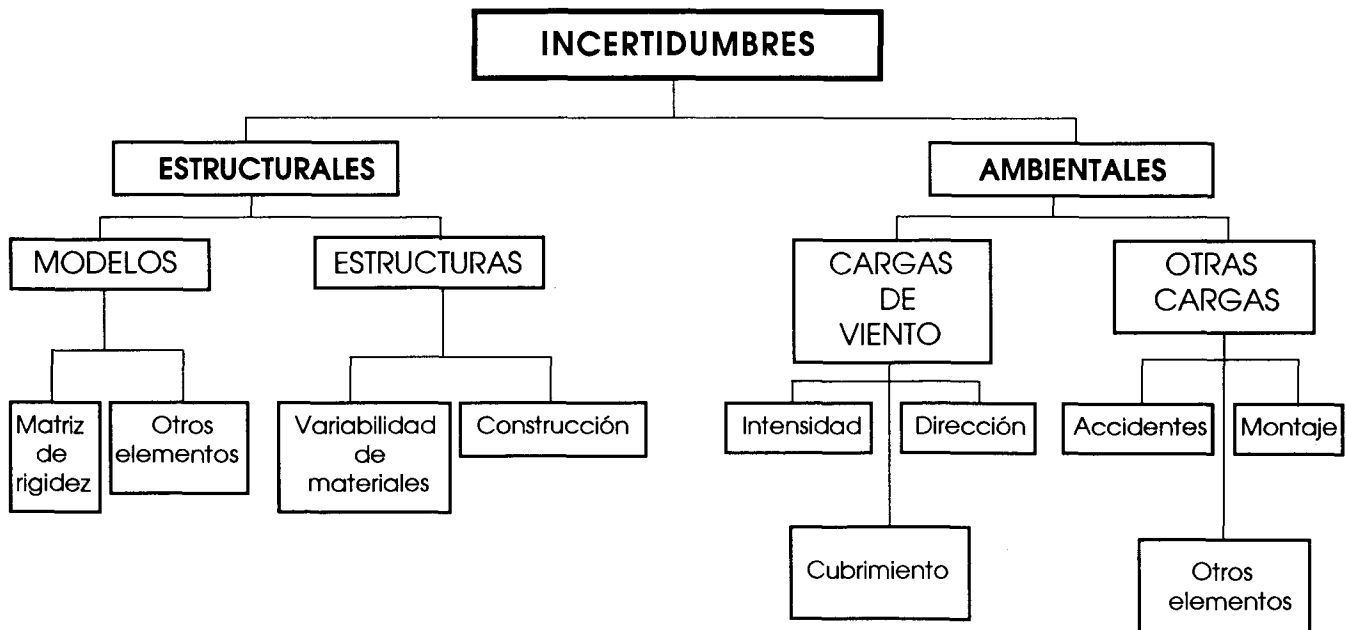


FIG.3 Incertidumbres involucradas en el modelo estructural de una línea de transmisión

El problema de imprecisión en el diseño del sistema se reduce al nivel de incertidumbre al establecer hipótesis o escenarios bajos los cuales el sistema debe operar correctamente. Por ejemplo, aunque no se sabe, ni se pueden definir exactamente, cuáles son los eventos que simultáneamente pueden actuar, estos se definen con base en la experiencia y considerando heurísticamente las posibilidades de coincidir eventos extremos. Al no considerar la coincidencia de eventos extremos, se reducen los costos del sistema pero este puede ser menos seguro. El balance entre el costo de mayor confiabilidad, teniendo en cuenta el efecto de la falla del sistema es uno de los

criterios del diseño, establecido en la primera fase del patrón de diseño.

Cuando se considera el efecto simultáneo de vientos en diferentes estructuras, se puede decir que el sistema físicamente actúa en paralelo. Sin embargo, si falla un elemento todo el sistema falla. Esto significa que el sistema está conectado lógicamente en serie. Igualmente sucede en el caso del aislamiento. Cuando un rayo u otro sobrevoltaje actúa, este actúa prácticamente en todos los elementos simultáneamente (conexión física en paralelo). Sin embargo, la falla de un elemento ocasiona la falla del sistema (Lógicamente conectados

en serie).

El modelo establecido, tanto para el diseño estructural como para el diseño eléctrico de aislamiento, sigue los mismos lineamientos de carga-resistencia (metamodelo). Esto permite obtener una mayor coherencia en la confiabilidad estructural y eléctrica del sistema. La Fig.4 muestra la base de este metamodelo (14), (15). Este metamodelo se ha aplicado a diferentes líneas diseñadas en el país y se ha probado como eficiente en la obtención de diseños adecuados, seguros, confiables y económicos (16). La Fig.5 muestra el efecto de elementos en serie, sobre la confiabilidad del sistema.

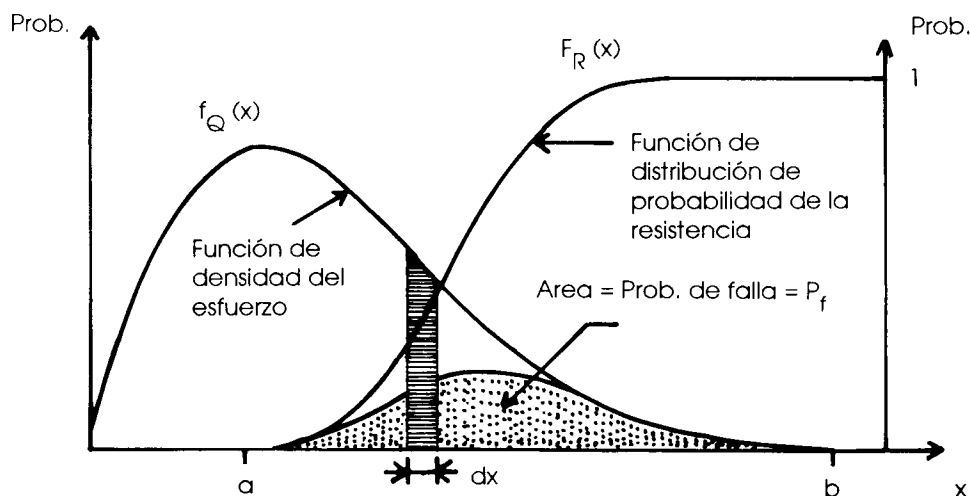


Figura 4 - Modelo carga-resistencia para el diseño estructural y eléctrico de una línea de transmisión

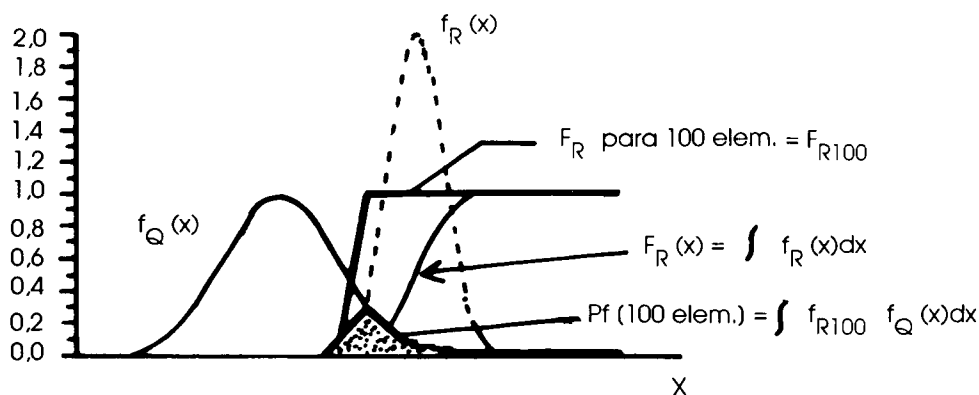


Figura 5 - Efecto de elementos en serie sobre la confiabilidad del sistema

## 5. Conclusiones

La teoría de sistemas es la base del paradigma de diseño en ingeniería y de la consideración de la imprecisión e incertidumbre que rodea al diseño.

El modelamiento y metamodelamiento es fundamental en la interpretación de la realidad necesaria para el diseño. El metamodelamiento de la incertidumbre, al establecer patrones, guías y procedimientos para la obtención de los modelos de la incertidumbre de las diferentes variables, permite lograr mayor coherencia en los diseños y aplicar métodos similares a diferentes aspectos, obteniéndose ventajas importantes en la optimización de los mismos.

En este artículo se mostró un ejemplo de aplicación de estos metamodelos y modelos de la incertidumbre, de manera resumida ya que la intención no era detallar todos los aspectos involucrados en el proceso. Posteriormente se expandirá este trabajo para mostrar estos detalles y otros casos de aplicación.

## 6. Referencias

- 1- A. Torres, "Análisis de Decisión en Sistemas de Potencia, Conferencia IEEE, Bogotá, Sept. 28, 1992.
- 2- C.V. Negoita, D. Ralescu, *Simulation, Knowledge-based Computing, and Fuzzy Statistics*, Van Nostrand Reinhold, New York, 1987.
- 3- M. Guth, "A probabilistic foundation for vagueness and imprecision in fault-tree analysis", *IEEE Trans. on Reliability*, vol 40, N°5, 1991, Dec., pp 563-571.
- 4- J. Buckley, "A general theory of uncertainty based on co-t-norms", *Proceedings of the First International Symposium on Uncertainty Modeling Analysis*, IEEE, University of Maryland, USA, Dec. 3-5, 1990.
- 5- G. Klir, "Probabilistic versus possibilistic conceptualization of uncertainty", *Proceedings of the First International Symposium on Uncertainty Modeling Analysis*, IEEE, University of Maryland, USA, Dec 3-5, 1990.
- 6- A. Miyamoto, H. Morikawa, M. Kushida, "Engineering dealing of subjective uncertainty brige rating", ver 4.
- 7- H. Karadeniz, "Uncertainty modeling in the fatigue reliability calculation of offshore structures", ver 4.
- 8- D. Teodorovic, S. Kikuchi, "Transportation route choice model using fuzzy inference technique", ver 4.
- 9- K. Ogura, "Comparison of uncertainty approaches to system failure probability", ver 4.
- 10- I. Hathout, "Safety evaluation of existing transmission lines using fuzzy set theory", ver 4.
- 11- B.P. Shrestha, et.al., "Fuzzy Reliability in Hydraulics", ver 4.
- 12- R.K. Reddy, A. Haldar, "A random-Fuzzy Reliability Analysis", ver 4.
- 13- T. Chengye, "Model System of Earthquake Prediction and Countermeasures", ver 4.
- 14- ISA-CONSULTORIA COLOMBIANA S.A., "Metodología de Diseño de Líneas de Transmisión y Guía de Aplicación de las Estructuras Normalizadas", Sept. 1989.
- 15- A. Torres, "Application of probabilistic methods for transmission tower standardization", *International Conference on Large High Voltage Electric Systems -CIGRE- 1988 Session*, Paris.
- 16- Consultoría Colombiana S.A., Consorcio Líneas Guavio - EEB, "Diseño Electromecánico de las Líneas del Proyecto Guavio", 1989.