

## *Capítulo III*

### **LA NECESIDAD DEL ENFOQUE DE SISTEMAS Y DE LA INGENIERIA DE SISTEMAS EN LOS ESTUDIOS DEL AGUA**

El incremento constante de la demanda del agua en cantidad y calidad suficiente, adecuadamente distribuída en el tiempo y espacio, ha forzado a ingenieros y planeadores a contemplar planes más comprensivos, complejos y ambiciosos para el manejo del recurso agua.

El Enfoque de Sistemas y La Ingeniería de Sistemas aplicada a la hidrología representa uno de los aspectos más básicos para la planeación y desarrollo de sistemas de recursos hidráulicos. Por el carácter multipropósito (suministro de agua industrial, agrícola, doméstica, hidroelectricidad, navegación, recreación control de inundaciones, etc.) y multiobjetivos (desarrollo regional, mejoramiento del bienestar social, del ambiente, etc.) de tales sistemas, se hace conveniente la aplicación de un enfoque integral y práctico que estudie sistémicamente los diferentes componentes hidráulicos para su mejor análisis, a la vez que emplee métodos y herramientas cuantitativas que faciliten la obtención de resultados

prácticos y objetivos.

Por otra parte, la hidrología por su carácter probabilístico y complejo, representa un aspecto donde los modelos matemáticos han tenido especial auge. El analista de los sistemas de agua deberá usar modelos matemáticos y métodos de ayuda de ingenieros, planeadores, economistas y otros para seleccionar a través de innumerables proyectos cuales podrían ayudar a alcanzar los propósitos establecidos. Los métodos de análisis de sistemas pueden ayudar a identificar planes y políticas que se puedan llevar a cabo para cumplir con el gran número de necesidades, metas y objetivos.

La aplicación de métodos de sistemas tales como optimización matemática y la simulación pueden ayudar significativamente en la definición, evaluación y selección de inversiones, diseños y políticas para el recurso agua. Actualmente hay un incremento en la documentación de métodos de análisis de sistemas para el manejo del recurso agua.

Los ingenieros y planeadores del recurso agua deben desarrollar un número razonable de alternativas para mejorar su manejo; ellos también deben evaluar el impacto económico, político, ecológico y social que podría resultar de las alternativas implantadas. Se deberán estudiar ríos, lagos, esteros y otros suministros de agua con una gran conciencia de su complejidad, su

sensitividad y adaptabilidad a fuerzas exógenas y de nuestra escasa limitación para entender su comportamiento.

Sin embargo la aplicación de análisis de sistemas no se recomienda cuando los objetivos no están claramente definidos, existen pocos cursos alternativos de acción, o hay poco entendimiento concerniente a las salidas. La aplicación exitosa del análisis de sistemas está caracterizada por:

1. Un enfoque sistémico. Entender la existencia de interacción entre elementos.
2. El uso de grupos interdisciplinarios.
3. El uso de modelos matemáticos formales.

Además, el enfoque de sistemas es más apropiado cuando:

1. Los objetivos del sistema están razonablemente bien definidos y tanto la organización como los individuos pueden identificar quien tiene la autoridad necesaria y el poder para implementar posibles decisiones.
2. Hay muchas alternativas que pueden satisfacer los objetivos establecidos y la decisión no es obvia.

Para el uso de modelos formales se requiere:

1. Las alternativas de solución y los objetivos de el sistema pueden describirse por medio de representación matemática.
2. Los parámetros del modelo son estimables a partir de datos reales.

Con todo lo anterior podemos asegurar que los sistemas complejos de recursos hidráulicos pueden ser analizados para determinar un mejor diseño y operación, por medio de una serie de técnicas que hacen uso de modelos matemáticos. Tales modelos pueden ser más simples que el sistema real, pero retienen las propiedades esenciales de este último. Frecuentemente el modelo se complica por las incertidumbres de la hidrología y el gran número de componentes y propósitos del sistema. Por lo tanto, se deberá escoger un balance entre el detalle y complejidad de la hidrología y los del modelo del sistema, con el objeto de que este último pueda ser analizado matemáticamente.

El uso de modelos matemáticos dará al diseñador suficientes conocimientos básicos, acerca del comportamiento del sistema bajo diferentes condiciones y criterios de planeación y operación, y por lo tanto, le permitirá basar su decisión en el comportamiento esperado del sistema, minimizando su dependencia en factores cualitativos tales como la experiencia e intuición.

A manera de ejemplo podemos citar algunos de los objetivos que se persiguen al modelar el comportamiento hidrológico de una cuenca, los cuales son:

1. Sintetizar los eventos hidrológicos pasados.
2. Predecir los eventos hidrológicos futuros y evaluar para fines de diseño, las características de los eventos hidrológicos que

ocurren rara vez en la naturaleza.

3. Evaluar los efectos de cambios artificiales impuestos por el hombre en el régimen hidrológico.

4. Proveer un medio de investigación para mejorar los conocimientos de la hidrología en general, así como del fenómeno del escurrimiento en particular.

"El enfoque de sistemas tiende a desarrollar estos modelos utilizando observaciones de campo relativas a entradas (input) y salidas (output) para la evaluación de los parámetros.

El papel del sistema en la generación de la salida con base a la entrada o en la interrelación de entrada y salida, es su característica esencial. La salida de cualquier sistema depende de la naturaleza de la entrada, de las leyes físicas involucradas y de la naturaleza del sistema mismo, (tanto de la naturaleza de los componentes, como de la estructura del sistema a la que ellos están sujetos)" [8].

En el enfoque de sistemas, la operación completa del sistema se examina tratando de involucrar todos los detalles complejos del mismo o todas las complicadas leyes físicas que están involucradas, aunque no todos sean posible expresarlas mediante las relaciones matemáticas necesarias para construir el modelo.

Sin embargo no hay que olvidar que a pesar del enfoque de los sistemas hidrológicos, la planeación no está restringida al uso

de modelos matemáticos. Los modelos sirven para hacer una ejemplificación de dicho enfoque, y estos pueden representar una estructura adecuada y de manera ordenada las interdependencias importantes, así como las interacciones entre varias estructuras de control y usos de los sistemas de agua. Los modelos permiten una evaluación de las consecuencias económicas y físicas de estructuras de ingeniería, de la operación y asignación de políticas, y de diferentes supuestos acerca de flujos futuros, tecnología, costos y requerimientos sociales y legales. A pesar de que esta metodología no puede definir los mejores objetivos o suposiciones, con ella se podrán identificar buenas decisiones, dando estos objetivos y supuestos.

Al aplicar la metodología de sistemas en el proceso de planeación del recurso agua, uno debe estar conciente de la limitación inherente de los modelos como representación de un problema real. Los datos de entrada, incluyendo objetivos y otras suposiciones, pueden ser controversiales o inciertos. Por supuesto, estos datos de entrada afectan las salidas. Los eventos futuros no son conocidos con certeza y nuestro conocimiento concerniente a los sistemas de agua son aún limitados. Más aún, los resultados de un análisis cuantitativo de las alternativas, es solo una parte de las entradas del proceso de planeación y decisión. Igualmente importante pueden ser los factores cualitativos, incluyendo

inferencias subjetivas acerca del análisis cuantitativo.

Es importante recalcar que la aproximación de un modelo a la realidad depende en mayor parte del planteamiento que se haga de éste, lo que a su vez estará determinado por:

- Los objetivos del análisis.
- Los datos requeridos para evaluar los proyectos.
- El tiempo, datos, dinero y facilidades computacionales para el análisis.
- Los conocimientos y destreza del modelador.

Por último debe quedar claro que el desarrollo de un modelo es un arte pues requiere de la abstracción del mundo real de los componentes que son importantes para la decisión que se tiene que tomar mediante métodos cuantitativos y la expresión de estos componentes en relaciones matemáticas.

### **III-1. TECNICAS EMPLEADAS EN LA INGENIERIA DE SISTEMAS**

Debido a que en los estudio de sistemas hidráulicos para su posterior mejora se requiere de la Toma de Decisiones, es importante conocer un poco de las múltiples técnicas que existen para poder llevar a cabo una actividad de esta índole.

Entre las técnicas que emplea la Ingeniería de Sistemas las más efectivas para la toma de decisiones son las que se desarrollaron a partir de la Investigación de Operaciones, de las cuales se enumerarán algunas de ellas:

**Métodos de optimización:**

- Programación geométrica
- Programación lineal
- Programación por metas
- Programación dinámica (discreta y continua)
- Programación no lineal
- Técnicas de búsqueda
- Principio del máximo (discreto y continuo)
- Programación cuadrática
- Programación separable
- Programación convexa
- Programación entera
- Programación combinatorial
- Programación heurística
- Cálculo de variaciones

**Otros métodos:**

- Técnicas de simulación
- Análisis de riesgo



EL SABER ES HIJOS  
HARA MI GRANDEZA  
INGENIERIA INDUSTRIAL  
BIBLIOTECA



- Modelos de comportamiento
- Teoría de decisiones
- Modelos de punto de equilibrio
- Modelos de inventario
- Análisis de series de tiempo

Dado que el objetivo que se persigue es sólo relacionado con el manejo del agua, a continuación se describirán aquellas técnicas que son más usuales en la formulación de modelos para el manejo del recurso hidráulico.

**a. Programación Lineal.**

Su estructura matemática es:

$$OPT X_0 = \sum_{j=1}^N c_j x_j \quad j=1, \dots, N$$

$$s.a.: \sum a_{ij} x_j \{ \leq = \geq \} b_i \quad i=1, \dots, m$$

$$x_j \geq 0$$

La programación lineal puede definirse como una técnica matemática para determinar la asignación óptima de los recursos limitados de una organización o sistema. Los requisitos básicos necesarios para emplear esta técnica son:

1. Función objetivo (Xo) lineal bien definida. Este objetivo puede servir para maximizar la utilidad o beneficios utilizando los recursos disponibles, o bien, producir el mínimo costo posible usando una cantidad limitada de factores productivos, o bien, determinar la mejor distribución de los factores productivos dentro de un cierto período.
2. Caminos alternativos de acción. Debe ser posible hacer una selección entre diversas combinaciones o alternativas de acción.
3. La función objetivo lineal y las restricciones lineales deben expresarse matemáticamente. La linealidad es un término que se usa para describir sistemas de ecuaciones simultáneas de primer grado.
4. Las variables deben estar interrelacionadas. Debe ser posible formular relaciones matemáticas entre las variables.
5. Los recursos deben ser de aprovisionamiento limitado. Los recursos deben de ser finitos y económicamente cuantificables.

**b. Programación Dinámica.**

La programación dinámica puede definirse como una técnica

---

matemática que da solución a una serie de decisiones secuenciales, cada una de las cuales afecta a decisiones futuras. Se utiliza para enfrentar situaciones que requieren la toma de una serie de decisiones, en las que el resultado de cada una depende de los resultados de una o de varias decisiones previas de la serie. En pocas palabras, la P.D. estudia problemas con variaciones en relación al tiempo.

**c. Programación Entera.**

A la clase de problemas de programación que se obtienen del modelo general de programación lineal imponiendo los requerimientos adicionales de que las variables sólo pueden tener valores enteros, se les conoce como problemas de programación lineal entera. Esta técnica es adaptable a problemas que permitan obtener sólo números para la solución final.

Una variante de la programación entera es la programación lineal mixta. Esta técnica se aplica a problemas en los que algunas de las variables son continuas, mientras que otras sólo tienen valores enteros.

Un ejemplo de un modelo de programación entera es el que a continuación se muestra:

$$\text{Maximizar } Z = 2X_1 + X_2$$

$$\text{s.a.: } 10X_1 + 10X_2 \leq 9$$

$$10X_1 + 5X_2 \geq 1$$

$X_1, X_2$  enteros no negativos

**d. Programación no Lineal.**

Su estructura matemática es:

$$\text{OPT } F(X^*)$$

$F$  es no lineal.

$$\text{s.a.: } R_i(X^*) = 0$$

$R_i$  puede ser lineal o no.

Los problemas de programación no lineal que se han estudiado ampliamente son aquellos en los cuales las restricciones son

lineales y la función objetivo es no lineal. Para muchos de estos problemas, la función objetivo se describe como la suma de una forma lineal más una forma cuadrática, es de decir, la función objetivo contiene términos elevados al cuadrado. En algunos casos, se pueden usar métodos del cálculo para resolver el problema. En otros casos, los procedimientos de la programación cuadrática son más eficientes para la resolución del problema.

Otros problemas que pueden resolverse por métodos de programación no lineal incluyen aquellos cuya función objetivo y restricciones son no lineales.

#### e. Programación por Metas.

El modelo general de la programación por metas puede expresarse matemáticamente así:

$$\text{Minimizar: } \sum_{i=1}^m W_i (d_i^+ + d_i^-)$$

$$\text{s.a.: } \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j + d_i^- - d_i^+ = b_i$$

$$x_j, d_i^-, d_i^+ \geq 0$$

donde:

$x_j$  = variable de decisión

$W_i$  = pesos de ponderación asignados a cada una de las metas

$d_i^+$  y  $d_i^-$  = grado de sobrelogro y sublogro de cada meta

La programación por metas es una aplicación especial de la programación lineal, capaz de manejar una sola meta con múltiples submetas, o varias metas con múltiples submetas. En este sentido, la programación lineal conveniente es un caso especial de la programación por metas, la cual consta de una sola meta con una o varias submetas.

**f. Técnicas de Simulación.**

La simulación es una técnica cuantitativa que utiliza un modelo matemático computarizado para representar la toma real de decisiones bajo condiciones de incertidumbre, con objeto de evaluar cursos alternativos de acción con base en hechos y suposiciones. Se podría decir que los pasos necesarios para llevar a cabo un experimento de simulación son:

- Definición del sistema. Es necesario hacer primeramente un análisis preliminar del mismo, con el fin de determinar la interacción del sistema con otros sistemas, las restricciones del sistema, las variables que interactúan dentro del sistema y sus interrelaciones, las medidas de efectividad que se van a utilizar para definir y estudiar el sistema y los resultados que se esperan obtener del estudio.
- Formulación del modelos. Es necesario definir y construir el modelo con el cual se obtendrán los resultados deseados, para lo que se definirán todas las variables que forman parte de él y sus relaciones lógicas.
- Colección de datos. Antes de obtener los datos es muy importante que se definan con claridad y exactitud los datos que el modelo va a requerir y de que manera se van a conseguir.
- Implementación del modelo en la computadora. El siguiente paso es definir si se utiliza algún lenguaje o algún paquete de simulación.
- Validación. A través de esta etapa es posible detallar deficiencias en la formulación del modelo o en los datos alimentados al modelo.
- Experimentación. Consiste en generar los datos deseados y en realizar análisis de sensibilidad de los índices requeridos.
- Interpretación. Se interpretan los resultados que arroja la

simulación y en base a esto se toma una decisión.

- Documentación. Se requerirá de un manual para que el usuario pueda interpretar y usar el modelo.

**g. Análisis de series de tiempo.**

Esta técnica busca formular modelos matemáticos para encontrar el comportamiento matemático de una masa de datos, vistos en el tiempo para determinar lo familiar en ellos: el modelo.

Una serie de tiempos es el conjunto de datos de un fenómeno observado en el tiempo.

Las series son útiles como parte de la obtención de buenos pronósticos. También es posible aplicarlas en el control estocástico donde un sistema se analiza en función de sus entradas y salidas siendo por lo menos una de ellas del tipo estocástico o aleatorio.