

## **1. Generalidades**

En este capítulo abordaré la importancia del enfoque sistémico dentro de la Ingeniería Civil. Para ello describiré las cualidades del enfoque reduccionista del método científico y mostraré sus limitantes al abordar problemas complejos de Ingeniería. Posteriormente describiré los puntos básicos de la Teoría General de Sistemas y definiré las características esenciales de un sistemas y su clasificación. Esto me permitirá enmarcar a los proyectos de Ingeniería Civil dentro de la categoría de los sistemas de actividad humana. Más adelante explicaré las metodologías de sistemas en general y la metodología de la Ingeniería de Sistemas en particular, demostrando la importancia que tiene el estudio de esta última para la formación de ingenieros civiles capaces de resolver problemas complejos de manera eficaz y eficiente. Finalmente, sintetizaré la aplicación, en los proyectos de Ingeniería Civil, de los conceptos tratados

### **1.1 El Método Científico**

La Ingeniería de Civil es una disciplina que busca la solución más eficaz y eficiente a necesidades de infraestructura de la sociedad. Para obtener estas soluciones hace uso de técnicas y metodologías, que tienen sus bases en las ciencias básicas y de la ingeniería y que han sido adecuadas y perfeccionadas por la experiencia en campo; dando al ingeniero civil un cuerpo de conocimientos científicos sólidos para enfrentar a la naturaleza y transformarla.

El método científico utiliza un enfoque reduccionista al encarar los problemas, se fragmenta el problema en partes, se analizan individualmente, se les encuentra una solución y finalmente se integran para ofrecer una solución global. Sin duda, el avance científico y tecnológico de nuestra era es resultado de este enfoque.

Sin embargo, en las problemáticas que atiende la Ingeniería Civil, las soluciones de los problemas totales obtenidas con esta visión no suelen ser las mejores. La razón es que los proyectos de Ingeniería Civil no son experimentos de laboratorio. El enfoque reduccionista exige un aislamiento de los elementos para estudiarlos, situación imposible en

la vida real. No podemos aislar la cimentación de la superestructura o la construcción de la administración y los aspectos legales, por ejemplo.

El enfoque reduccionista ve a los seres humanos como máquinas que responden con precisión a impulsos controlables. En los proyectos de Ingeniería Civil el capital humano es crucial. Requieren una enorme cantidad de mano de obra y no se pueden realizar sin especialistas de diversas áreas, con distintas visiones del mundo. Recordemos además que los ingenieros civiles no construyen máquinas que transformen insumos, transforman el mundo para satisfacer necesidades sociales. Hasta ahora el método reduccionista no ha sido capaz de predecir el comportamiento humano con precisión.

El enfoque de sistemas se basa en el principio fundamental que todos los aspectos de un problema humano deben ser tratados en conjunto de una manera racional. Es un intento de combinar teoría, empirismo y pragmatismo, y observa los objetos desde un nivel superior, no desde el elemental.

Este enfoque integrador brinda al ingeniero civil una visión más amplia de la naturaleza de los problemas, permitiéndole realizar planteamientos más creativos para solucionarlos, y facilitando la comunicación en equipos multidisciplinarios. Al estudiar el objeto integral o sistema encuentra las relaciones e interacciones entre elementos, que en el enfoque reduccionista aparecen inconexos. También estudia el ambiente externo del sistema, brindando una perspectiva global.

## **1.2 La Teoría General de Sistemas**

Existen fenómenos donde el todo tiene propiedades que no son explícitas en los componentes, es decir, que sólo se manifiestan al interactuar los elementos entre ellos y con su entorno. A un conjunto de elementos con sus interacciones le llamamos sistema (Bertalanffy, 1976).

Este concepto tiene sus orígenes en la Teoría General de Sistemas del biólogo alemán Ludwig von Bertalanffy formulada en la tercera década del siglo XX, pero difundida después de la Segunda Guerra Mundial, época más propicia por los avances en la Investigación de Operaciones y la Cibernética. Esta teoría, más allá de ocuparse de siste-

mas particulares, trata las propiedades generales de los sistemas en un nivel abstracto, sea cual sea su forma física o dominio de aplicación. Se fundamenta en que todo tipo de sistemas, sin importar su naturaleza interna tienen características en común. Así, la Teoría General de Sistemas es una metadisciplina que muestra un corte perpendicular de todos los campos del conocimiento.

Esta teoría permitió a la ciencia expandir sus fronteras rápidamente, pues la investigación realizada en un campo específico del conocimiento, puede ser trasvasada a otro completamente distinto. Teorías termodinámicas sobre los gases pueden servir para interpretar fenómenos económicos, o interacciones propias de la biología celular pueden seguir las mismas leyes que el flujo de información en una empresa. La búsqueda de isomorfismos es una prioridad de la Teoría General de Sistemas, pues modelos similares tendrán leyes similares. Esto representa un ahorro tremendo de tiempo y energía, en el desarrollo de nuevas teorías.

Para el ingeniero civil esta teoría representa una poderosa herramienta. Él debe abordar campos del conocimiento tan dispares como la Electricidad, la Geología, la Ecología, la Mecánica, la Economía o el Derecho, entre otros, y por lo general, no lo hará de manera aislada sino simultánea. En la práctica se ha demostrado, que gracias al enfoque sistémico, es más fácil para un ingeniero abordar exitosamente problemáticas de financiamiento, que para un economista abordar cuestiones ingenieriles.

Cabe mencionar que los objetivos formales de la Teoría General de Sistemas son desarrollar una metodología para la descripción del funcionamiento y comportamiento de sistemas, elaborar modelos generales de ellos, y formular teorías sobre sistemas generalizados (2001, Skyttner, p. 37). Para fomentar este campo de conocimiento se fundó en 1954 la Sociedad Internacional para la Teoría General de Sistemas, actualmente la Sociedad Internacional de Ciencia de Sistemas<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> La ISSS (por sus siglas en inglés) cuenta con un portal en Internet donde difunde sus actividades y conocimientos generados: <http://iss.org>

Aunque el trabajo del ingeniero civil no sea el desarrollo teórico de la Ciencia de Sistemas, es de suma importancia que tenga un conocimiento claro de su funcionamiento, pues estará aplicándola en cada proyecto que emprenda.

### **1.3 Características de los Sistemas**

Gracias al desarrollo de la Teoría General de Sistemas se han descubierto los principios fundamentales en que se basan ellos.

*Interrelación e interdependencia de los objetos y sus atributos.* Un conjunto de elementos sin relación y sin interdependencia jamás constituirán un sistema.

*Holismo.* Las propiedades holísticas no detectadas por análisis debe ser posible definir las en el sistema. Son propiedades emergentes producto de la sinergia entre los elementos.

*Teleología.* La interacción sistémica tiene como resultado una meta, estado final a alcanzar o el acercamiento a un punto de equilibrio.

*Proceso de transformación.* Todos los sistemas, en la búsqueda de sus metas, transforman insumos en productos. En sistemas cerrados los insumos iniciales son los únicos de los que dispone el sistema; en sistemas abiertos los insumos adicionales provienen del ambiente (figura 1.1).

*Entropía.* Todos los sistemas naturales tienden al desorden, aumentan su entropía. Los sistemas vivos pueden revertir este proceso importando energía del ambiente, para crear lo que se conoce como neguentropía.

*Regulación.* La interrelación de los objetos que constituyen el sistema debe ser regulada de alguna manera, para que la meta sea alcanzada. Esto implica que las desviaciones sean detectadas y corregidas. Por ello la retroalimentación es un requisito necesario para un control efectivo.

*Jerarquía.* Los sistemas son totalidades complejas compuestas de subsistemas más pequeños.

*Especialización.* En sistemas complejos unidades especializadas desarrollan funciones específicas. Esta característica es también llamada diferenciación o división del trabajo.

*Equifinalidad y multifinalidad.* Los sistemas abiertos pueden converger a la misma meta a partir de distintos estados iniciales, o diverger a distintos estados finales partiendo del mismo inicio.

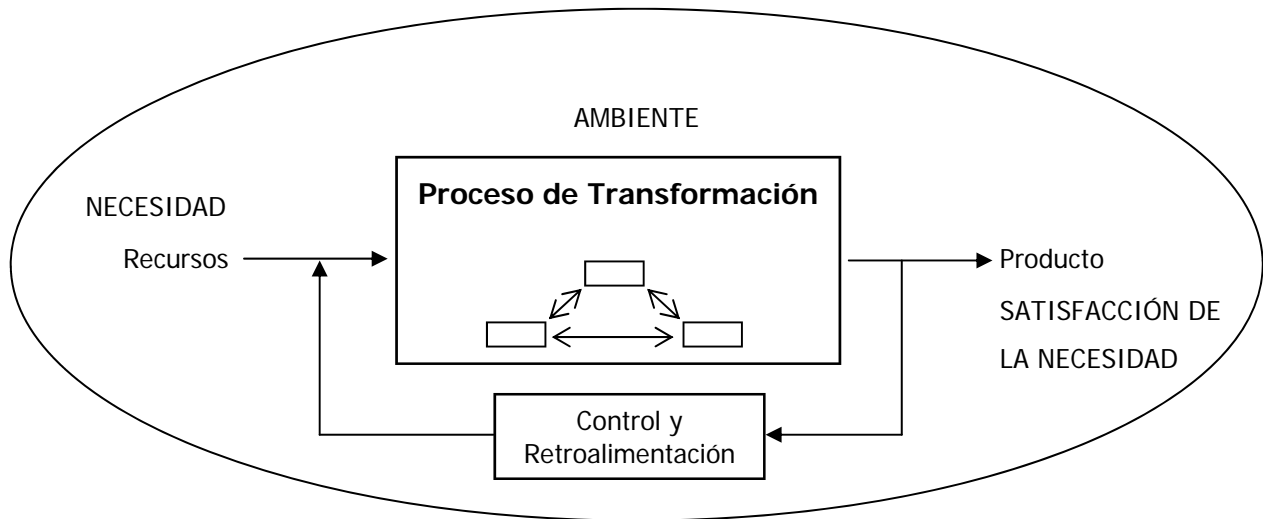


Figura 1.1 Sistema abierto

Tres condiciones son clave para distinguir un sistema. La organización, un agregado de elementos no es un sistema. La identidad continua, algo que no es capaz de preservar su estructura ante el cambio no se reconoce como un sistema. La búsqueda de objetivos, es decir la función del sistema (2001, Skyttner, p. 54).

#### 1.4 Clasificación de los Sistemas

Se han propuesto diversas jerarquías para el estudio de sistemas basadas en la complejidad (Boulder) o en la organización (Jordan), entre otras. Según Checkland (1997, p. 130) presentan inconsistencias y él crea otra categorización a partir de su origen (figura 1.2).

*Sistemas naturales.* Su origen coincide con el del universo y son resultado de las fuerzas y procesos que lo caracterizan. Por ejemplo los átomos, las galaxias y los organismos vivos.

*Sistemas físicos diseñados.* Son resultado del diseño consciente con un propósito humano. En esta categoría entran las herramientas, las máquinas y el arte plástico.

*Sistemas abstractos diseñados.* Son el producto ordenado de la mente humana. Como las matemáticas, la filosofía y la poesía.

*Sistemas de actividad humana.* Son menos tangibles que los sistemas naturales y los diseñados, son actividades humanas ordenadas conscientemente, que tienen como resultado algún propósito. Pueden ir desde los hábitos alimenticios de un grupo humano, pasando por la organización de una empresa, hasta la política mundial.

*Sistemas trascendentales.* Son sistemas que están más allá del conocimiento.

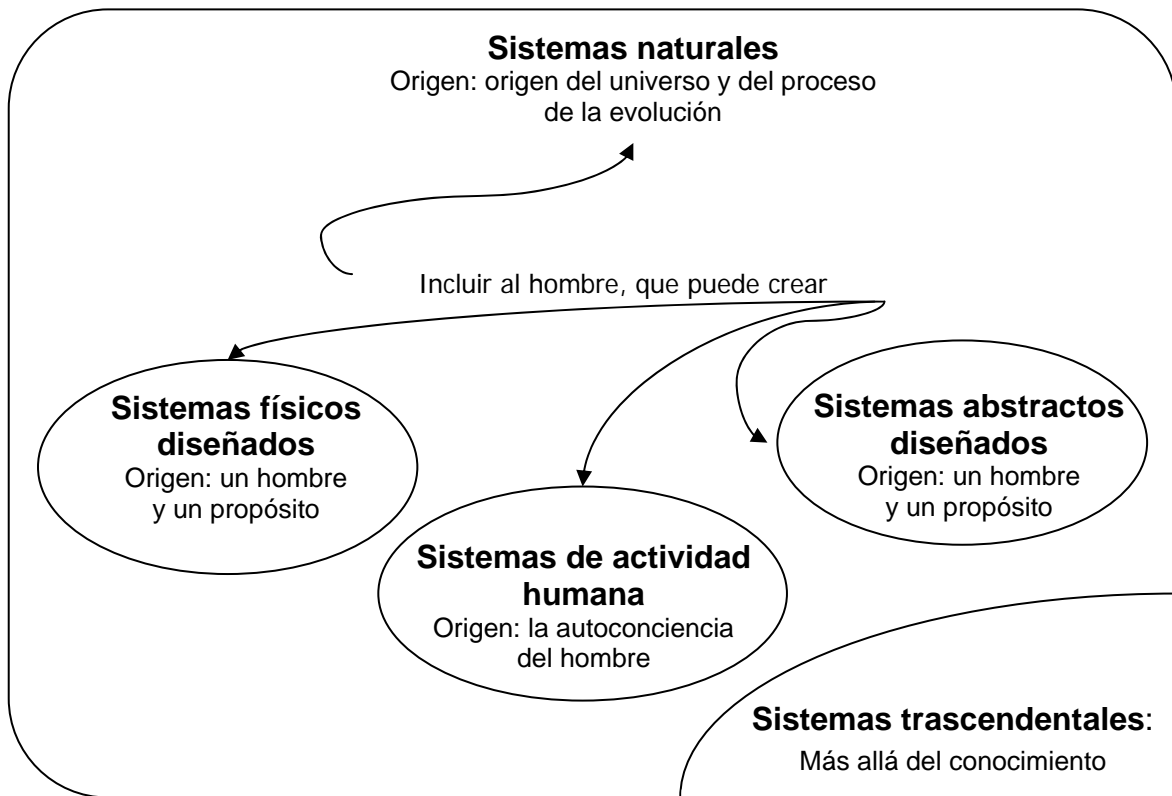


Figura 1.2 Clasificación de Sistemas de P. Checkland

Son los sistemas de actividad humana los que presentan mayores dificultades para su análisis ya que, a diferencia de los sistemas naturales, el punto de vista del observador influye en su diagnóstico. De ahí que los métodos de la ciencia sean adecuados al estudio de los sistemas naturales, y el enfoque sistémico a los de actividad humana. Sobre los sistemas diseñados, tanto físicos como abstractos, destaca que existen debido a que cubren una necesidad en los sistemas de actividad humana (1997, Checkland, p. 136).

### **1.5 Metodologías de Sistemas**

El enfoque de sistemas ha dado lugar a estudios teóricos y aplicados. A la par y bajo el cobijo de la Teoría General de Sistemas surgieron disciplinas que aportan conceptos, metodologías y métodos para comprender y utilizar sistemas específicos (Johanssen, 2002, p. 28).

*La Cibernética* estudia los mecanismos de comunicación y el control en las máquinas y los seres vivos. Se basa en los principios de retroalimentación y de homeostasis.

*La Teoría de la Información* considera la información como una medida de la organización de un sistema. Llega a esta conclusión a través del isomorfismo matemático con la entropía.

*La Teoría de los Juegos* analiza matemáticamente la competencia entre dos sistemas antagonistas para maximizar ganancias o minimizar pérdidas.

*La Teoría de Decisión* busca la selección racional de alternativas dentro de las organizaciones y estudia la conducta de los decisores al afrontar el proceso de decisión.

*La Topología* es una rama de las matemáticas asociada a la geometría. A probado ser de gran utilidad en el estudio de la estructura organizacional y de las conexiones entre las partes de los sistemas.

*El Análisis Factorial* permite el aislamiento de factores en problemas que involucran múltiples variables. Su principal campo de acción han sido las ciencias sociales.

*La Investigación de Operaciones* tiene como objetivo ayudar a la administración a determinar su política y acciones de una manera científica, involucrando conceptos como el azar y el riesgo.

*La Ingeniería de Sistemas* planea, diseña, evalúa y construye científicamente sistemas hombre-máquina donde existe heterogeneidad de componentes. Su campo de aplicación principal son los sistemas industriales, de alta complejidad con división del trabajo y gran especialización. El objetivo de esta disciplina es el aumento de la productividad.

### **1.6 La Ingeniería de Sistemas**

La Ingeniería de Sistemas utiliza las técnicas y modelos matemáticos de la Investigación de Operaciones para descubrir las interacciones entre los componentes de un sistema. Pero enfatiza en la planeación y diseño de nuevos sistemas y tiene como meta formular planes de largo alcance que sirvan de marco para vincular proyectos individuales, es decir, plantear el óptimo general del sistema para determinar los óptimos parciales que satisfagan los objetivos particulares de los subsistemas (Acosta, 2002, p. 16).

Así los sistemas que estudia son conjuntos de hombres y máquinas que tienden a la consecución de un objetivo, a través de un proceso de transformación, estos sistemas pueden ser formulados matemáticamente, tiene dispositivos de control y retroalimentación para conducir y adaptar el proceso, y sus entradas y salidas dependen del medio, es decir, son abiertos (Arbones, 1991, p. 29).

La metodología típica para solución de un problema mediante la Ingeniería de Sistemas según Hall es la siguiente (Skyttner, 2001, p. 251):

1. *Definición del problema.* Identificación y definición de una necesidad.
2. *Elección de los objetivos.* Definición y confrontación de las necesidades físicas y el sistema.
3. *Síntesis del sistema.* Creación de sistemas alternativos posibles.
4. *Análisis de sistemas.* Análisis de los sistemas hipotéticos bajo la luz de los



objetivos.

5. *Selección de sistemas.* Selección de la alternativa más promisoría.
6. *Desarrollo del sistema.* Abarca hasta el estadio de prototipo.
7. *Ingeniería en curso.* Realización del sistema más allá del prototipo y que incluye el monitoreo, la modificación y la retroalimentación de la información al diseño.

Esta metodología ha tenido un gran éxito al resolver problemas estructurados - o sistemas duros, - es decir aquellos en los que el objetivo es definible. Es esencial conocer y formular el fin que queremos alcanzar al inicio del estudio. Una vez definido el objetivo podremos seleccionar un medio para alcanzarlo con eficiencia económica.

Cuando los problemas son no estructurados, cuando no se tiene siquiera claro la naturaleza del problema pero se tiene un sentido de desajuste, se debe recurrir a las metodologías de sistemas suaves. Estos sistemas tienen condiciones que se deben aliviar más que problemas que se deben resolver (Checkland, 1997, p. 178).

### **1.7 Los proyectos de Ingeniería Civil**

Los proyectos de la Ingeniería Civil se dividen en cuatro fases planeación, diseño, construcción y uso y mantenimiento. A lo largo de todo el proceso habrá retroalimentación que permitirá enfrentar los cambios e imprevistos para alcanzar los objetivos particulares y globales. En cada fase se hace uso de los recursos temporalmente organizados en pos de esos objetivos y acordes con las limitaciones impuestas al proyecto, como son costo, tiempo de ejecución y especificaciones técnicas. Cada proceso del proyecto tiene sus características particulares y puede ser abordado como un subsistema específico.

El diseño del sistema proyecto de Ingeniería Civil debe ser tal que los equipos que participan tengan claro el objetivo general, para que así ellos puedan plantear sus objetivos particulares. Esto debe desembocar en una adecuada organización que brinde una estructura eficaz y eficiente al proyecto. El planteamiento inicial de esta estructura no

se mantendrá a lo largo del proyecto, ya que las condiciones del medio irán cambiando conforme se satisfacen las necesidades que lo generaron y mientras consume los recursos disponibles. En éste, continuamente ingresarán insumos financieros y materiales, y se integrarán o se separarán de él numerosos individuos. Continuatamente las condiciones que generaron el proyecto irán cambiando. Internamente las condiciones variarán, pues no sólo intervienen máquinas predecibles y controlables, intervienen individuos con conciencia y motivaciones propias.

Podemos decir que un proyecto de Ingeniería Civil es un sistema de actividad humana que tiene por objetivo producir un sistema físico diseñado (figura 1.3). Es un sistema hombres-máquina, abierto, de gran complejidad y regulable. Además muchos de sus subsistemas son modelables matemáticamente y en general son sistemas duros.

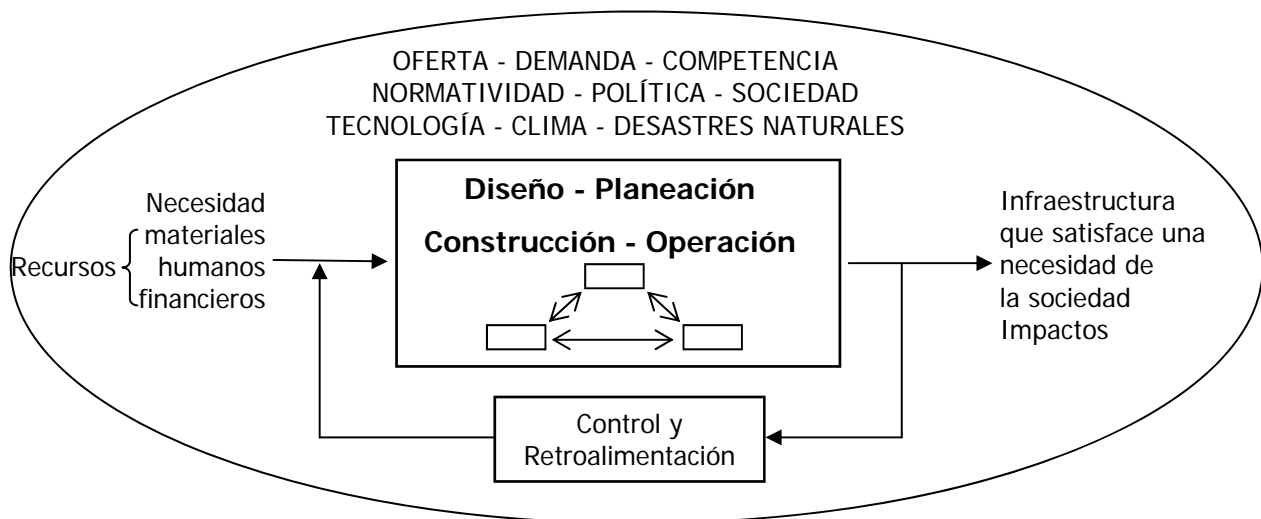


Figura 1.3 Sistema proyecto de Ingeniería Civil

Es así que el estudio de los métodos de la Ingeniería de Sistemas son de vital importancia para la formación de futuros ingenieros civiles, quienes no sólo serán capaces de enfrentar problemas de optimación de recursos, sino que gracias al enfoque holístico serán capaces de participar en el diseño de soluciones integrales, multidisciplinarias y sostenibles a los problemas de la sociedad contemporánea.