

El pensamiento sistémico como herramienta metodológica para la resolución de problemas

Revista Soluciones de Postgrado EIA, Número 8. p.43-65. Medellín, enero-junio de 2012

Federico Liévano Martínez*, Jesús Enrique Londoño**

* Ingeniero Industrial. MSc Intelligent Systems. MSc Ingeniería de Sistemas. Investigador. Fundación Universitaria Católica del Norte. Correo electrónico: flievano@ucn.edu.co

** Ingeniero de Sistemas. Especialista en Administración de Empresas. Especialista en Gestión de la Calidad Universitaria. Magíster en Comercio Electrónico. Doctorando en Ingeniería de Sistemas e Informática. Investigador y Coordinador de Investigación Informática. Fundación Universitaria Católica del Norte. Correo electrónico: jelondono@ucn.edu.co

EL PENSAMIENTO SISTÉMICO COMO HERRAMIENTA METODOLÓGICA PARA LA RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS

Federico Liévano Martínez, Jesús Enrique Londoño

Resumen

En este artículo se presenta un enfoque teórico que muestra al pensamiento sistémico como herramienta metodológica para el análisis y solución de problemas. Se discute cómo, a pesar de ser una disciplina ampliamente usada en diferentes áreas científicas, en muchas ocasiones se desconocen en el ámbito operativo las herramientas prácticas del pensamiento sistémico. El esquema teórico propuesto ilustra algunas herramientas del pensamiento sistémico que son útiles en el entendimiento, modelamiento y resolución de problemas complejos.

Palabras clave: *Análisis de Sistemas, Dinámica de Sistemas, Modelos de Sistemas, Pensamiento Sistémico.*

Abstract

This article presents a theoretical approach that shows the systems thinking as a methodological tool for the analysis of problems. We discuss how the technique is widely used in different scientific areas, nevertheless in several times is unknown the systems thinking practical tools in operative's scopes. The theoretical approach proposed, depicts some systems thinking tools that are used for the comprehension, modeling and resolution of complex problems.

Key words: *System Analysis, System Dynamics, System Models, Systems Thinking,*

El pensamiento sistémico como herramienta metodológica para la resolución de problemas

Federico Liévano Martínez, Jesús Enrique Londoño

Recibido: 27 de marzo de 2012. Aprobado: 31 de mayo de 2012
Revista Soluciones de Postgrado EIA, Número 8. pp. 43-65. Medellín, enero-junio de 2012

Introducción

El desarrollo tecnológico y la conformación de estructuras avanzadas de información en todo nivel generan problemas cada vez más difíciles de resolver y entornos con fenómenos incomprensibles para el ser humano. El entendimiento de problemas que surgen como consecuencia de la organización de sistemas sociales como el impacto del cambio climático en sistemas naturales o el efecto de la volatilidad de los mercados en los sistemas empresariales, fenómenos complejos que surgen en ámbitos de la ingeniería, entre otros, ameritan el estudio de técnicas que permitan comprender y mejorar la forma como se abordan aquellos problemas y fenómenos complejos (Sterman, 1994).

La aplicación del pensamiento sistémico (PS) en ámbitos académicos y prácticos establece un marco conceptual que ayuda a realizar el primer acercamiento

a los problemas (Senge 1990). Una gran cantidad de métodos, herramientas y principios abarcan el pensamiento sistémico, todos con una meta común de entender las relaciones dentro del sistema y de esclarecer las propiedades emergentes del mismo. Sin embargo, en muchas ocasiones se desconocen las herramientas prácticas y concretas del PS que pueden ser usadas en ámbitos operativos y reales.

El pensamiento sistémico ha sido aplicado en diferentes disciplinas científicas, entre ellas la medicina, la ingeniería, la psicología, la economía, la administración y los negocios, entre otras (ver Tabla 1). Y se ha demostrado que es un poderoso enfoque para entender la realidad del sistema enfatizando las relaciones entre las partes del mismo, en lugar de ver el sistema como un todo (Checkland y Scholes, 1999). No obstante y a pesar de su popularidad, existen dificultades para definir lo que

constituye el pensamiento sistémico y cómo aplicar las ideas principales en un campo particular o un contexto práctico (Cabrera 2008).

Pensar sistémicamente significa: esbozar las distinciones entre una identidad y una no identidad, reconocer las propiedades bidireccionales (afecta y efecto) de las relaciones, organizar las partes y totalidades en sistemas alternativos anidados y tomar nuevas perspectivas para transformar puntos de vista (Cabrera, 2008). Entender y aplicar estos 4 patrones estructura el entendimiento de las realidades, constituye las bases para estudios posteriores de modelamiento, e incluso, ayuda a predecir fenómenos y comportamientos de los sistemas.

El pensamiento sistémico puede ser aplicado en múltiples áreas del conocimiento; es una herramienta poderosa que permite al especialista abordar cualquier tipo de situaciones problemáticas y le ayuda a construir modelos de la realidad con el fin de plantear políticas de mejora. Esta técnica ayuda a entender muchos de los comportamientos reales y facilita ver los problemas bajo otras perspectivas (Checkland y Scholes, 1999). También ayuda a ampliar el razonamiento humano, contribuye en la eliminación de paradigmas mentales que dificultan la comprensión de los procesos y sistemas, y fomenta la apertura a nuevo conocimiento y a la práctica científica.

En este documento se mencionan algunas herramientas del pensamiento sistémico que son útiles en ámbitos prácticos y se revisan algunos estudios y aportes en el estado del arte que enfocan la teoría a usos prácticos, organizacionales y socioeconómicos. El documento presenta el siguiente orden: primero se introduce el Pensamiento Sistémico como un instrumento metodológico, explicando tres pasos para el modelamiento de sistemas: la articulación del problema, el análisis de sistemas y el uso de modelos. Luego se mencionan herramientas del pensamiento sistémico y se muestran algunos de los estudios más representativos de la metodología.

1. El PS como herramienta metodológica

El pensamiento sistémico es una de las conceptualizaciones o técnicas de pensamiento de mayor impacto en la actualidad por constituir un marco conceptual que permite representar problemas dentro de patrones totales o generales. La implementación de esta práctica permite el estudio de cualquier fenómeno y su experimentación ha contribuido en la resolución de múltiples problemas, donde otras perspectivas y áreas del conocimiento han sido incapaces de abordar (Cavaleri y Sterman, 1997).

Los conceptos fundamentales del pensamiento sistémico fueron desarrollados en la primera parte del siglo 20

en disciplinas tales como: la biología, ecología, psicología y cibernética. Nace formalmente de la teoría general de sistemas, inventada por Ludwig Von Bertalanffy quien la introdujo a partir del cuestionamiento de la aplicación del método científico en problemas de la biología, debido a que este método se basaba en una visión mecanicista y causal que lo hacía débil como esquema para la explicación de los grandes problemas que se dan en los sistemas vivos (Bertalanffy, 1968). Por lo tanto, y a partir de este cuestionamiento, se definió la teoría capaz de describir la estructura y el comportamiento de los sistemas, identificando sus propiedades, relaciones y reformulando el paradigma intelectual para entender mejor el mundo que nos rodea.

Por consiguiente, el pensamiento sistémico se define como la actitud del ser humano que se basa en la percepción del mundo real en términos de totalidades para su análisis y comprensión, y difiere del planteamiento del método científico, que sólo percibe partes de éste de manera inconexa (Chandler y Boutilier R., 1992). Integra tanto el análisis de las situaciones, como el planteamiento de hipótesis dinámicas que proponen soluciones en las cuales se tienen que considerar diversos elementos y relaciones que conforman la estructura de lo que se define como “sistema” y su entorno.

Un sistema es una entidad que mantiene su existencia y funcionamiento como un *todo* a través de las interacciones de sus partes (O'Connor y McDermott, 1997). Bajo esta perspectiva, el sistema se considera como un elemento dotado de múltiples interacciones y propiedades, el cual tiene un fin común donde todas las partes aportan una contribución para cumplirlo.

Las ideas fundamentales de pensamiento sistémico no han cambiado significativamente sobre los años; éstas generalmente expresan lo siguiente:

- Las situaciones se ven de manera holística, compuestas por un conjunto de elementos diversos que interactúan dentro de un entorno.
- Reconocer que las relaciones o interacciones dentro de los elementos son más importantes que los mismos elementos al determinar el comportamiento del sistema.
- Reconocer que existe una jerarquía de niveles del sistema y propiedades emergentes en esos distintos niveles.
- Aceptar (especialmente en sistemas sociales) que las personas actúan acorde con sus propios propósitos y racionalidades.

En el ámbito organizacional, por ejemplo, esta lógica tiene una gran incidencia, puesto que es posible ver a la organización, ya no como una suma de sus partes que trabajan aisladas

cumpliendo objetivos independientes, (Bakken, *et al*, 1992) –como lo plantea el esquema tradicional– sino que dicha organización puede ser el resultado de todas las interacciones entre los elementos de la compañía, considerando que todos los elementos poseen una fuerte influencia y que los comportamientos emergentes o resultados (positivos o negativos) de la misma dependen de la sinergia, comunicación, conexión, fuerza de trabajo y toma de decisiones que surgen a nivel de cada elemento (Dangerfield y Roberts, 1995).

Estos supuestos implican que el resultado final está condicionado por los intereses y valores que posean dichos entes involucrados. Por tal motivo es fundamental apuntar a que exista un interés común centrado en la necesidad de la conservación de la compañía.

De manera específica, el enfoque sistémico señalado, aplicado al estudio de las organizaciones, plantea una visión interconectada y multidisciplinaria que posibilita analizar la empresa de manera integral, permitiendo identificar y comprender con mayor claridad y profundidad los problemas organizacionales, sus múltiples causas y consecuencias (Bakken, *et al.*, 1992). Así, y viendo a la organización como una entidad integrada, conformada por partes que se interrelacionan entre sí a través de una estructura que se desenvuelve en un entorno determinado con caracte-

rísticas y realimentaciones sistémicas, se está en capacidad de poder detectar las problemáticas y procesos de cambio que ocurren dentro de la misma (Gregory A.J. Target Setting, 2007). Esto implica adoptar entendimiento del desarrollo y evolución del talento humano, del uso de recursos, del avance tecnológico, de la gestión del conocimiento, de la implementación de los modelos organizacionales y de los procesos de toma de decisión.

En ámbitos relacionados con la ingeniería, por ejemplo, el pensamiento sistémico tiene una fuerte incidencia y aplicación donde su conceptualización contribuye en el modelamiento de sistemas y fenómenos complejos a partir de la concepción de los objetos (naturales o artificiales) y sus dinámicas (simples o complejas) existentes o intangibles (Forrester y Senge, 1980).

El pensamiento sistémico se convierte entonces, en una herramienta útil para la formulación de modelos en muchos ámbitos, lo cual facilita al experto la interacción con el problema de estudio y conlleva a la determinación de los elementos fundamentales que deben involucrar los modelos con el objeto de plasmar adecuadamente las realidades de estudio (Doyle, *et al.*, 1996).

Habitualmente, se siguen tres principios básicos del pensamiento sistémico en torno al modelamiento de los sistemas (Checkland y Scholes, 1999):

1. La articulación del problema
2. El análisis de sistemas
3. El uso de modelos

A continuación se explica cada uno de estos pasos.

1.1 La articulación del problema

La articulación del problema es el paso en el cual el modelador se cuestiona sobre el problema a resolver. Aquí debe identificar el problema real a estudiar, sin dejarse sesgar por los síntomas o por las dificultades que ocurren en el mismo. En este paso debe identificarse el límite y la resolución del modelo y el propósito fundamental del estudio.

Para esta caracterización inicial del problema es adecuado discutir en grupo con expertos en el área, realizar una investigación histórica de las dinámicas del fenómeno, recolectar datos que ayuden a revelar tendencias y usar observación directa.

1.2 El análisis de sistemas

Los conceptos de análisis de sistemas son útiles en problemas relacionados con el planeamiento económico, las ciencias sociales, ambientales y la geografía (Wilson, 1981). La idea base del análisis de sistemas en estos ámbitos es generar un entendimiento profundo de los objetos de estudio o sistemas de interés, y a partir de este conocimiento poder predecir el comportamiento de tales sistemas en el futuro.

Bajo esta perspectiva, se entiende como sistema el objeto de estudio que tiene una colección de componentes que están relacionados unos con otros o que interactúan entre sí de varias maneras. Algunos de estos componentes a menudo se juntan con otros sistemas o componentes externos estableciendo aun más relaciones. El entorno fuera del sistema es conocido como ambiente y algunas veces es conveniente pensar que el sistema y el ambiente están separados por un límite donde puede haber transferencia o flujos de información (o material).

Un sistema que no comparte flujos (información, material, etc.) con el ambiente es llamado sistema cerrado; de manera contraria es llamado sistema abierto, un sistema que comparte flujos e información con el ambiente (Gregory A.J., 2007). Son llamados insumos, aquellos elementos o flujo de información que entran al sistema. Por el contrario, se llaman productos o resultados aquellos que salen del sistema hacia el ambiente (Wilson, 1981).

La manera en la cual un sistema es visto y definido depende del nivel de resolución en el cual es adoptado. Un componente que es visto a un nivel grueso de resolución puede tener una estructura interna y un número de componentes distinto a comparación con un nivel más fino de resolución (Forrester, 1977). El nivel de resolución apropiado depende de los propósitos de análisis y debe

ser escogido en relación con la efectiva formulación de problema y la facilidad con la cual una solución puede ser obtenida. Adicionalmente, existen tres niveles de escogencia de escala: la escala espacial, relacionada con el número de unidades espaciales o zonas que serán usadas en el análisis; la temporal, que se refiere a las unidades de tiempo, y la sectorial que está implicada con el número de tipos de componentes a involucrar en el análisis (Wilson, 1981).

El siguiente paso en el argumento es definir las variables del sistema. Éstas son clasificadas como: variables endógenas, exógenas y de estado. Las variables endógenas, también conocidas como variables internas, surgen a partir de la interacción de los elementos del sistema. Las variables exógenas, a diferencia, son aquellas que son atribuidas por el ambiente (Forrester, 1991). Las variables de estado establecen las características que definen las distintas fases del sistema. De esta manera, los distintos valores asignados a las variables representan las particularidades y las dinámicas en el tiempo del sistema. Igualmente, existen otros elementos llamados parámetros que actúan como valores fijos, que describen aspectos de la estructura y son inalterables durante todo el horizonte de estudio (Wilson, 1981).

Finalmente, y para términos de modelamiento, el comportamiento del sistema debe ser representado por for-

mulaciones lógicas (matemáticas) que describan las interacciones o asociaciones entre los componentes. Con el análisis anterior es posible identificar las propiedades emergentes de los sistemas que no se observan al mirar tan solo sus partes individuales, y otorga la posibilidad de predecir el comportamiento sistémico rompiendo con paradigmas de funcionamiento.

1.3 El uso de modelos

Bajo un enfoque sistémico, los modelos permiten la imitación de operaciones de un proceso o sistema del mundo real a lo largo del tiempo. Son una declaración, no ambigua, de la forma en que interactúan los componentes del sistema bajo estudio (Checkland y Scholes, 1999). Los modelos sirven para mejorar el entendimiento del sistema real, para predecir comportamientos, y para valorar alternativas para mejorarlos y transformarlos. Bajo la perspectiva sistémica, un modelo está compuesto por los componentes más importantes que el diseñador cree afectan el sistema bajo estudio representados en variables exógenas, endógenas y de estado (Sterman, 2000).

Los modelos buscan ser aceleradores de aprendizaje, ya que el modelamiento efectivo está determinado por iteraciones constantes entre experimentos y aprendizaje en el mundo virtual construido, retroalimentados con experimentaciones y aprendizaje del

mundo real. Por lo tanto, el procesamiento de modelado consta de cuatro pasos fundamentales que interactúan constantemente en todo el transcurso de construcción del modelo; estos son: la identificación de relaciones dinámicas, la formulación, la validación y el planteamiento de políticas y la evaluación final (Checkland y Scholes, 1999).

Identificación de relaciones dinámicas. En este paso el diseñador desarrolla una teoría acerca del comportamiento problemático y construye relaciones que explican el fenómeno en términos del enfoque metodológico adoptado. La estructura debe especificar la dinámica del sistema y las reglas de interacción entre variables y agentes involucrados en el modelo.

Formulación del modelo. En este paso se realiza una formalización completa del modelo con todas sus ecuaciones, parámetros y condiciones iniciales; es aquí cuando empieza a descubrir el entendimiento acerca del problema y la habilidad para representarlo.

Validación. Equivale a probar el comportamiento y la estructura del modelo construido. Se debe garantizar que cada variable corresponda a un concepto en el mundo real, y que cada ecuación tenga su fundamento teórico y dimensional. Asimismo, debe efectuarse la confrontación del comportamiento y los resultados del modelo con la estructura real bajo estudio.

Planteamiento de políticas y evaluación. Una vez se tenga entendimiento, confianza en la estructura y comportamiento del modelo se diseñan las políticas para el mejoramiento, implementar nuevas estrategias, estructuras y reglas de decisión que conlleven al sistema al punto deseado.

Los modelos se enmarcan en acercamientos que involucran ciencias exactas, económicas y de la computación. A continuación se describen algunas de las principales disciplinas que han acompañado el uso de modelos, y se describe cómo el pensamiento sistémico puede contribuir a cada una de ellas.

• Modelos económicos

Los modelos económicos han sido propuestos históricamente como formulaciones de las actividades más importantes que incumben a las relaciones sociales y sus dinámicas agregadas. Este tipo de modelos identifica factores productivos, leyes económicas particulares y tratamientos específicos que dan respuesta a los fenómenos de oferta, demanda, uso, asignación, distribución de recursos y productividad. A lo largo de la historia, los modelos económicos han sido enmarcados principalmente con dos consideraciones: la microeconómica que incumbe una visión desagregada de los fenómenos y la macroeconómica que constituye un estudio con una dimensión agregada (Abraham y Hunt, 2002).

A nivel micro, los modelos están estrechamente asociados a las decisiones localizativas e individuales de los agentes, que pueden ser: empresas, organizaciones, familias, entre otras; y la metodología permite representar los fenómenos que construyen el espacio económico; como reglas de mercado, ajuste del precio, asignación de valor, decisiones productivas, ventajas de aglomeración, demanda, accesibilidad, equilibrio e interacción en todas las actividades localizadas (Alonso, 1964). A nivel macro, los modelos intentan plasmar realidades globales, elementos y bienes totales con el fin de extraer indicadores de comportamientos generales.

El pensamiento sistémico es una herramienta que contribuye en el modelamiento económico dado que, en general para todo análisis de este tipo sea macro o micro, deben establecerse claramente los subsistemas en el análisis, sus relaciones e interacciones, sus flujos de información y niveles de resolución entre otras propiedades sistémicas. Todas estas interacciones deben ser claramente definidas con el fin de extraer indicadores que den respuesta a la situación económica de estudio en particular que se quiere modelar.

Un análisis sistémico previo a un modelamiento económico facilita la construcción de circuitos macro y microeconómicos, identifica las sinergias que surgen de la interacción de los entes económicos y de los mercados, ayuda a

definir las relaciones matemáticas que modelan el comportamiento y formalizan la sustentación de las hipótesis que se desean probar con el modelo económico.

• Modelos con funciones de utilidad

Los modelos que usan funciones de utilidad, generalmente están compuestos por dos componentes: un componente determinístico que puede ser calculado a partir de ecuaciones determinadas, y un componente estocástico que refleja la unicidad de los individuos y situaciones que varían (Abraham y Hunt, 2002). Este componente estocástico es normalmente usado para representar el difícil proceso de toma de decisiones humanas, o la incertidumbre que lleva un determinado proceso.

Por otro lado, la base de cambio y toma de decisiones en estos modelos son gobernadas a partir de procesos aleatorios y funciones matemáticas de utilidad que modelan comportamientos poco intuitivos como, por ejemplo, la intención humana de obtener beneficio. Estos comportamientos junto con las restricciones espaciales conllevan a que emerjan estructuras, órdenes y patrones característicos de comportamiento (Batty, 2005).

Bajo esta perspectiva, los modeladores que usan componentes estocásticos en sus estudios intentan representar de alguna manera esos comportamientos que no son esperados o que no se

logran entender en los sistemas. El pensamiento sistémico contribuye también en este tipo de modelamiento, porque se cree que dichos comportamientos inciertos son patrones emergentes que surgen de la sinergia y de las interacciones del sistema. De esta manera, un análisis sistémico previo que ayuda a entender o a esclarecer dichos patrones emergentes –y en algunos casos incluso a predecirlos–, facilita en términos de modelamiento la construcción de las funciones matemáticas con componentes determinísticos y estocásticos que pueden representar las realidades bajo estudio.

• Modelos dinámicos

Un modelo dinámico es aquel que representa sistemas que cambian y que tienen una secuencia progresiva en el tiempo. Generalmente contienen dos partes: la matemática, que involucra las ecuaciones que representan los fenómenos de estudio, y la dinámica, que establece las respectivas reglas de cambio. Un modelo dinámico de este tipo reaccionará instantáneamente con el cambio de las variables en el tiempo. Por lo tanto esta concepción se limita al desarrollo matemático o algorítmico que revele comportamientos dinámicos en el tiempo y patrones de estabilidad.

De esta manera, los modelos dinámicos construidos, ya sea a partir de asociaciones micro estructuradas (Clarke, Hoppen y Gaydos, 2000) o a partir de reglas

definidas que determinan los estados presentes en términos de los eventos pasados (Dendrinós, 2000), logran capturar relaciones dinámicas reales y procesos de toma de decisiones entre los elementos.

El pensamiento sistémico para este tipo de modelos también tiene una fuerte contribución, y radica en el hecho de que facilita en alta medida el entendimiento dinámico de las variables. La dificultad más notable en el modelamiento dinámico es identificar cómo y a qué tasa cambian las variables del modelo, y cómo estos cambios afectan las otras variables y al sistema completo. Por lo tanto, el análisis sistémico ayuda a entender qué variables son afectadas inmediatamente ocurre un cambio de alguna de ellas, y sobre todo identifica los ciclos de realimentación o las dinámicas que ocurren a nivel global en todo el sistema. Con esta metodología se puede hallar cómo es el comportamiento global del sistema en aras de realizar la validación de los modelos construidos.

• Modelos de Predicción

Esta noción cabe dentro de la idea de usar modelos matemáticos para describir el comportamiento de un fenómeno que está bien establecido. En algunas ocasiones es posible derivar un modelo basado sobre leyes, las cuales permiten calcular el valor de una cantidad dependiente del tiempo. De esta manera se puede calcular la concentración de una

sustancia de una reacción química en un determinado tiempo, o la trayectoria de un misil impulsado desde una cierta posición, con una dirección y velocidad conocidas (Box y Jenkins, 1976).

Sin embargo, no todos los modelos son completamente determinísticos. Existen factores desconocidos tales como la velocidad y dirección del viento, por ejemplo, en un modelo que intente definir la trayectoria de un misil. En muchos problemas es necesario definir factores desconocidos de los cuales es imposible escribir un modelo determinístico que permita calcular con exactitud el futuro comportamiento de un fenómeno (Box & Jenkins, 1976). Se debe construir un modelo que puede ser usado para calcular la probabilidad de un valor futuro, perteneciente a un rango especificado. Estos tipos de modelo son llamados modelos estocásticos. Son necesarios para alcanzar óptimas predicciones y especificaciones adecuadas de control y planificación.

En este caso, también es conveniente hacer un análisis sistémico debido a que esta clase de modelos también se construyen a partir de relaciones de variables e incluso a partir de interacciones de la misma variable. De esta manera, un análisis sistémico previo ayuda a identificar retardos entre las variables o, lo que es lo mismo, detectar cuándo el efecto de una variable sobre otra no tiene una incidencia inmediata en el tiempo. Dado este razonamiento, la uti-

lidad del PS en este tipo de modelos es alta, puesto que muchos de los planteamientos econométricos o de predicción cumplen con la característica de retardos entre las variables.

2. Herramientas de pensamiento sistémico

2.1 Diagramas Causales

Los diagramas causales están enmarcados dentro de las ideas fundamentales de la dinámica de sistemas que fue desarrollada por Jay Forrester en el MIT, en el año 1960. Él estuvo interesado en modelar el comportamiento dinámico de los sistemas, tales como las poblaciones de las ciudades, y cadenas de suministro industriales (Forrester, 1971). Él argumentó que el comportamiento de tales sistemas complejos a cualquier nivel, resulta de las estructuras de flujos, retardos, información y relaciones de retroalimentación y uso los diagramas causales como representación de dichas relaciones.

Los diagramas causales son una herramienta útil para identificar la dinámica de los sistemas. Ellos ilustran la estructura de realimentación del sistema y sirven para identificar los mapas mentales de las organizaciones, de las estructuras conformadas por varios elementos y para revelar patrones de comportamiento individual (Vo, Chae y Olson, 2007).

Los diagramas causales también son útiles en la elaboración y comprensión de los modelos y para la construcción de hipótesis dinámicas, y facilitan la obtención y transmisión de conocimiento. Su conceptualización parte de la simple definición de causalidad que representa el efecto (inmediato o retardado) que una variable puede tener sobre la otra (Sterman, 2000).

Los diagramas causales están conformados por variables que son unidas a través de flechas que determinan la relación causal entre una variable y la otra. La variable base (o la que causa el efecto) está posicionada en la base de la flecha y es la que produce el efecto sobre la variable que se encuentra en la punta de la flecha (variable destino) (Perkins y Grotzer, 2005). La categorización del efecto o la relación causal se define por un símbolo de polaridad (+ ó -) que depende de si el efecto que causa la variable base sobre la variable destino es positivo (+) o, por el contrario, si el efecto es negativo (-), entendiéndose como positivo o negativo incrementos o decrementos observados en la variable afectada.

Identificadas las variables, relaciones causales y polaridades de todo el esquema, se procede a definir los identificadores de ciclos o de realimentación. Estos se definen a partir de una flecha curva en dirección de la evolución del ciclo, y pueden ser positivos o de refuerzo (R). Se tiene un ciclo de refuerzo si al

partir positivamente de una variable base, y siguiendo el efecto sobre todas las variables que involucran en el ciclo, se regresa a ella de forma positiva, o lo que es lo mismo cuando el producto de todas las polaridades inmersas en el ciclo da como resultado un valor positivo (Sterman, 2000).

De la misma manera pueden identificarse ciclos negativos o de balance (B) para los cuales al partir positivamente de una variable base se regresa a ella después de recorrer todo el ciclo, de forma negativa, o por consiguiente cuando el producto de todas las polaridades del ciclo da como resultado un símbolo negativo (-). En general, los ciclos de refuerzo están asociados a comportamientos exponenciales crecientes y decrecientes de las variables que se afectan en el ciclo, y los ciclos de balance, por el contrario, limitan el crecimiento y generan patrones estabilizadores en las variables involucradas en el ciclo.

Otro aspecto importante que puede ser identificado con este tipo de estructura son los retardos implícitos dentro del sistema que afectan en gran medida los fenómenos reales. Como la caracterización de las variables se hace una a una es fácil ver cuándo el efecto no es inmediato y esto ayuda notablemente en la formulación final del modelo (Chandler y Boutilier, 1992).

La Figura 1 (Sterman, 2000) ilustra un ejemplo simple de diagrama causal para estimar el efecto de la variable

“nacimientos y muertes sobre la población”. En el ejemplo se identifican dos ciclos de realimentación, uno positivo y otro negativo que afectan la población de una localidad.



Figura 1. Ejemplo Diagrama Causal. Tomado de (Sterman, 2000)

La combinación de varios ciclos de estos dos tipos es suficiente para intuir los comportamientos dinámicos de los sistemas bajo estudio y facilitar el futuro esquema de modelamiento, puesto que para el diseñador del problema le es fácil identificar: las variables relevantes del sistema, las interacciones y sus relaciones, los retardos, las dinámicas del sistema total y los ciclos de realimentación. De esta manera, el proceso metodológico facilita la obtención de formulaciones matemáticas que conlleven al correcto modelamiento del fenómeno.

La conformación de estructuras de este tipo ha definido conocidos arquetipos en la literatura (Daniel y Lannon, 1994). Estos son aquellas estructuras e hipótesis aceptadas que revelan comportamientos comúnmente encontrados en la realidad. El siguiente apartado habla de esta importante herramienta del pensamiento sistémico.

2.3 Arquetipos

Extensivos y complejos estudios de simulación pueden ser resumidos describiendo un diagrama estructural simplificado del modelo resultante. Dichos diagramas son comúnmente conocidos como arquetipos, los cuales son estructuras que representan y clasifican estructuras sistémicas, definiendo sus comportamientos (Kim, 1995). Los arquetipos juegan un importante rol en todos los procesos del pensamiento sistémico y, por tal motivo, recientes estudios de pensamiento sistémico se enfocan en mejorar y refinar arquetipos. Los arquetipos buscan encontrar comportamientos intuitivos de los sistemas de estudio y pueden ser vistos como una síntesis de varios análisis (cualitativos y cuantitativos) e intentos de modelamiento de expertos, que producen conocimiento general en nuevas aplicaciones y sistemas. Esta definición los hace un mecanismo muy poderoso para acelerar el aprendizaje.

Estos describen patrones comunes de comportamiento en las organizaciones. Sirven como herramientas de diagnóstico y como herramientas prospectivas para dar alertas a los tomadores de decisiones para futuras consecuencias no intencionadas. También revelan las soluciones fundamentales haciendo del tiempo una variable explícita en la toma de decisiones.

Por lo tanto, los arquetipos sistémicos son herramientas altamente efectivas para identificar patrones de comportamiento; ellos reflejan la estructura fundamental bajo estudio y pueden ser aplicados de dos maneras: como diagnóstico y cómo prospectiva (Goodman and Kleiner, 1994).

Como diagnóstico, los arquetipos ayudan a los tomadores de decisiones a reconocer patrones de comportamiento que ya han sido representados en los sistemas y sirven para entender la estructura fundamental de los mismos. Por lo tanto, en la planeación son de gran uso, ya que a partir de ellos se formulan las pautas o las medidas por las cuales se espera lograr determinados fines en una estructura u organización. También pueden ser aplicados para probar si las políticas y estructuras que se están implementando llevan a producir el comportamiento deseado, y cuando se están presentando fenómenos negativos se pueden tomar medidas de control antes que los cambios sean efectuados e integrados en la estructura del sistema.

El arquetipo genérico de la Figura 2 ilustra un tipo llamado "Shifting the Burden", el cual es el primero de muchos arquetipos que ilustra la consecuencia de idear soluciones sintomáticas y no fundamentales a los problemas que ocurren en una organización o en un problema determinado.

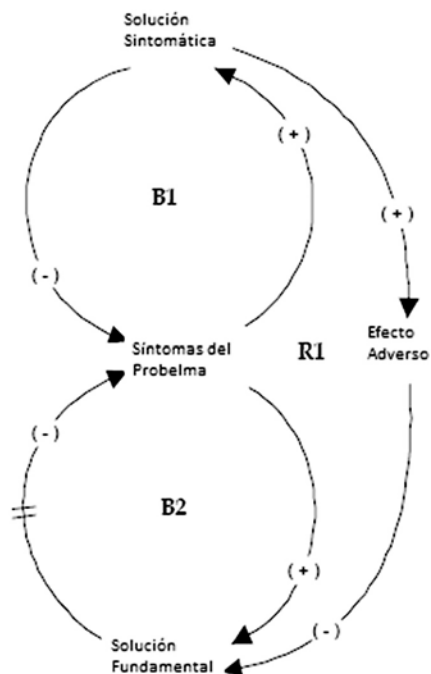


Figura 2. Arquetipo Shifting the Burden. Tomado de (Braun, 2002)

El arquetipo ejemplo muestra que las soluciones fundamentales o a largo plazo requieren un mayor entendimiento y aprendizaje del problema y que en muchas ocasiones (generalmente por la presión que se genera dentro de la organización) se idean soluciones sintomáticas que requieren un menor aprendizaje del problema pero que al final terminan siendo más perjudiciales para la organización por el efecto adverso que producen. El Comportamiento en el tiempo de este arquetipo se ilustra en la Figura 3. La formulación de otros arquetipos se definen en Braun, 2002.

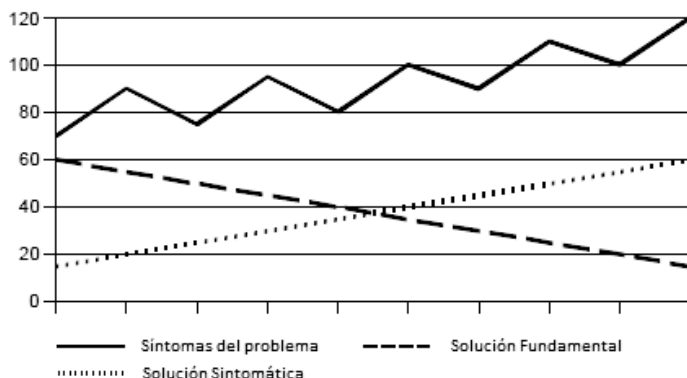


Figura 3. Comportamiento Shifthin the Burden. Tomado de Braun, 2002

Los arquetipos ofrecen un gran conocimiento de los problemas y un fundamento sólido sobre el cual un modelo puede ser desarrollado y construido. Sin embargo, raramente son modelos suficientes para realidades particulares por su naturaleza genérica y normalmente fallan al revelar importantes variables que son parte del sistema real de un problema específico, pero sirven como una completa guía para desarrollar formulaciones matemáticas precisas (Meadows, *et al.*, 1972).

2.4 Análisis de Complejidad

Un sistema complejo se puede definir como aquel que tiene las siguientes características (Beckmann y Guthke, 1995):

- Posee condiciones de aleatoriedad e incertidumbre: en algunas ocasiones se desconoce el valor y comportamiento de sus variables.

- Es incierta la forma cómo va a reaccionar el sistema por el desconocimiento de sus dinámicas internas.
- El sistema es regido por comportamientos y dinámicas no lineales.
- Posee un alto número de variables e interacciones.
- Las causas y efectos que el sistema experimenta pueden no ser proporcionales.
- Las diferentes partes del sistema están conectadas de manera sinérgica.
- Existen realimentaciones positivas y negativas.
- Son sistemas abiertos, lo que implica que intercambian material, energía y flujos de información con el entorno.
- Tienden a llevar procesos irreversibles.
- Las estructuras físicas (regulares e irregulares) juegan un papel fundamental en el sistema.

- Son dinámicos y difícilmente llegan al equilibrio.
- Frecuentemente sufren cambios súbitos o contra intuitivos.

Los sistemas complejos son comúnmente encontrados en la naturaleza, en estructuras sociales y en sistemas artificiales que han sido desarrollados por el hombre. El reto siempre ha consistido en generar herramientas y habilidades para analizar los comportamientos de este tipo de sistemas (Ackoff y Gharajedaghi, 1985).

La idea siempre ha consistido en definir procesos, que capturen las características fundamentales de los sistemas complejos de manera sistemática organizada, a fin de ayudar al analista a evitar la omisión de los factores más destacados, tanto en su manifestación física como en su manifestación estructural.

Entre los procesos que han sido desarrollados, enmarcados dentro del pensamiento sistémico para abordar sistemas con estas características se destaca a nivel organizacional, el conocido proceso CLIOS (Complexity – Large Scale – Interconnected – Open – Sociotechnical) (Sussman, 2007), el cual es un enfoque interdisciplinario que considera el espacio físico de las estructuras y ayuda al desarrollo de alternativas estratégicas considerando altos niveles de incertidumbre, análisis tecnológicos, reglas institucionales, restricciones jerárquicas y políticas.

El proceso CLIOS define tres importantes fases: la primera relacionada con la representación del sistema, en la cual se identifica la estructura en términos del dominio físico e identificación de los subsistemas envueltos en la estructura política e institucional, y el comportamiento en el cual se identifica el grado y naturaleza de la interacción de los componentes con las conexiones débiles o fuertes y los ciclos de realimentación.

Un segundo paso define el diseño, la evaluación y la selección del sistema complejo bajo estudio. En esta etapa se mide el rendimiento de todo el sistema y de los subsistemas. También se estima cómo puede mejorarse el rendimiento de la estructura a partir de alternativas estratégicas, y finalmente se implementa un modelo donde se evalúa la actual estructura institucional y se administra el sistema para alcanzar niveles razonables de rendimiento.

Los estudios de sistemas complejos como el anterior han permitido el desarrollo de técnicas muy poderosas de simulación, como la simulación basada en agentes, la cual es el estudio computacional de procesos modelados como sistemas dinámicos de interacción de agentes, donde “agente” se refiere a la programación de características y métodos de comportamiento instaurados en clases que representan entidades que forman parte de un mundo computacionalmente construido (Duffy, 2008).

La dinámica de sistemas es otra metodología de bastante apogeo en la actualidad, que permite construir simulaciones de sistemas sociales y económicos complejos, entre otros. Maneja un lenguaje formalizado en el cual se usan como conceptos los diagramas de flujos y niveles, y el modelamiento es definido a partir de ecuaciones diferenciales integradas a partir de métodos numéricos (Sterman, 2000). Este tipo de modelamiento se basa principalmente en entender la estructura sistémica del objeto

de estudios a partir de los diagramas causales discutidos anteriormente.

3. Estado del arte

En la Tabla 1 se citan algunos de los trabajos más representativos que usan el pensamiento sistémico como herramienta metodológica para sus estudios. Para esta clasificación de los estudios se especifica la visión adoptada de análisis, los componentes que están incorporados en los estudios que explican sus fortalezas y debilidades.

Tabla 1. Estado del arte. Pensamiento sistémico como herramienta metodológica

Nombre del Modelo / cita Bibliográfica	Visión	Componentes	Qué Explica	Fortalezas	Debilidades
Applying a systems thinking framework to assess knowledge assets dynamics for business performance improvement. (Schiuma Giovanni, Calucci Daniela, Sole Francesco 2012)	Aplicación empresarial (Negocios)	Gestión de conocimiento en los activos empresariales, estructuras de negocio, pensamiento sistémico	Mecanismos de trabajo para gestionar activos empresariales a través de gestión de conocimiento y pensamiento sistémico	Usa diagramas causales para entender el comportamiento de gestión de activos	No incluye simulaciones computarizadas ni se apoya en arquetipos sistémicos conocidos
Understanding the complex nature of engineering technology selection (Xiaofeng Ju, Peng Jiang, Yun Yan, 2012)	Aplicaciones en Ingeniería	Soporte a la decisión- Tecnologías en ingeniería, pensamiento sistémico	Aplica pensamiento sistémico para enfrentar la complejidad en la selección de tecnologías de ingeniería	Usa modelos matemáticos que representan relaciones sistémicas	No incluye esquemas sistémicos
Systems Thinking in Innovation Project management (Kapsali Maria, 2011)	Administración de proyectos	Pensamiento sistémico en dimensiones de mercado, análisis tecnológico, estructura organizacional, impacto ambiental	Cómo el usar el pensamiento sistémico en la administración de proyectos puede ayudar a que sean más exitosos	Flexibilidad para ilustrar, complejidad e incertidumbre en proyectos de innovación	No incluye esquemas sistémicos
Who do you think you are? An examination of how systems thinking can help social marketing support new identities and more sustainable living patterns (Conroy D. y Allen Q. 2010)	Marketing	Social marketing, y pensamiento sistémico	Muestra cómo el pensamiento sistémico puede ayudar a identificar el cambio en las conductas de mercado de la sociedad	Usa el arquetipo sistémico iceberg como ejemplo.	No ilustra relaciones dinámicas entre variables

Nombre del Modelo / cita Bibliográfica	Visión	Componentes	Qué Explica	Fortalezas	Debilidades
Promoting Systems Thinking through Biology Lessons. (Werner R Y Mischo C. 2010)	Educación	Simulación computarizada – Escenarios Biológicos – Pensamiento Sistémico	Promover el pensamiento sistémico en el campo de la educación para el desarrollo sostenible	Posibilita la enseñanza de varias formas de pensamiento sistémico usando realísticas simulaciones por computador	No incluye todos los esquemas de pensamiento sistémico
Using MENTOR to Teach Systems Thinking and OR Methodology to First Year Students in New Zealand. (Daellenbachand,H y Petty N.W.)	Educación	Paquete educativo, interactivo, multimedia	Enseña Pensamiento sistémico e investigación de operaciones	Ofrece un poderoso esquema para enseñar pensamiento sistémico	Hace falta esquemas de validación de modelos
Developing Unbounded Systems Thinking: Using Causal Mapping with Multiple Stakeholders within a Vietnamese Company. (Vo, H. V, Chae B y, Olson D. L.)	Aplicación empresarial	Diagramas causales - Pensamiento sistémico no limitado de Mitroff y Linstone	Como un modelo construido sobre múltiples perspectivas ayuda a las organizaciones a entender mejor las situaciones problemáticas	Muestra la utilidad del pensamiento sistémico en la organización	No hacen uso de arquetipos
Target Setting, lean systems and viable systems: a system perspective on control and performance measurement (Gregory AJ. 2007)	Administración y control	Análisis de sistemas tipo Beer y Seddon. Modelo para medir control y desempeño	Argumenta la importancia de qué comportamiento de un sistema es producto de la interacción de sus partes	Integra análisis a sistemas tipo Beer y Seddon y evalúa cada paso de los procesos	No definen estructuras sistémicas por medio de diagramas causales.
Development of system thinking skills in the context of Earth system education. Journal of Research in Science Teaching. (Assaraf, O., & Orion, N 2005).	Educación	Metodología educativa para enseñar pensamiento sistémico. Diagramas causales de problemas complejos.	El desarrollo de habilidades sistémicas en estudiantes a partir del análisis de sistemas complejos en este caso el hidro-ciclo.	Construcción de metodología de enseñanza sistémica.	No se definen arquetipos
Dimensions of causal understanding: The role of complex causal models in students' understanding of science. (Perkins, D. N., & Grotzer, T. A. 2005)	Educación	Diagramas Causales - Arquetipos	La importancia del razonamiento causal en los estudiantes	Explicación de diagramas causales y su aplicación en el pensamiento sistémico	Aborda una limitada gama de problemas

Nombre del Modelo / cita Bibliográfica	Visión	Componentes	Qué Explica	Fortalezas	Debilidades
Bathtub dynamics: Initial results of a systems thinking inventory. System (Sweeny, L. B., & Sterman, J. D. 2000)	Consultoría	Metodología Sistémica, Conceptualización teórica de pensamiento sistémico, Diagramas de flujos y niveles - Integración - Métodos de resolución	Medio para probar la eficacia de las ayudas de formación y de decisión utilizadas para mejorar las habilidades del pensamiento sistémico	Claridad en el aprendizaje y divulgación de conceptos sistémicos	Ninguno
Measuring the effect of system thinking interventions on mental models. (Doyle J, Radzicki M, Trees S. 1996).	Teórico – Pensamiento Sistémico	Nueva metodología para medir la habilidad del pensamiento sistémico para cambiar paradigmas mentales	Describe las limitaciones de las actuales técnicas disponibles para cambiar los modelos mentales	Modelos Sistémicos – Caracterización de modelos mentales	Falta definir arquetipos de los modelos mentales

4. Conclusiones

La aplicación del pensamiento sistémico en ámbitos académicos y operativos establece un marco conceptual que permite abordar los problemas que surgen de la conformación de estructuras avanzadas de información y de complejas organizaciones de los sistemas sociales. El pensamiento sistémico contribuye a estructurar el entendimiento de las realidades, a constituir las bases para estudios posteriores de modelamiento y a definir los comportamientos de los sistemas.

Los tres principios básicos del pensamiento sistémico en torno al modelamiento de los sistemas son: la articulación del problema que constituye la identificación y elaboración estructurada de los sistemas, el análisis de sistemas que involucra toda la conceptualización del pensamiento sistémico

para entender los sistemas, y el uso de modelos que es la aplicación de diversas herramientas en ingeniería para representar las inferencias identificadas en los procesos sistémicos.

En este trabajo se introducen tres importantes herramientas del pensamiento sistémico: los diagramas causales, que son estructuras que definen los ciclos de realimentación de los sistemas, los arquetipos, que son estructuras generales que definen los comportamientos de los sistemas y el análisis de complejidad que busca representar sistemas con altos números de variables e interacciones. Cada una de esas herramientas ayuda a realizar aproximaciones importantes a los elementos de los sistemas y contribuyen en su modelamiento en ingeniería. Cada uno de estas herramientas constituye una extensa área de investigación.

En la revisión del estado del arte de estudios relacionados con pensamiento sistémico se pudo observar que el pensamiento sistémico puede abordar distintos ámbitos del conocimiento y que la mayoría de estos estudios se apoyan en diagramas causales para explicar los razonamientos sistémicos construidos. Dentro de los esquemas de modelación revisados, se identificó que hay mucho por aportar con respecto a la estructuración de arquetipos que definan patrones generales de comportamiento en los sistemas.

Referencias

- Abraham, J. y Hunt, J. (2002): Spatial market representations: concepts and application to integrated planning models, University of Calgary, Canada. Department of Civil Engineering. 49th annual North American Meetings of the regional Science Association International.
- Ackoff R y Gharajedaghi J. 1985. Toward systemic education of systems scientists. *Systems Research* 2(1): pp. 21–27.
- Alonso W. (1964): Location and Land Use. Cambridge, MA: *Harvard University Press*.
- Assaraf, O., y Orion, N. (2005). Development of system thinking skills in the context of Earth system education. *Journal of Research in Science Teaching*, 42(5), pp. 518–560.
- Bakken BE., Gould JM y Kim D. 1992. Experimentation in learning organizations: a management flight simulator approach. *European Journal of Operations Research* 59(1): pp. 167–182. Boston Globe 2000. 27 April: A27.
- Batty, M. (2005): Cities and Complexity. Massachusetts: MIT.
- Bertalanffy, L. Von. (1968). General system theory: Foundations, development, applications. New York: Braziller.
- Beckmann, J. F., y Guthke, J. (1995). Complex problem solving, intelligence, and learning ability. In P. A. Frensch & J. Funke (Eds.), *Complex problem solving: The European perspective* (pp. 177–200). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.
- Box, G., y Jenkins, G. (1976): Time series analysis: forecasting and control. Universidad de Wisconsin, U.S.A, Holden-day.
- Braun William. The system archetypes. 2002.
- Cabrera D., Colosi Laura y Lobdell Claire. Systems thinking . Evaluation and Program planning. Elsevier. 2008. 31: pp. 299-310.
- Cavaleri S, Sterman J. 1997. Towards evaluation of systems thinking interventions: a case study. *System Dynamics Review* 13(2): pp. 171–186.
- Chandler M, Boutilier R. 1992. The development of dynamic system reasoning. *Contributions to Human Development* 21: pp. 121–137.
- Checkland, P y Scholes J. Soft systems methodology: a 30-year retrospective. *Systems Research and Behavioral Science* (1999) Volume: 58, Publisher: Wiley, pp. 11-58.
- Clarke, K, Hoen, S y Gaydos I. (2000): Methods and techniques for rigorous calibration of a cellular automation model of urban growth. <http://geo.arc.nasa.gov/usgs/clarke/calib.paper.html>.

- Conroy D y Allen Q. Who do you think you are? An examination of how systems thinking can help social marketing support new identities and more sustainable living pattern. *Australasian Marketing Journal*. 2010. 18. Pp. 195-197.
- Daellenbachand H y Petty N. W. Using MENTOR to Teach Systems Thinking and OR Methodology to First Year Students in New Zealand. *The Journal of the Operational Research Society*, Vol. 51, No. 12,(Dec., 2000), pp. 1359-1366.
- Dangerfield BC, Roberts CA. 1995. Projecting dynamic behavior in the absence of a model: an experiment. *System Dynamics Review* 11(2): pp. 157-172.
- Dendrinios, D. (2000): Land development and amenities: a predator - prey interaction. *The annals of regional science*, pp: 1-14.
- Doyle J, Radzicki M, Trees S. 1996. Measuring the effect of system thinking interventions on mental models. 1996 International System Dynamics Conference.
- Donella Meadows., Dennis Meadows., Jørgen Randers y William Behrens. *Limits to Growth*, (New York: New American Library), 1972.
- Duffy, J. (2008): Agent-Based models and human subject experiments. *Handbook of Computational Economics*, V. 63. Pittsburgh.
- Forrester, Jay. World Dynamics. Wrioth-Allen Press, Cambridge. 1971.
- Forrester, Jay. Urban Dynamics. Wrioth-Allen Press, Cambridge. 1977.
- Forrester, J.W. and Senge, P. (1980) "Tests for building confidence in System Dynamics Models", TIMS Studies in the Management Sciences, Vol 14, pp. 209-228.
- Goodman, M y Kleiner, A. "Using the Archetype Family Tree as a Diagnostic Tool", *The Systems Thinker*, December, 1993/January, 1994.
- Gregory AJ. Target Setting, lean systems and viable systems: a system perspective on control and performance measurement. University of Hull. *Journal of operations research Societ*, Vol 58No. 11, Part Special Issue: Risk Based Methods for Supply Chain Planning and Management (Nov., 2007), pp. 1503-1517.
- Joseph Sussman. Frameworks and Models in Engineering Systems. MIT OpenCourseWare, Massachusetts Institute of Technology. Spring 2007.
- Kim, D. Archetypes as Dynamic Theories, *The Systems Thinker*, June/July, 1995.
- Kim, D y Kim, C. "A Pocket Guide to Using the Archetypes", *The Systems Thinker*, May, 1994.
- Kapsali, Maria. Systems Thinking in Innovation Project management. *International Journal of Project Management*. 2011. 29. Pp. 396-407.
- O'Connor J y McDermott I. The Art of Systems Thinking: Essential Skills for Creativity and Problem Solving. Thorsons. 1997. Pp. 113 - 156.
- Perkins, D. N., y Grotzer, T. A. (2005). Dimensions of casual understanding: The role of complex causal models in students' understanding of science. *Studies in Science Education*, 41, 117-166.
- Riess Werner y Mischo Christoph. Promoting Systems Thinking through Biology Lessons University of Education Freiburg, German. *International Journal of*

- Science Education Vol. 32, No. 6, 1 April 2010, pp. 705–72.
- Senge P. 1990. *The Fifth Discipline: The Art and Practice of the Learning Organization*. Doubleday: New York.
- Silverman Barry. Unifying Expert Systems and the Decision Sciences. *Journal of Operations Research*, Vol. 42, No. 3 (May - Jun., 1994), pp. 393-413.
- Schiuma, G., Calucci D., y Sole Francesco. Applying a systems thinking framework to assess knowledge assets dynamics for business performance improvement. *Expert Systems with applications*. 2010. 39, pp. 8044-8050.
- Sterman J. 1994. Learning in and about complex systems. *System Dynamics Review* 10(2–3): pp. 291–330.
- Sterman J. 2000. *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. Irwin/McGraw-Hill: New York.
- Vo, H., Chae, B y Olson D. L. Developing Unbounded Systems Thinking: Using Causal Mapping with Multiple Stakeholders within a Vietnamese Company. *The Journal of the Operational Research Society*, Vol. 58, No. 5, Special Issue: Problem Structuring Methods II (May, 2007), pp. 655-668.
- Wilson, A. (1981): *Geography and the Environment*. Leeds: Jhon Wiley & Sons Ltd.
- Xiaofeng Ju., Peng Jiang y Yun Yan, 2012. Understanding the complex nature of engineering technology selection: a new methodology based on systems thinking. *Systems Engineering Procedia*. 2010. 4 pp. 196-202.