



**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PANAMÁ**



**SEDE VICTOR LEVI SASSO**

**FOLLETO DE INGENIERÍA DE SISTEMAS DINÁMICOS**

**INCLUYE PRUEBAS SUMATIVAS Y PRESENTACIONES DEL CONTENIDO**

**DR. CARLOS A. ROVETTO**

**MAYO 2018**



Universidad Tecnológica de Panamá (UTP)

Esta obra está licenciada bajo la Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional.

Para ver esta licencia:

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0>

# Contenido

Índice de figuras .....	5
Introducción.....	8
Capítulo I: El Enfoque de Sistemas.....	10
El concepto de sistemas.....	10
Definición .....	10
Elementos .....	11
Taxonomía de los sistemas .....	12
La sistemología como disciplina integradora .....	14
Definición .....	14
Antecedentes .....	14
Teoría General de Sistemas .....	16
El enfoque de sistemas .....	17
Pensamiento sistémico .....	17
Fundamentos del pensamiento sistémico .....	18
Niveles del pensamiento sistémico .....	19
La dinámica de sistemas y sus contribuciones .....	20
Introducción .....	20
Desarrollo y aportes.....	20
Casos de aplicación.....	23
Ejemplos .....	24
Capítulo II: Sistemas y sus representaciones .....	27
Descripción de los sistemas .....	27
Estructura.....	27
Fronteras.....	29
Comportamiento.....	30
Estructura interna de los sistemas .....	30
Diagramas de bloques y flujo de señales.....	30
Agrupaciones y retroalimentación.....	33
Sistemas dinámicos y sus representaciones .....	33
Definición de sistema dinámico.....	33
Características .....	34

Pasos para el diseño.....	35
Ejemplos .....	36
El concepto de modelo .....	39
Definición .....	39
Estructura.....	39
Fronteras.....	40
Modelos confiables y observables .....	40
Taxonomía de los modelos .....	41
Ejemplificación de las diversas clasificaciones .....	43
Capítulo III: Sistemas Dinámicos y Diagramas de Ciclo Causal .....	47
Teoría de causalidad .....	47
Relaciones de causa-efecto y su representación .....	47
Simbología .....	47
Significado de la dirección de la influencia.....	48
Tipos de influencias .....	48
Ley de los signos .....	49
Ejemplos .....	49
Diagramas de ciclo causal.....	51
Ventajas y desventajas .....	51
Propiedades.....	52
Ciclos de retroalimentación .....	52
Retroalimentación positiva .....	52
Realimentación negativa.....	53
Combinación de ciclos .....	53
Dominancia .....	54
Diversidad de comportamiento .....	54
Variables exógenas.....	55
Graficación y análisis de sistemas de retroalimentación .....	55
Patrones.....	55
Definición de tasas y niveles.....	57
Gráficos y ciclos causales.....	58
Ejemplos.....	59

Ejercicios de creación de modelos .....	61
Desarrollo de casos .....	63
Capítulo IV: Diagramas de Flujos Dinámicos .....	66
Introducción .....	66
Tipos de variables y símbolos para diagramas de flujo dinámico .....	66
Niveles .....	66
Flujos o ratas.....	66
Variables auxiliares .....	67
Constantes.....	67
Retrasos.....	68
Estructuras de sistemas dinámicos .....	69
Ciclo de retroalimentación.....	69
Niveles y ratas.....	69
Definiciones .....	69
Identificación de niveles y ratas .....	69
Elementos genéricos de una estructura de retroalimentación de un modelo de un sistema dinámico.....	70
Integración gráfica para estimar comportamiento .....	70
Redes (Secuencia Rata – Nivel).....	73
Sistemas de Ecuaciones .....	73
Periodos de tiempo .....	73
Ecuaciones .....	73
Conceptualización de una situación determinada .....	74
Metodología para el desarrollo de un proyecto de modelización y análisis de sistemas .....	75
Simulación en computador .....	76
Comportamiento del modelo.....	77
Definición de escenarios.....	77
Análisis de resultados.....	77
Ejercicios prácticos .....	78
Bibliografía .....	83
Anexo 1: Pruebas Rápidas.....	87
Anexo 2: Presentaciones .....	98

## Índice de figuras

Figura 1. Definición gráfica de sistema. ....	11
Figura 2. Carácter iterativo de la metodología. – Tomado y adaptado de (Aracil & Gordillo, 1997). ....	22
Figura 3. Representación del bucle de realimentación de refuerzo. – Adaptado de (Maiocchi, 2009). ....	28
Figura 4. Representación del bucle de realimentación de compensación. - Adaptado de (Maiocchi, 2009). ....	28
Figura 5. Representación de un sistema, donde la frontera está indicada con color rojo. - Adaptado de (Ojea, 2007). ....	29
Figura 6. Elementos de la forma más simple de un diagrama de bloques. ....	31
Figura 7. Elementos de un diagrama de flujo de señales. ....	32
Figura 8. Proceso para el diseño de modelos de acuerdo con el enfoque de la dinámica de sistemas. - Tomado de (Richardson & Pugh III, 1981). ....	35
Figure 9. Taxonomía de los modelos. - Tomado y adaptado de (Fishman, 2013). ....	41
Figura 10. Sistema hidráulico - Tomado de Imágenes de Google. ....	43
Figura 11. Maqueta a escala de edificios. - Tomado de Imágenes de Google. ....	44
Figura 12. Modelo matemático de un sistema físico. - Tomado de Imágenes de Google. ....	44
Figura 13. Modelo de la molécula de ADN. - Tomado de Imágenes de Google. ....	44
Figura 14. Modelo a escala de un barco. - Tomado de Imágenes de Google. ....	44
Figura 15. Modelo a escala de un avión probado en un túnel aerodinámico. - Tomado de Imágenes de Google. ....	45
Figura 16. Modelo lineal de mercado donde se muestra el equilibrio entre la oferta y la demanda y ambos dependen del precio. - Tomado de Imágenes de Google. ....	45
Figura 17. Modelo que indica los cambios de temperatura globales en función del tiempo (en años). - Tomado de Imágenes de Google. ....	45
Figura 18. Modelo que representa la cantidad de carros en un lava autos. ....	46
Figura 19. Modelo que representa los cambios de temperatura. - Tomado de Imágenes de Google. ....	46

Figura 20. Representación gráfica de una relación causal.....	48
Figura 21. Relación de influencia positiva. ....	48
Figura 22. Relación de influencia negativa.....	49
Figura 23. Ciclo de realimentación positivo.....	52
Figura 24. Otro símbolo para representar ciclos de realimentación positiva. ....	53
Figura 25. Ciclo de realimentación negativo. ....	53
Figura 26. Otro símbolo para representar los ciclos de realimentación negativa. ....	53
Figura 27. Representación de la combinación de ciclos causales. ....	54
Figura 28. Patrón de comportamiento exponencial. – Tomado y adaptado de (“System Behavior and causal loop diagrams,” 2010). ....	55
Figura 29. Patrón de comportamiento orientado a una meta. - Tomado y adaptado de (“System Behavior and causal loop diagrams,” 2010). ....	56
Figura 30. Patrón de comportamiento en forma de S. - Tomado y adaptado de (“System Behavior and causal loop diagrams,” 2010). ....	56
Figura 31. Patrón de comportamiento oscilatorio. - Tomado y adaptado de (“System Behavior and causal loop diagrams,” 2010). ....	57
Figura 32. Diagrama causal que representa la regulación de temperatura de una ducha. - Tomado de (Morlán, 2011).....	58
Figura 33. Gráfico que representa el comportamiento de las variables de la Figura 32 con respecto al tiempo. - Tomado de (Morlán, 2011). ....	58
Figura 34. Símbolo de Nivel. ....	68
Figura 35. Símbolo de Flujo. ....	68
Figura 36. Símbolo de Flujo de material.....	68
Figura 37. Símbolo de Flujo de información.....	68
Figura 38. Símbolo de Variable auxiliar.....	68
Figura 39. Símbolo de Constante.....	68
Figura 40. Símbolo de Retraso. ....	68
Figura 41. Gráfica de flujo constante positivo. - Adaptado de (Oh, 1995). ....	71
Figura 42. Gráfica de nivel que incrementa linealmente. - Adaptado de (Oh, 1995). ....	71
Figura 43. Gráfica de flujo constante negativo. - Adaptado de (Oh, 1995). ....	71
Figura 44. Gráfica de nivel que decrementa linealmente. - Adaptado de (Oh, 1995). ....	71

Figura 45. Gráfica de flujo definido por una función step. - Adaptado de (Oh, 1995)....	72
Figura 46. Gráfica de nivel resultante de una función step. - Adaptado de (Oh, 1995).	72
Figura 47. Gráfica de flujo positivo linealmente creciente. - Adaptado de (Agatstein & Breierova, 1996).....	72
Figura 48. Gráfica de nivel que crece exponencialmente. - Adaptado de (Agatstein & Breierova, 1996).....	72
Figura 49. Gráfica de flujo negativo linealmente decreciente. - Adaptado de (Agatstein & Breierova, 1996).....	73
Figura 50. Gráfica de nivel que decrece exponencialmente. - Adaptado de (Agatstein & Breierova, 1996).....	73

## Introducción

La constante interacción del ser humano con diferentes sistemas hace que la comprensión de los conceptos relacionados a estos sea imprescindible. Basado en esto, queda claramente plasmado que los sistemas dinámicos son una parte importante de la vida diaria y la Ingeniería de Sistemas Dinámicos es la disciplina encargada de describir todos esos conceptos, apoyándose en los fundamentos del pensamiento sistémico y en la Teoría General de Sistemas, los cuales brindan las bases necesarias para la aplicación del enfoque de sistemas en la búsqueda de respuestas relacionadas al comportamiento de los diversos elementos que conforman un sistema.

Los sistemas dinámicos se ven en todas las áreas del conocimiento, no sólo en disciplinas relacionadas a la ingeniería. Tienen una estrecha relación con áreas como la economía, la educación, la agricultura, la comunicación, la medicina y la informática. Incluso, han contribuido al desarrollo de otra área de estudio denominada como cibernética, la cual se originó en los principios de la dinámica de sistemas y está profundamente relacionada con ella, y sobre todo se apoya en otras áreas de estudio para su desarrollo.

La metodología sistémica proporciona las herramientas para estudiar los sistemas, crear modelos, hacer simulaciones utilizando los modelos creados y por consiguiente, obtener resultados que permitirán hacer predicciones sobre el comportamiento de un determinado sistema, lo cual facilitará el análisis de diversos fenómenos o situaciones relacionadas al sistema. De esta manera, los sistemas que forman parte de las diferentes áreas de conocimiento pueden ser mejorados para que consigan su objetivo de manera más eficaz.

Tomando todo esto en cuenta, los sistemas dinámicos son una parte indispensable de la capacidad profesional de toda persona. Por este motivo, es importante comprender y aplicar las diferentes etapas que conforman el desarrollo de proyectos y líneas de investigación que necesitan del apoyo de la Ingeniería de Sistemas Dinámicos, porque se utilizan distintos tipos de sistemas para resolver las necesidades de las personas y muchas veces, los sistemas parecen ser implementados sin haber pasado por una etapa de estudio, que al final, en vez de resolver lo que hacen es empeorar la situación.

Lo más importante para comprender los sistemas dinámicos es cambiar nuestro enfoque de resolver problemas y enseñar a los demás desde pequeños, cómo se relacionan las diversas áreas de estudio con los sistemas dinámicos. De igual forma, brindarles las herramientas necesarias para que aprendan a resolver los problemas viéndolos como un todo y entendiendo que cada elemento está interrelacionado. De esta manera, las personas formarán una actitud diferente hacia la resolución de problemas. Este es el principal objetivo de este folleto, brindar una explicación a los diferentes conceptos en los que se basa la Ingeniería de Sistemas Dinámicos y apoyar en la enseñanza de este conocimiento a los estudiantes que serán los profesionales encargados de brindar soluciones.

## Capítulo I: El Enfoque de Sistemas

Todos los días estamos en contacto con diferentes sistemas, por lo que el concepto de sistemas no es nuevo. Como ejemplo de esto, se pueden mencionar el sistema solar, el sistema financiero, el sistema ecológico y los distintos sistemas que componen el cuerpo humano como el sistema respiratorio, el sistema digestivo, entre otros.

Aunque estamos en constante relación con los sistemas, pocas veces nos preguntamos por la definición básica del concepto “sistema”, los componentes de este y su clasificación. Por ello, en este capítulo se empezará por definir el concepto de sistemas para posteriormente estudiar los elementos que componen a los sistemas, su taxonomía y su importancia como una disciplina integradora. Posteriormente se hará una explicación más detallada sobre el enfoque de sistemas y sus correspondientes fundamentos.

### ***El concepto de sistemas***

#### **Definición**

Existen diferentes definiciones para el concepto de sistema, sin embargo, se propone lo siguiente como una definición general: ***“Un sistema es un conjunto ordenado de elementos interrelacionados entre sí para lograr un objetivo”***.

Con base en lo anterior, se puede deducir que:

- Un sistema se compone de la suma de sus elementos
- Los elementos deben estar relacionados
- Todo sistema tiene un objetivo
- Un sistema determina la naturaleza de sus elementos

Como indica (Chiavenato, 2013), un sistema no es más que un conjunto de elementos que están relacionados y que cumplen de forma dinámica una determinada función para lograr un objetivo, utilizando entradas y produciendo salidas.

Una definición más formal para el concepto de sistema es la propuesta por (Aracil & Gordillo, 1997), la cual consiste en modelo **M** que describe un conjunto **C** de los elementos del sistema y una relación **R** que define los vínculos que se producen entre

los elementos. Con esto, se definen los elementos básicos de un sistema como el par **(C, R)**, lo cual puede representarse gráficamente como un grafo cuyos nodos denotan los elementos y las aristas denotan las influencias que resultan de la interacción entre dichos elementos.

En la Figura 1, se muestra la definición gráfica de un sistema según la definición expuesta anteriormente. La muestra un modelo M, donde se puede identificar el conjunto de elementos  $C = \{A, B, C, D\}$  y sus respectivas  $R = \{(A, C), (A, D), (B, A), (B, D), (C, B), (C, D), (D, A)\}$ .

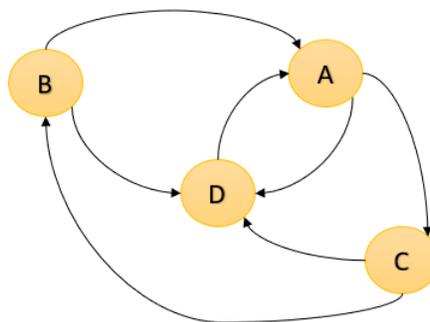


Figura 1. Definición gráfica de sistema.

## Elementos

Un elemento puede definirse como una parte constitutiva o integrante de algo o la parte de un todo. En este sentido, un elemento es una parte integrante de un sistema y cada elemento tiene una función única dentro de este. Los elementos se caracterizan por sus atributos y estos son los que permiten diferenciar un sistema de otro, ya que son los atributos los que aportan propiedades específicas al sistema.

Sobre los elementos de un sistema se pueden especificar los siguientes enunciados (Ramírez, 2002):

- ✓ Tienen características específicas que influyen en las características del sistema. De la misma forma, las características del sistema influyen en las de los elementos.
- ✓ Al estudiar un sistema, depende del analista del sistema decidir cuáles son los elementos que va a considerar para la evaluación.

- ✓ Un elemento puede ser considerado un sistema y en tal caso se denomina **subsistema**.

Los elementos de un sistema intercambian información entre sí y con otros sistemas. De esta manera, pueden existir relaciones entre las partes del sistema o con otros sistemas.

### **Taxonomía de los sistemas**

*Taxonomía* es un término de origen griego que significa “ordenación”, y esta no es más que la ciencia que estudia los principios y fines de la clasificación. En este sentido, la taxonomía de los sistemas se refiere a la clasificación de los sistemas. Aunque de manera general la clasificación de sistemas se hace de acuerdo con las características de estos, tal como indica (Ramírez, 2002), este proceso es subjetivo porque depende del individuo que hace la clasificación, del objetivo que se pretende alcanzar y de las condiciones dentro de las cuales se desarrolla.

El cuadro a continuación expone la clasificación propuesta por (Ramírez, 2002), donde se especifican planteamientos generales sobre las diferentes clasificaciones y ejemplos correspondientes a cada clasificación.

<b>Clasificación</b>		<b>Definición</b>	<b>Ejemplos</b>
Según su relación con el medio ambiente	Sistemas abiertos	Intercambian materia, energía o información con el ambiente.	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Ser humano</li> <li>✓ Célula</li> <li>✓ Ciudad</li> </ul>
	Sistemas cerrados	No intercambian materia, información o energía con el ambiente.	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Universo</li> <li>✓ Llanta de carro</li> </ul>
Según su naturaleza	Sistemas concretos	Son físicos o tangibles.	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Edificio</li> <li>✓ Guitarra</li> </ul>
	Sistemas abstractos	Son simbólicos o conceptuales.	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Sistema binario</li> <li>✓ Idioma español</li> </ul>
Según su origen	Sistemas naturales	Son producidos por la naturaleza.	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Bosque</li> <li>✓ Molécula de agua</li> </ul>

	Sistemas artificiales	Son resultado de la concepción y construcción hecha por el ser humano.	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Avión</li> <li>✓ Marcapasos</li> <li>✓ Tren</li> </ul>
Según sus relaciones	Sistemas simples	Tienen pocos elementos y relaciones entre estos.	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Palanca</li> <li>✓ Juego de billar</li> </ul>
	Sistemas complejos	Tienen numerosa cantidad de elementos y relaciones entre estos.	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Cerebro</li> <li>✓ Cámara fotográfica</li> </ul>
Según su cambio en el tiempo	Sistemas estáticos	No sufren cambios en el tiempo.	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Piedra</li> <li>✓ Vaso de plástico</li> </ul>
	Sistemas dinámicos	Sufren en el cambios en el tiempo.	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Átomo</li> <li>✓ Universo</li> </ul>
Según el tipo de variables que lo definen	Sistemas discretos	Están definidos por variables discretas, es decir, valores numéricos enteros previamente establecidos.	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Alfabeto</li> <li>✓ Lógica booleana</li> </ul>
	Sistemas continuos	Están definidos por variables continuas, es decir, cualquier valor numérico que puede en cualquier cantidad.	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Río</li> <li>✓ Alternador</li> </ul>
Según su funcionamiento	Sistemas determinísticos	Tienen comportamientos predecibles.	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Polea</li> <li>✓ Palanca</li> <li>✓ Programa de computadora</li> </ul>
	Sistemas probabilísticos	Tienen comportamientos no predecibles.	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Clima</li> <li>✓ Sistema económico mundial</li> </ul>

## ***La sistemología como disciplina integradora***

### **Definición**

La sistemología como disciplina integradora implica tener una visión global, es decir, estudiar los sistemas como un todo e interrelacionando procesos. Esto es considerablemente conveniente al analizar fenómenos complejos que requieren de la interdisciplinariedad, tal como indica (Ossa, 2017). Esta interdisciplinariedad es consecuencia de la manifestación de similitudes estructurales en diferentes campos, lo que origina las propiedades generales de los sistemas (Von Bertalanffy, 1989).

Las características o propiedades de un sistema pueden considerarse dependientes de la naturaleza de los elementos que forman su estructura. De igual manera, existen propiedades que tienen lugar dentro del sistema y que dependen de la organización de los elementos. Estas características propias del sistema se denominan **propiedades sistémicas** y a partir de esto se genera la importancia del pensamiento sistémico.

### **Antecedentes**

Los antecedentes de la sistemología como disciplina se remontan a la Prehistoria. A continuación se detallan los hechos que impulsaron el desarrollo de esta disciplina:

- **Época primitiva:**
  - Incrementó el conocimiento del hombre acerca del entorno en el que vivía, así como su capacidad para alterarlo.
  - Existían sistemas naturales por lo que estaba fuera del alcance del ser humano poder controlarlo.
  - Empezaron a desarrollarse los sistemas creados por el hombre. Sin embargo, mientras se hacían más complejos fue más difícil para el hombre explicar su comportamiento por lo que no era capaz de estructurar el conocimiento existente.
- **Mediados del siglo XVIII:**
  - En Gran Bretaña surgieron los fenómenos de la industrialización y la comercialización que dieron origen a la Revolución Industrial.
  - Surgieron dos pensamientos con el propósito de entender el mundo en la **Era de las Máquinas**: el reduccionismo y el maquinismo.

- El **reduccionismo** proponía que todo podía descomponerse en partes indivisibles y luego se estudiaba cada una de las partes. Posteriormente se explicaba el comportamiento de cada una de ellas y se agrupaban las explicaciones parciales para obtener la conclusión sobre el conjunto.
- El **maquinismo** planteaba que todos los fenómenos podían explicarse según la relación de causa-efecto. Como un suceso causaba otro (su efecto), sólo se consideraban las causas para la explicación de los efectos del fenómeno.
- **Siglo XX:**
  - A principios de los años 20, un grupo de biólogos se opuso al reduccionismo, pues promovían el desarrollo de ideas referentes al organismo como un todo.
  - En los años 40, ocurrieron cambios en la percepción para la comprensión de los sistemas, lo que conllevó a que se pasara de la Era de las Máquinas a la **Era de los Sistemas**. Se hizo un esfuerzo por crear una teoría interdisciplinaria de los sistemas que permitiera proveer modelos y procedimientos para aplicarlos en diversos campos.
  - En 1948, el matemático Norbert Wiener publicó “Cybernetics” donde explicaba el concepto de **feedback** o **realimentación**, que consiste en la capacidad de una máquina de utilizar los resultados de su propio funcionamiento como información para organizarse a sí misma y seguir un determinado proceso. Sobre la realimentación se puede indicar que:
    - ✓ La realimentación permite evaluar los cambios que se producen en el entorno y modelar eventos futuros.
    - ✓ A través de la **autorregulación**, un sistema busca obtener un equilibrio dinámico haciendo uso de la **homeóstasis**.
    - ✓ Es posible la modificación de la estructura del sistema para mantener el equilibrio, este proceso se denomina **morfogénesis**.
  - En 1950, el biólogo austríaco Karl Ludwig von Bertalanffy publicó “General Systems Theory” en la que expone la interdisciplinariedad de su teoría, apoyándose en el **isomorfismo**, que se refiere a un principio que es

aplicable de igual forma a diferentes ciencias (Ramírez, 2002). Según los estudios de Bertalanffy, todos los sistemas poseen:

- ✓ **Totalidad:** El todo es más que la suma de las partes.
  - ✓ **Diferenciación interna:** Las partes están interrelacionadas y cumplen distintas funciones.
  - ✓ **Límites:** Separan al sistema de su ambiente.
  - ✓ **Jerarquía:** Los elementos se ordenan según distintos niveles de integración y control.
- En los años 50, el ingeniero en sistemas Jay Forrester desarrolló la metodología denominada “dinámica de sistemas”, la cual aplicó por primera vez durante el análisis de la estructura de una empresa norteamericana. Posteriores trabajos como “Urban Dynamics” en 1969 y “World Dynamics” en 1971, sirvieron como base para estudios en otros campos y a su vez, impulsaron la aplicación de la dinámica de sistemas alrededor del mundo.
  - La publicación de “An Introduction to Cybernetics” por W. Ross Ashby en 1956 originó el paradigma cibernético que propone ignorar los mecanismos encerrándolos en cajas negras para estudiar sus comportamientos de acuerdo con sus fines, los cuales dependen del entorno en el que funcionan. Su trabajo también contribuye excepcionalmente a la construcción de modelos y métodos de aplicación en muchos campos dando lugar a una teoría interdisciplinaria de los sistemas.

### **Teoría General de Sistemas**

La Teoría General de Sistemas (TGS) fue propuesta en 1950 por Karl Ludwing von Bertalanffy, contribuyendo así a la aparición de un nuevo paradigma científico basado en la interrelación entre los elementos que forman los sistemas. Según (Von Bertalanffy, 1989), debido a la interdisciplinariedad, la TGS no busca alcanzar analogías vagas y superficiales que podrían perjudicar el desarrollo de los diferentes campos, sino que busca ser una herramienta que pueda brindar modelos utilizables y transferibles en dichos campos.

La TGS incorpora recursos sistemáticos y científicos que permiten hacer una representación aproximada de la realidad, así como brindar una guía para impulsar el trabajo conjunto de diferentes disciplinas (Arnold & Osorio, 1998). Los objetivos de esta teoría son los siguientes:

1. Fomentar el desarrollo de un conjunto de términos que logren explicar las características, funciones y comportamientos de los fenómenos sistémicos (Arnold & Osorio, 1998).
2. Formular y explicar leyes que permitan explicar los fenómenos que suceden en la realidad, así como predecir la conducta de dicha realidad, a través del análisis de las totalidades y las interacciones internas y externas.
3. Establecer un formalismo matemático para describir dichas leyes de modo que se puedan describir el conjunto de sistemas que existen en la naturaleza.

La TGS es la historia de una filosofía y una serie de procedimientos para el análisis y estudio de la realidad y el desarrollo de modelos, que no son más que una aproximación de la percepción global de lo que es el Universo o lo que se conoce como sistema (Sarabia, 1995).

### ***El enfoque de sistemas***

El enfoque de sistemas va más allá de comprender el concepto de sistema y sus diversas clasificaciones, pues implica analizar situaciones o fenómenos contemplándolos como un todo y no a través de procesos aislados. Esto da lugar a que se generen soluciones que consideren los diferentes elementos e interacciones que tienen lugar dentro de la estructura del sistema.

### **Pensamiento sistémico**

El pensamiento sistémico es la actitud del ser humano basada en la percepción del mundo real en términos de totalidades para su análisis, comprensión y accionar. No es más que una visión integradora, tanto en el análisis de las situaciones como en las conclusiones que nacen a partir de ellas, proponiendo soluciones en las cuales se tienen que considerar diversos elementos y relaciones que conforman la estructura de lo que se define como sistema, así como también de todo aquello que conforma el entorno del

sistema definido. Esta postura se sustenta en los principios del **holismo** (del griego *holos*= todo) que sugiere que cada realidad debe verse como una totalidad y no como un conjunto de las partes que lo componen.

El pensamiento sistémico abarca una diversa variedad de métodos, herramientas y fundamentos dirigidos a investigar la interrelación de fuerzas que son parte de un determinado proceso (Senge, P. M., Kleiner, A., Roberts, C., Ross, R., & Smith, 2006). Va más allá de lo que se muestra como un incidente independiente y aislado para llegar a patrones más profundos, de modo que es posible reconocer las relaciones que existen entre los sucesos y se dispone de una capacidad mayor para comprenderlos e influir en ellos.

Pensar con un enfoque sistémico no es fácil, ya que estamos acostumbrados a pensar linealmente, buscando patrones simples y considerando procesos como un camino de una sola dirección. Sin embargo, no todas las situaciones a las que nos enfrentamos son un simple modelo de causa y efecto. Como explica (Osorio, 2007), es necesario ir más allá de un enfoque reduccionista en el que se reducen los problemas a la mínima expresión y analizan las partes por separado, porque de esa manera se pierden de vista las relaciones que tienen lugar entre los elementos del sistema, y como se ha visto hasta ahora, estas son importantes para el estudio de los sistemas.

### **Fundamentos del pensamiento sistémico**

Los fundamentos del pensamiento sistémico permiten que esta perspectiva pueda aplicarse satisfactoriamente en el análisis de cualquier sistema, ya que se basa en metodologías orientadas al conocimiento. El pensamiento sistémico sigue tres fundamentos, descritos por (Martínez & Londoño, 2012):

- 1. La articulación del problema:** Identificación del problema o sistema a analizar, sin dejarse guiar por las dificultades que este presente; identificación del propósito del estudio del problema, así como establecer los límites y la resolución de un modelo.
- 2. El análisis de sistemas:** Adquirir un conocimiento amplio del sistema a estudiar, de modo que se facilite la predicción de comportamientos sobre el sistema. Esto implica estudiar los componentes del sistema y las interacciones internas (entre

los componentes) y externas (del sistema con otros sistemas y con su ambiente), lo cual permite identificar transferencias o flujos de información. Posterior a esto, se deben determinar las variables del sistema, las cuales pueden ser: endógenas (variables internas que surgen de las interacciones entre los elementos del sistema), exógenas (variables externas que son determinadas por el ambiente) y de estado (variables que fijan las características que definen las fases del sistema); también puede haber parámetros que son valores fijos que describen aspectos de la estructura del sistema. Las interacciones que ocurren en el sistema se pueden representar con formulaciones matemáticas.

- 3. El uso de modelos:** Los modelos permiten emular las interacciones y los procesos del sistema en estudio, por lo que son útiles para la predicción de comportamientos. De esta manera es posible determinar la necesidad de modificaciones, ya que se toman en cuenta las variables obtenidas durante el análisis. Experimentar con el modelo permite obtener información acerca del mundo real.

### **Niveles del pensamiento sistémico**

El pensamiento sistémico aplicado de manera eficiente implica el funcionamiento simultáneo de cuatro niveles y estos son descritos a continuación (Senge, P. M., Kleiner, A., Roberts, C., Ross, R., & Smith, 2006):

- 1. Primer nivel – Acontecimientos:** Comprende la visualización de los acontecimientos, denominadas **variables**, que provocan un determinado estado del sistema actual, sea este deseado o no. Si es un acontecimiento deseado, no se debe recurrir a dar soluciones apresuradas para evitar que se produzca una mejora temporal o el surgimiento de otras situaciones no deseadas entre otros elementos del sistema.
- 2. Segundo nivel – Pautas de conducta:** Se analizan los comportamientos de las variables encontradas en el primer nivel, con respecto al tiempo para determinar posibles relaciones entre ellas. Se recomienda el uso de gráficas que expongan el comportamiento de las variables con respecto al tiempo para un mejor análisis.

3. **Tercer nivel – Estructuras sistémicas:** Se estudian las **relaciones causales** o interrelaciones entre las variables que permitan describir los comportamientos estudiados en el segundo nivel, para luego encontrar una solución conveniente al problema. Se recomienda el uso de diagramas de sistemas para relacionar gráficamente las relaciones entre las variables observadas.
4. **Cuarto nivel – Modelos mentales:** Se analiza la manera en la que cada elemento del sistema realiza su función, para determinar si el problema reside en este. De ser así, se cambian los modelos mentales de los elementos y se estudian los acontecimientos que surgen de los nuevos comportamientos

## ***La dinámica de sistemas y sus contribuciones***

### **Introducción**

El término *dinámica* expresa el carácter cambiante de algo. En este sentido, *dinámica de sistemas* se refiere a las diferentes variables que se pueden asociar a las partes de un sistema y que sufren cambios a lo largo del tiempo, produciendo interacciones entre ellas.

La dinámica de sistemas es un método que permite analizar los diferentes componentes que integran y constituyen el todo de un sistema complejo para una fácil visualización y simulación (Tang & Vijay, 2015), por lo que está fuertemente basada en el pensamiento sistémico. La dinámica de sistemas aporta un ejemplo concreto de una metodología en la que se articulan el análisis y la síntesis, por lo que suministra una muestra de una metodología sistémica. Como sugiere (Forrester, 2009), en su desarrollo completo, la dinámica de sistemas es una disciplina que involucra otros campos de las ciencias, educación, leyes, medicina e ingeniería.

### **Desarrollo y aportes**

La dinámica de sistemas fue concebida para resolver un problema concreto: el que presentaba una empresa de productos electrónicos, que teniendo pocos clientes y todos ellos con unos pedidos muy estables y previsibles, registraba considerables oscilaciones en la línea de producción. Del análisis se determinó que se debían a la combinación de estructuras de realimentación y de retrasos en la transmisión de información a lo largo de estas estructuras. Desde mediados de los años 50 fue Jay W. Forrester, ingeniero en

el Massachusetts Institute of Technology (MIT) y actualmente considerado el padre de la dinámica de sistema, quien contribuyó a sentar las bases del método que hoy se conoce como dinámica de sistemas, denominado originalmente como dinámica industrial.

Forrester publicó tres trabajos que fueron trascendentales para el desarrollo de lo que hoy se conoce como dinámica de sistemas: 1) *Industrial Dynamics* en 1961, que analiza diversos sistemas comerciales y de gestión y hasta hoy sigue siendo una exposición elemental de la metodología de esta disciplina, 2) *Urban Dynamics* en 1969, que estudia diferentes problemas de la sociedad urbana, y 3) *World Dynamics* en 1971 que describe el modelo del mundo y examina problemas mundiales como el crecimiento de la población y la contaminación (Morlán, 2011).

En 1972 se produce el informe al Club de Roma denominado *The Limits to Growth* por Meadows & Meadows, en el que se analizaba la previsible evolución de una serie de magnitudes agregadas a nivel mundial como son la población, los recursos y la contaminación. En este modelo se analizaba la interacción de estas magnitudes y se ponía de manifiesto cómo, en un sistema, debido a las fuertes interacciones que se producen en su seno, la actuación sobre unos elementos, prescindiendo de los otros, no conduce a resultados satisfactorios. Gracias a esto, se popularizó la dinámica de sistemas a nivel internacional.

La dinámica de sistemas comprende un método que extiende su enfoque a la resolución de problemas complejos a gran escala, incorporando diferentes elementos de un sistema en el tiempo así como el aspecto dinámico que incorpora diferentes conceptos relacionados a la disciplina (Tang & Vijay, 2015), que se describirán en posteriores capítulos.

Con base en los trabajos de Forrester y otros, se pueden mencionar tres de los aportes más importantes al estudio de la dinámica de sistemas, los cuales se describen brevemente a continuación, pero serán explicados con mayor profundidad en capítulos siguientes:

1. **Diagrama causal:** Es una herramienta que muestra las relaciones causales entre los componentes de un sistema, de modo que se facilite el análisis de los comportamientos de realimentación a través del tiempo (Morlán, 2011).
2. **Diagrama de Forrester:** Es uno de los instrumentos básicos en la dinámica de sistemas (Aracil & Gordillo, 1997) y consiste en un modelo gráfico donde se observa la relación entre tres tipos de variables del sistema: de nivel o acumulación, de flujo o razón de cambio y auxiliar o de cálculo intermedio, en base al diagrama causal.
3. **Metodología para la construcción de un modelo:** Tal como explica (Aracil & Gordillo, 1997), esta metodología consiste en tres fases de carácter iterativo, pues se puede pasar de una fase a otra sin un orden en particular, tal como se observa en la Figura 2.

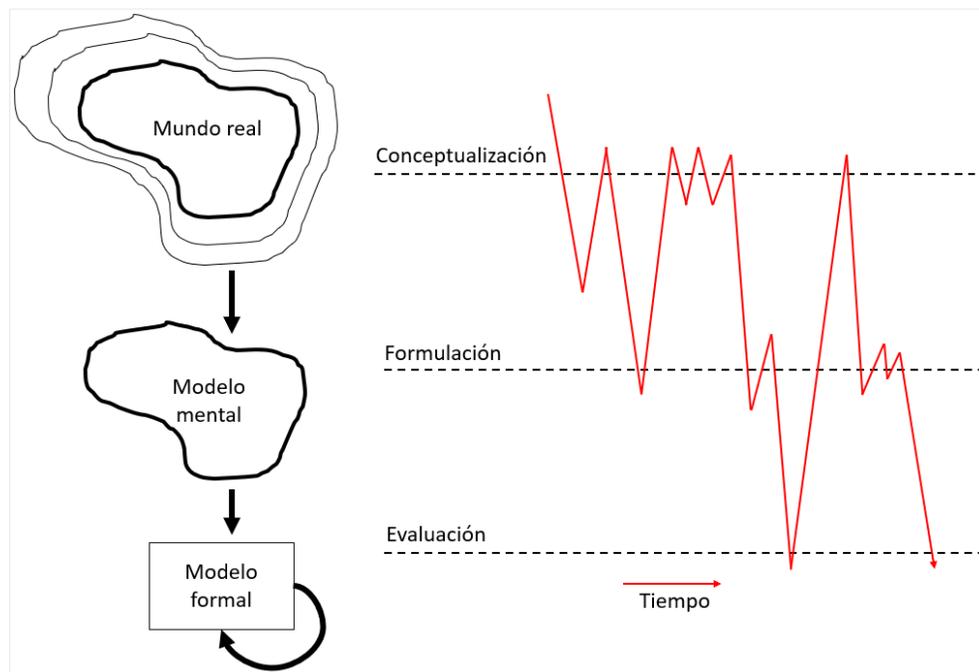


Figura 2. Carácter iterativo de la metodología. – Tomado y adaptado de (Aracil & Gordillo, 1997).

Un método conveniente para hacer estudios de la dinámica de sistemas es a través de un **diagrama de bloques de un sistema de control**, el cual permite hacer una representación gráfica de las relaciones entre las variables de entrada y salida del sistema y, sobre este, se pueden describir los siguientes elementos:

- **Referencias o entradas:** Es la señal que le da al sistema el estímulo necesario para que produzca una respuesta o salida.
- **Controlador:** Manipula la entrada del proceso.
- **Actuador:** Recibe información del controlador y manipula directamente el proceso.
- **Proceso:** Desarrollo necesario para producir las respuestas del sistema.
- **Salidas:** Respuestas del sistema.
- **Sensor:** Brinda realimentación al sistema y permite comparar la salida con la entrada del sistema.
- **Perturbación:** Señales no deseadas que influyen en el funcionamiento del sistema.

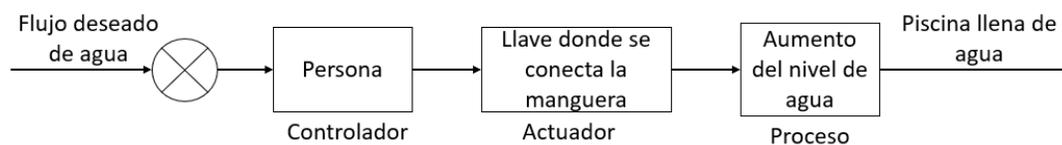
Los sistemas de control se clasifican en: 1) de lazo abierto o sin realimentación y 2) de lazo cerrado o con realimentación.

### Casos de aplicación

A continuación se presentan dos casos de aplicación que se analizarán y serán representados posteriormente a través de un diagrama de bloques.

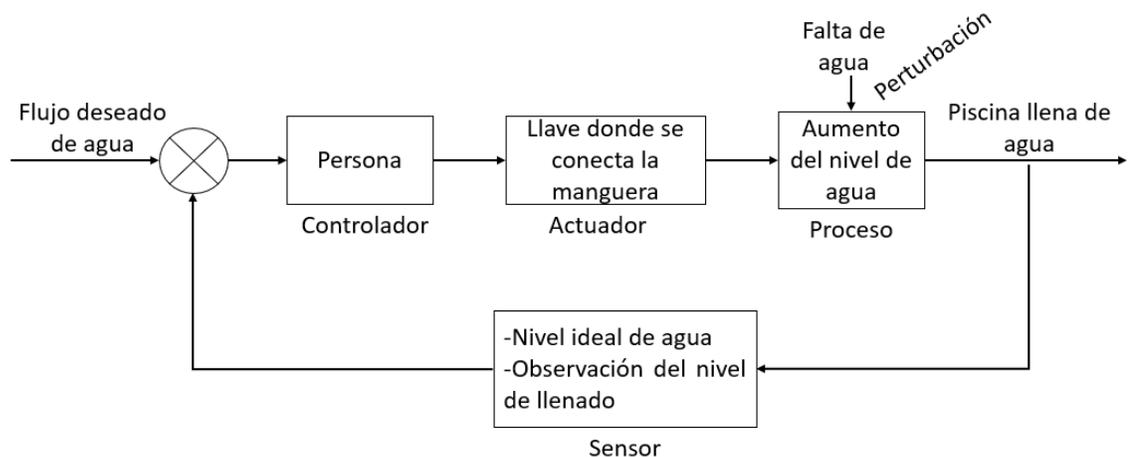
1. **Caso de aplicación #1 – Sistema de control de lazo abierto:** Una persona desea llenar una piscina utilizando una manguera. La persona abre la llave donde está conectada la manguera y regresa adentro de su casa para dejar que la piscina se llene, esperando que algún familiar se encargue de vigilar el llenado de la piscina. Sin embargo, este no sabe que está solo en casa. Construir el diagrama de bloques para este sistema, asumiendo que la persona no verifica cada cierto tiempo el nivel de agua dentro de la piscina.

**Solución:** Como la persona no está cerca de la piscina para verificar cuando la piscina está llena o bien, controlar el nivel de agua que desea en la piscina, se puede decir que no hay realimentación. Por lo tanto, el diagrama de bloques quedaría de la siguiente manera:



**2. Caso de aplicación #2 – Sistema de control de lazo cerrado:** Una persona desea llenar una piscina utilizando una manguera. La persona abre la llave donde está conectada la manguera y espera a que la piscina se llene para posteriormente cerrar la llave para detener el flujo de agua. Construir el diagrama de bloques para este sistema, asumiendo que la persona está cerca de la piscina para vigilar el nivel de agua de la piscina.

**Solución:** El problema especificó que, en este caso, la persona estaría cerca de la piscina para determinar en qué momento era necesario cerrar la llave donde está conectada la manguera. En este caso, la persona recibe información acerca del sistema a través de la observación del nivel ideal para la piscina y por lo tanto, hay realimentación. Además, se incluyó una perturbación en el proceso. Para este caso se tiene que el diagrama de bloques es el siguiente:

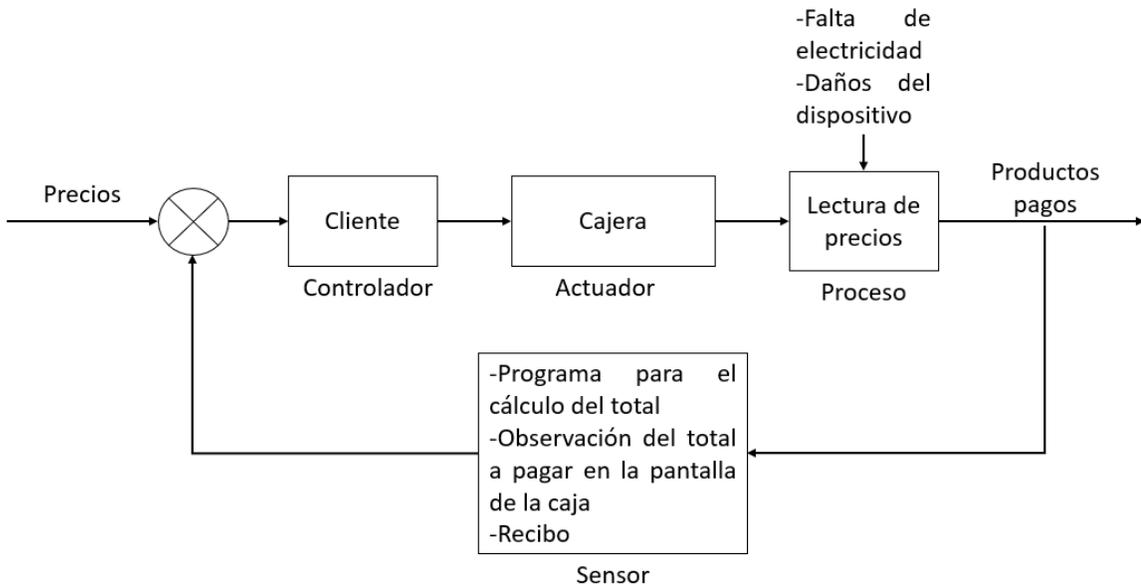


## Ejemplos

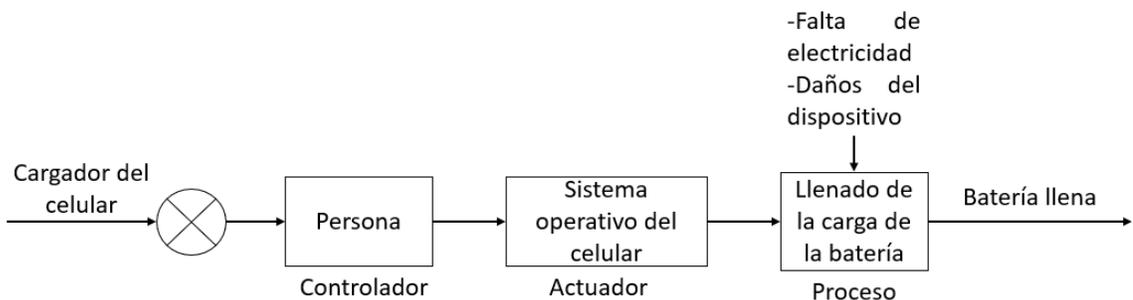
A continuación se explicarán dos ejemplos para una mejor comprensión de la aplicación del método de diagrama de bloques de sistemas de control.

- **Ejemplo #1 – Pago de productos en una caja de supermercado:** Para este ejemplo se conoce que la entrada del sistema son los precios de los productos, mientras que la salida son los productos pagos. Quien manipula los productos para que sean cobrados es el cliente, por lo que el actuador es la cajera y el proceso corresponde al paso de los productos a través del lector de precios. Además, este implica realimentación, ya que la cajera debe informar al cliente el

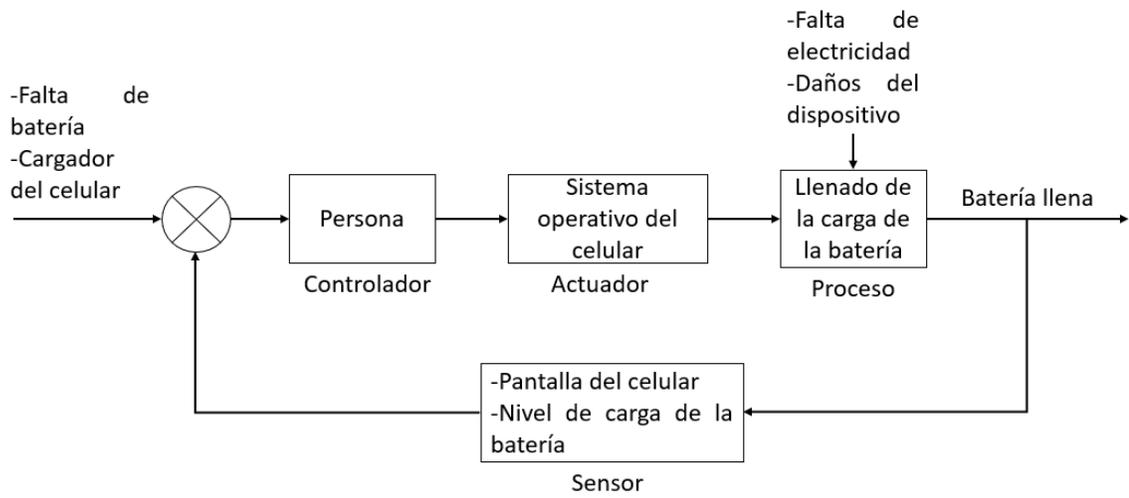
total a pagar por los productos. Una manera sencilla de representar este sistema a través de un diagrama de bloques sería la siguiente:



- Ejemplo #2 – Proceso de carga de la batería de un celular:** En este ejemplo se tiene que el controlador es la persona que conectará el cargador al celular, el cual será la entrada del sistema. Además, el sistema operativo del celular será el actuador que manipule el proceso de llenado de la batería con carga, para que finalmente la batería esté llena. Una forma simple de representar este sistema sería la siguiente:



Se puede observar que en los sistemas de lazo abierto también pueden existir perturbaciones que modifiquen el funcionamiento del sistema. En el diagrama anterior no se incluyó la realimentación, que sería cuando la persona verifica el estado de la carga de la batería en la pantalla del celular, el cual sería el sensor en un sistema de lazo cerrado. Además, para este se puede agregar otra entrada al sistema, la cual se muestra a continuación:



## Capítulo II: Sistemas y sus representaciones

En el Capítulo I se describieron diferentes conceptos relacionados a la TGS, así como los fundamentos en los que se basa esta teoría. Además, dentro del desarrollo de la dinámica de sistemas, diferentes autores contribuyeron a impulsar el uso de métodos útiles para el estudio de sistemas.

Este capítulo pretende desarrollar más detalladamente dichos métodos, así como describir los pasos necesarios para el análisis de sistemas. Finalmente, se explicará el concepto de modelo, el cual es una parte esencial en el estudio sistemas basados en la realidad.

### ***Descripción de los sistemas***

La descripción de sistemas es la primera fase del análisis de sistemas y forma parte de la conceptualización, el cual es el primer paso en la metodología para la construcción de un modelo. Esta fase requiere de gran cantidad de información y técnicas de codificación y organización de la información. En este sentido, es conveniente destacar que todos los sistemas que verdaderamente son de interés para un analista:

- a) Se componen de múltiples partes
- b) Se constituyen por una gran variedad de materiales
- c) Operan por largo tiempo bajo diversas condiciones

Es importante hacer una definición precisa del sistema y si este está definido adecuadamente se conocen las partes o subsistemas, así como la interacción entre dichas partes. Además, se comprende el funcionamiento del sistema para un periodo determinado y se conocen los cambios que sus características sufren con el tiempo.

### **Estructura**

La estructura de un sistema se refiere a las diferentes interrelaciones estables entre los componentes del sistema que pueden identificarse en un determinado momento (Arnold & Osorio, 2009). La principal característica de la estructura de todo sistema son los **bucles de realimentación** que pueden ser de dos tipos que se describen a continuación con base en las definiciones de (Maiocchi, 2009):

1. **De refuerzo:** Ocurre cuando la realimentación de los cambios en el sistema se amplifica porque se produce en la misma dirección del cambio original. Este tipo de bucle puede dar lugar a un círculo virtuoso si el refuerzo es positivo y a un círculo vicioso si el refuerzo es negativo. Se representa como una bola de nieve que baja por una pendiente, como se observa en la Figura 3.

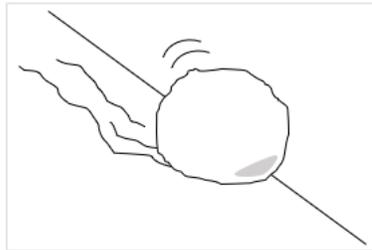


Figura 3. Representación del bucle de realimentación de refuerzo. – Adaptado de (Maiocchi, 2009).

2. **De compensación:** Ocurre cuando la realimentación de los cambios en el sistema va en dirección contraria al cambio original con el fin de moderar el efecto. Esto puede entenderse como una resistencia al cambio por parte del sistema o como la tendencia a la estabilidad. Este tipo de bucle se representa con una balanza como se ve en la Figura 4.

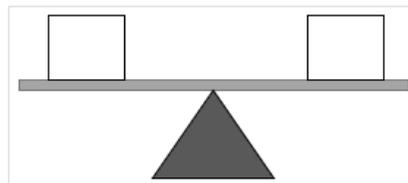


Figura 4. Representación del bucle de realimentación de compensación. - Adaptado de (Maiocchi, 2009).

Por lo general, la estructura de un sistema se representa a través de diagramas causales y presenta una combinación de bucles de realimentación. Además, muchas veces los sistemas presentan otra característica en su estructura denominada **demoras** o **retrasos** y pueden definirse como una relación causal entre dos variables que implica una transmisión de información que requiere del transcurso de una cierta cantidad de tiempo (González & Múgica, 1998). Su existencia en las relaciones del sistema son una característica fundamental en la dinámica de sistemas porque permiten estudiar los cambios y efectos de los sistemas a lo largo del tiempo.

## Fronteras

La frontera de un sistema se refiere a los límites que separan al sistema de su ambiente y por ende, definen aquello que pertenece dentro o fuera de dicho sistema (Johansen Bertoglio, 2008). La frontera del sistema puede ser física o conceptual y la delimitación de este dependerá de lo que el analista considere necesario para hacer el estudio, sin embargo el establecimiento de la frontera debe encerrar las principales relaciones con el medio. Para ello es importante tomar en cuenta lo siguiente:

- ✓ Enumerar todos los componentes que integran al sistema permite tener una mejor perspectiva de las interacciones dentro del sistema. Todos los componentes dentro de la frontera se llaman sistema, mientras que los que están fuera se llaman ambiente.
- ✓ Indicar todos los flujos que atraviesan la frontera. En este sentido, puede haber dos tipos: los que entran desde el ambiente al interior de la frontera del sistema o entradas y los que van desde el interior de la frontera al exterior o salidas.
- ✓ Identificar todos los elementos que contribuyen a la obtención de metas específicas e incluirlas dentro de la frontera si aún no lo están.

En la Figura 5, se muestra un diagrama que representa un sistema e indica con color rojo la frontera de este. Todo aquello que está alrededor de la frontera es el ambiente y puede existir intercambio de información entre el sistema y el ambiente (representado con las flechas verdes).

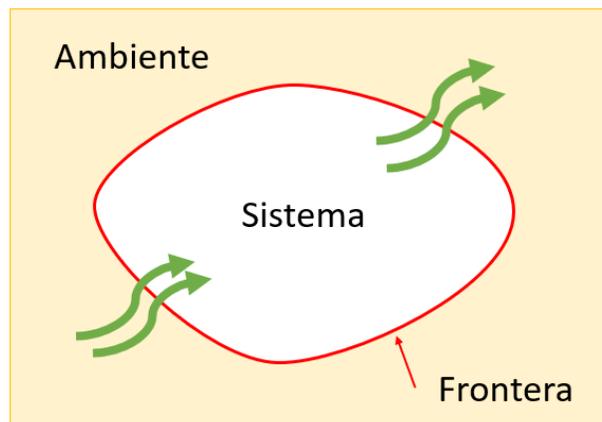


Figura 5. Representación de un sistema, donde la frontera está indicada con color rojo. - Adaptado de (Ojea, 2007).

## **Comportamiento**

El comportamiento puede definirse como la evolución a lo largo del tiempo de los distintos atributos de los elementos que forman el sistema. Cuando se estudia el comportamiento de un sistema, se asume que éste cambia con el tiempo y que nos interesa dar razón de ese cambio.

Cuando el sistema presenta una estructura de refuerzo, se dice que presenta un comportamiento que asegura patrones de crecimiento o decaimiento, o bien, un comportamiento de crecimiento exponencial. Por otro lado, cuando el sistema presenta una estructura de compensación, se dice que presenta un comportamiento de equilibrio de modo que cualquier cambio alejado del punto de equilibrio inicial producirá una fuerza de compensación nuevamente hacia ese punto. Finalmente, si se introduce un retraso en la estructura del sistema entonces se dice que tiene un comportamiento que presenta oscilación (Dangerfield, 2014).

## **Estructura interna de los sistemas**

La estructura interna de los sistemas se clasifica en tres:

1. **Endoestructura:** Es la estructura interna de un sistema y corresponde al conjunto de relaciones entre los componentes del sistema.
2. **Exoestructura:** Es la estructura externa de un sistema y corresponde al conjunto de relaciones entre los componentes del sistema y los elementos de su entorno.
3. **Estructura total:** Es la unión o suma lógica entre la endoestructura y la exoestructura del sistema.

## **Diagramas de bloques y flujo de señales**

Los diagramas de bloques son una representación gráfica de las funciones desempeñadas por cada uno de los componentes del sistema, así como el flujo de señales de un componente a otro (Husseini, 2013). Estos permiten representar de forma simplificada la transformación de una variable en otra, es decir, la representación de la relación entrada/salida.

Los bloques del diagrama son operacionales y unidireccionales y representan la función de transferencia de las variables de interés. Además, con los bloques es posible evaluar

la contribución de cada componente al desempeño total del sistema, pero el diagrama de bloques de un sistema no es único y no incluye información de la construcción física del sistema.

- **Elementos de un diagrama de bloques:** La forma más simple de un diagrama de bloques se compone de un bloque individual que transforma o procesa una entrada para producir una salida. Los elementos de este tipo de diagrama son:
  - ✓ **Variable de entrada:** Es el estímulo o señal que se debe transformar para producir un resultado.
  - ✓ **Variable de salida:** Es el resultado de la transformación de la variable de entrada.
  - ✓ **Bloque:** Representa la operación de transformación que sufre la entrada para producir la salida.
  - ✓ **Flecha:** Representa una y sólo una variable; la punta de la flecha indica la dirección del flujo de señales o la dirección de la información.

En La Figura 6 se especifican los elementos a través de un diagrama de bloques simple. De igual manera, los diagramas de bloques más complejos tienen más elementos los cuales fueron descritos en el Capítulo I.



*Figura 6. Elementos de la forma más simple de un diagrama de bloques.*

Los diagramas de flujo de señales son una forma de representar de manera esquemática un sistema en función de las señales que interactúan en él (entradas, salidas y señales intermedias) considerando el flujo o sentido de ellas y las funciones de transferencias que las vinculan. Este tipo de diagrama contiene fundamentalmente la misma información que un diagrama de bloques, con la diferencia de que despliega el flujo de las señales que pasa desde un punto del sistema a otro punto, así como las relaciones entre esas señales (Rocha & Lara, 2008).

- **Elementos de un diagrama de flujo de señales:** Los elementos de un diagrama de flujo de señales son descritas por (Rocha & Lara, 2008) y se especifican a continuación:
  - ✓ **Nodo:** Se representa por un punto y define una señal de entrada, salida o intermedia.
  - ✓ **Nodo de entrada:** También llamado fuente, es un nodo que sólo tiene flechas que salen de él.
  - ✓ **Nodo de salida:** También llamado sumidero, es un nodo que sólo tiene flechas que entran a él.
  - ✓ **Nodo mixto:** Tiene tanto flechas de entrada como de salida.
  - ✓ **Transmitancia o transferencia:** Se representa por una flecha orientada que une dos nodos y define la función de transferencia que vincula a los dos nodos o señales.
  - ✓ **Trayecto o camino:** Es el recorrido en el sentido de las flechas que une dos nodos. Si sólo toca los nodos una vez, se dice que es un camino **abierto**, mientras que si finaliza en el mismo nodo del cual partió y pasa por los restantes nodos una sola se dice que es un camino **cerrado** o **lazo**.
  - ✓ **Trayecto o camino directo:** Son los caminos, en el sentido de las flechas, que unen de forma directa un nodo de entrada con uno de salida.

En La Figura 7 se especifican los elementos de un diagrama de flujo de señales.

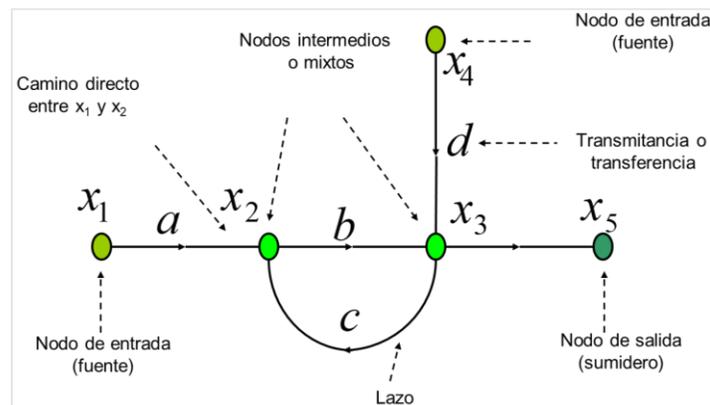


Figura 7. Elementos de un diagrama de flujo de señales.

Tanto en las representaciones de bloques como en las que emplean diagramas de flujos de señales, las transformaciones se consideran estables.

### **Agrupaciones y retroalimentación**

La realimentación es otra estructura que se presenta con frecuencia en los sistemas y esta ocurre cuando la salida de un subsistema actúa sobre la entrada. La realimentación comprende aquellos procesos en los que el sistema obtiene información sobre los efectos de las acciones internas en el medio, en cuanto a decisiones sucesivas (Arnold & Osorio, 2009). En el Capítulo I se resolvieron ejemplos de sistemas de control a través de los diagramas de bloques y se mencionaron dos tipos: los sistemas de lazo abierto y los **sistemas de lazo cerrado**, siendo estos últimos sistemas de control realimentado.

Un **sistema de control realimentado** es aquel sistema que tiende a mantener una relación preestablecida entre la salida y la entrada de referencia, comparando ambas y utilizando la diferencia como parámetro de control. La realimentación es la característica que distingue a los sistemas de lazo cerrado y es la propiedad que permite que la salida de un sistema sea comparada con entrada, de tal manera que se pueda establecer la acción de control apropiada como función de la entrada y la salida.

Es importante destacar que cuando un sistema presenta realimentación, pueden existir fenómenos de inestabilidad y por esta razón es importante detectar la presencia de realimentación en un sistema de modo informal. Es factible afirmar que un sistema es inestable si la señal de salida de este es el algún momento de magnitud ilimitada cuando la señal de entrada tiene una magnitud limitada. La inestabilidad ocurre cuando la magnitud de la salida aumenta sin límites.

### ***Sistemas dinámicos y sus representaciones***

#### **Definición de sistema dinámico**

Un sistema dinámico es un sistema que presenta estados que evolucionan a lo largo del tiempo. Una definición formal, propuesta por (Klages, 2008), sería la siguiente: ***“Un sistema dinámico consiste en un conjunto de transformaciones en el espacio de estado que evolucionan a lo largo del tiempo, ya sea este continuo o discreto”***. El espacio de estado se refiere al conjunto de todos los estados posibles que puede

presentar el sistema, mientras que el tiempo será continuo cuando las variables evolucionen de manera continua y discreto cuando las variables cambien solamente en determinados instantes.

### **Características**

Los sistemas dinámicos se caracterizan por los siguientes factores, definidos en base a las descripciones de (Apestegui Florentino, 2011):

- **Estructura:** Es la parte más importante de un sistema dinámico, ya que expone las interrelaciones que existen entre los componentes del sistema.
- **Dinámica:** Se refiere a la evolución del sistema a través del tiempo, lo cual permite hacer predicciones sobre futuros comportamientos.
- **Circularidad:** Se refiere a al principio de causa y efecto que permite representar las interconexiones de los componentes del sistema, así como a los lazos de realimentación que surgen de estas relaciones.
- **Espacio:** Se refiere al distanciamiento que existe entre los lazos de realimentación. Este es un factor importante a la hora de determinar los límites del sistema.
- **Tiempo:** El principal factor de un sistema dinámico, ya que sobre este es que ocurren los cambios del sistema. Por ello, se estudia este tipo de sistemas en función de las variaciones que sufre en un determinado tiempo.
- **Apalancamiento:** Es un principio que se refiere al punto en que las modificaciones en la estructura del sistema pueden dar lugar a mejoras significativas e indefinidas (Maiocchi, 2009).

Además de los factores descritos, es conveniente describir las principales características que presentan los modelos de sistemas dinámicos de acuerdo con lo especificado por (Dangerfield, 2014):

- No abordan los problemas a través de la consideración de entidades individuales.
- Reflejan, principalmente, las causas endógenas en la dinámica de un sistema. Es decir, representa los cambios sobre el tiempo como efectos de la realimentación e interacción de componentes que están dentro de los límites del sistema.

- Hacen una clara distinción entre flujos de recursos y flujos de información, estos últimos siendo los que provocan que los flujos de recursos incrementen o se agoten.
- Aunque incluyen la razón de los flujos, los modelos muestran principalmente el comportamiento del abastecimiento o acumulación en el sistema.

### Pasos para el diseño

El diseño de modelos en la perspectiva de la dinámica de sistemas proporciona una mejor comprensión de la estructura y el comportamiento del sistema (Pejié-Bach & Cerié, 2007). (Richardson & Pugh III, 1981) establecen siete fases para resolver un problema de acuerdo con el enfoque de la dinámica de sistemas. Estas fases conforman la metodología de carácter iterativo mencionada en el Capítulo I y el la Figura 8 muestra el diagrama que resume estas fases:

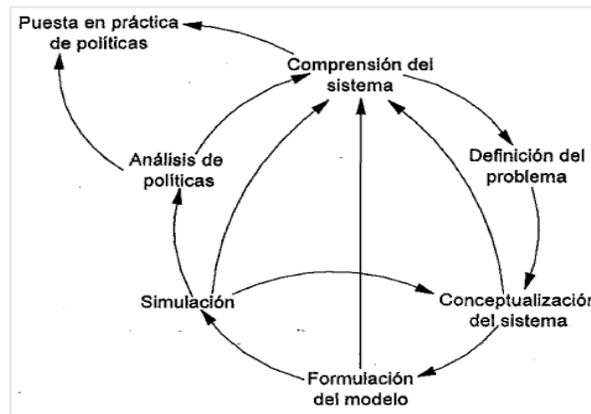


Figura 8. Proceso para el diseño de modelos de acuerdo con el enfoque de la dinámica de sistemas. - Tomado de (Richardson & Pugh III, 1981).

Sin embargo, (González & Múgica, 1998) propone los siguientes pasos para la modelización de cualquier sistema que presente un comportamiento dinámico:

1. **Describir** qué problemas presenta el sistema que requieran ser mejorados.
2. **Aislar** los factores que interactúan para identificar los síntomas observados.
3. **Estudiar** los ciclos de causa y efecto de información y realimentación que unen las decisiones a las acciones, de tal forma que la acción resultante cambie las nuevas decisiones.

4. **Formular** reglas, formales y aceptables, que describan cómo las decisiones resultan de las corrientes de información disponible.
5. **Construir** un modelo matemático de las reglas de decisiones, fuente de información e interacciones de los componentes del sistema.
6. **Generar** el comportamiento a través del tiempo del sistema descrito en el modelo (usualmente se ejecutan los cálculos por medio de computadoras).
7. **Comparar** todos los resultados contra todo el conocimiento pertinente disponible del sistema actual.
8. **Revisar** el modelo hasta que sea aceptable y sea una representación del sistema actual.
9. **Experimentar con el modelo**; rediseñar dentro del modelo las relaciones organizacionales y reglas que puedan ser alteradas en el sistema actual para encontrar los cambios que mejoran el comportamiento del sistema.
10. **Alterar** el sistema actual en las direcciones del experimento en el modelo para mejorar el rendimiento del sistema.

## Ejemplos

En los siguientes ejemplos se proponen sistemas para obtener la descripción de cada uno de ellos, con el fin de orientar en la obtención de descripciones de otros sistemas que deseemos estudiar en el nuestra vida cotidiana. Sin embargo, cabe destacar que las descripciones de los sistemas pueden variar de acuerdo con el tipo de estudio que se realizará y por lo tanto, de las consideraciones del analista del sistema según el estudio a realizar sobre el sistema.

- **Ejemplo #1 – Colmena de abejas:** Obtener la descripción del sistema de una colmena de abejas, que permita hacer un estudio sobre la cantidad de miel que se puede producir en una colmena. Se conoce que: *a)* A mayor cantidad de abejas obreras, mayor será la cantidad de miel que producirá cada abeja y *b)* El cuadrado del peso de la población de abejas obreras que están en la colmena corresponde a una cantidad aproximada de miel.

**Solución:** La descripción del sistema debe hacerse de acuerdo con el estudio que se quiere hacer. Tomando esto en cuenta, se obtiene que:

Elementos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Abejas obreras → porque estas son las que se encargan de la producción de miel en la colmena.</li> <li>• Miel → porque es el producto del trabajo de las abejas obreras.</li> </ul>
Atributos de cada elemento	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Abejas obreras → cantidad de abejas obreras, peso de la población.</li> <li>• Miel → cantidad de miel, peso de la miel producida.</li> </ul>
Frontera del sistema	El estudio se enfocará en las interacciones que tienen lugar dentro de la colmena, por lo que para los fines de este análisis la frontera del sistema está delimitada por la propia colmena.
Relaciones	Existe interacción entre las abejas y la miel, ya que las abejas producen esta última.
Estructura del sistema	<div data-bbox="727 1031 1242 1365" data-label="Diagram"> </div> <p>Se puede identificar tres bucles de realimentación de refuerzo, ya que a mayor cantidad de abejas obreras, mayor será el peso de la población de este tipo de abejas. Así mismo incrementará la cantidad de miel y por tanto, aumentará el de la miel producida. Sin embargo, se identifica un bucle de realimentación de compensación entre el peso de la población de</p>

	abejas, la cantidad de miel y el peso de la miel producida.
Ambiente	Como la colmena permite identificar la frontera del sistema, el ambiente corresponde a todo aquello que rodea a la colmena.

- **Ejemplo #2 – Sistema de recolección de basura en la ciudad de Panamá:** Obtener la descripción del sistema de recolección de basura en la Ciudad de Panamá, excluyendo la labor que realizan las “hormiguitas”.

**Solución:** A diferencia del ejemplo anterior, en este ejemplo no se especifica el tipo de estudio que se pretende realizar sobre el sistema. Sin embargo, se indica un dato muy importante para la determinación de los límites del sistema. Sobre este sistema se obtiene los siguiente:

Elementos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Camiones de basura</li> <li>• Recolectores</li> <li>• Habitantes</li> <li>• Basura</li> <li>• Tanques de basura</li> </ul>
Atributos de cada elemento	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Camiones de basura → capacidad</li> <li>• Recolectores → cantidad de personal, edad</li> <li>• Habitantes → edad, cantidad</li> <li>• Tanques de basura → ubicación, capacidad, cantidad</li> <li>• Basura → tipo de desecho, cantidad</li> </ul>
Frontera del sistema	Tal como especifica el problema, el estudio del este se enfocará en el servicio de recolección de basura que se presta dentro de los límites de la ciudad de Panamá. De igual manera, también se especifica excluir de la descripción del sistema la

	labor de las “hormiguitas”, por lo que el estudio que se realizará prestará mayor atención al servicio de recolección como tal, en el que intervienen los camiones de basura y los recolectores.
Ambiente	Como el estudio se restringirá a estudiar al funcionamiento del sistema dentro de los límites de la ciudad de Panamá, entonces el ambiente del sistema se compone de todo aquello que conforma los alrededores de la ciudad.

### ***El concepto de modelo***

#### **Definición**

Según (Carvajal Villaplanta, 2002), un modelo no es más que una descripción o representación de la realidad, sean estos fenómenos, situaciones, hechos, procesos, estructuras o sistemas, que están en función de una teoría. (Carvajal Villaplanta, 2002) proporciona la siguiente definición para el concepto de modelo: ***“Un modelo es una aproximación esquematizada de un sistema que recolecta los aspectos más significativos y que pretende mostrar las condiciones que dan lugar a los comportamientos del sistema”.***

A esta definición se le debe agregar que todo modelo debe permitir explicar, entender, predecir o mejorar el sistema bajo estudio, ya que como indica (Pejié-Bach & Cerié, 2007) el principal objetivo de los modelos de sistemas dinámicos es poder analizar la estructura y el comportamiento de un sistema, así como diseñar formas eficientes para emplear el sistema.

#### **Estructura**

Anteriormente, en este capítulo, se explicó que la estructura de un sistema dinámico corresponde a las interrelaciones que existen entre los elementos y dan lugar a los denominados bucles de realimentación. El modelo de un sistema dinámico debe representar estas interacciones, ya que la estructura es la que permite definir el

comportamiento del sistema, y por lo tanto, hacer predicciones a través del análisis de los comportamientos haciendo uso del modelo del sistema en estudio.

### **Fronteras**

Al igual que las fronteras de un sistema dinámico, los límites del modelo deben ser análogos a los límites del sistema. El modelo debe hacer una clara separación entre el ambiente del sistema y dentro del sistema deben estar delimitados aquellos componentes que se consideran indispensables para estudiar las interrelaciones que dan lugar a los diferentes comportamientos del sistema. Es por ello que se requiere hacer una correcta delimitación del sistema dinámico que se pretende estudiar para obtener un modelo equivalente a dicho sistema.

### **Modelos confiables y observables**

Los modelos son herramientas de simulación por lo que la exactitud de un modelo depende del análisis que se le haga al sistema, de modo que sea posible obtener datos y hacer una comparación de los resultados obtenidos tanto por el modelo como por el sistema. En este sentido, el diseño y construcción de modelos confiables y observables permiten que a estos se les den diferentes usos, los cuales se describen a continuación:

- **Ayuda al pensamiento:** Es un recurso explicativo que permite definir un problema o un sistema, pues permite estudiar los pasos necesarios para llegar a la solución.
- **Ayuda a la comunicación:** Brinda una forma de comunicación eficiente y práctica que permite eliminar las ambigüedades que aparecen en un lenguaje verbal cuando se emiten ideas o descripciones complejas.
- **Ayuda al entrenamiento e instrucción:** Permiten entrenar personas porque hace posible la práctica con el ambiente, la experimentación en situaciones de crisis y el enfrentamiento con eventualidades antes de que estas ocurran.
- **Herramienta de predicción y ayuda al desarrollo:** Indican si el proyecto es o no económicamente factible, lo que permite elaborar planes de desarrollo. De igual manera, ayudan a prevenir circunstancias de emergencia y verificar las medidas apropiadas antes de que la situación se presente.
- **Ayuda a la experimentación:** La experimentación consiste en investigar, analizar, probar y estudiar un modelo en lugar del sistema real. Por ello, la

simulación es la que permite probar y evaluar sistemas nuevos o cambios propuestos en los sistemas actuales cuando la experimentación con el sistema real es costosa, poco práctica o ambas.

### **Taxonomía de los modelos**

Los modelos pueden clasificarse de diferentes maneras y es necesario conocer cada una de ellas para saber las tecnologías que se deben utilizar. Los modelos se clasifican en cuatro grandes grupos:

1. De acuerdo con el enfoque del modelo
2. De acuerdo con los cambios o variaciones del modelo
3. Icónicos versus Físicos versus Análogos
4. Determinísticos versus Estocásticos

A continuación, en la Figura 9 se muestra un diagrama de la taxonomía de los modelos y posteriormente se describen y se ejemplifican estas clasificaciones.

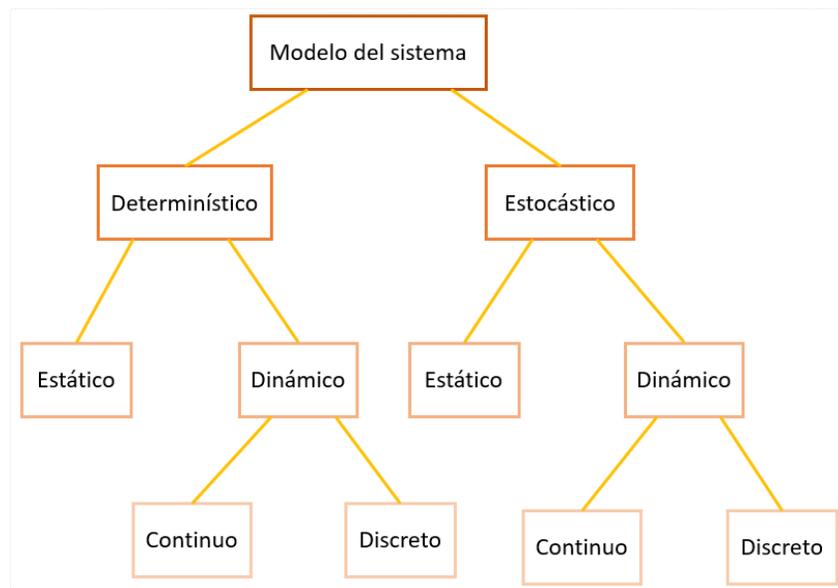


Figure 9. Taxonomía de los modelos. - Tomado y adaptado de (Fishman, 2013).

- **De acuerdo con el enfoque del modelo**

Según el enfoque del modelo, estos pueden ser físicos y matemáticos, los cuales pueden a su vez, subdividirse en estáticos y dinámicos.

**a. Modelos físicos:** Son aquellos que son similares al sistema en estudio, por lo que se consideran réplicas o cuasi-réplicas del sistema real. Pueden basarse en representaciones a escala y generalmente se utilizan para visualizar la proporción de espacio que existe entre los elementos, por lo que se utilizan tanto en demostraciones como en experimentación directa.

**a.1. Modelos físicos estáticos:** Representan un punto de equilibrio del sistema y su uso es muy conveniente en el área científica, pues se utilizan en lugar de realizar dibujos complejo en tres dimensiones.

**a.2. Modelos físicos dinámicos:** Representan una analogía entre el sistema en estudio y algún otro sistema de naturaleza distinta. La analogía de estos modelos dependerá del nivel de semejanza de las fuerzas que rigen el comportamiento de los sistemas.

**b. Modelos matemáticos:** Son aquellos modelos que utilizan una notación simbólica y ecuaciones para representar el sistema. Los atributos de este se simbolizan a través de funciones matemáticas que representan las relaciones entre las variables. Son modelos abstractos por lo que se requiere de suposiciones y de simplificaciones para ser resueltos y así asegurar que son una representación válida del sistema.

**b.1. Modelos matemáticos estáticos:** Son modelos que indican relaciones entre los atributos cuando el sistema está en equilibrio. El modelo dispone nuevos valores para los atributos si el punto de equilibrio cambia, pero no indica la forma en la que ocurren esos cambios.

**b.2. Modelos matemáticos dinámicos:** Son modelos que representan los cambios en los atributos del sistema de acuerdo con el tiempo.

- **De acuerdo con las variaciones del modelo**

Esta clasificación depende de los cambios que pueden ocurrir en el modelo, siendo estos continuos o discretos. Es importante aclarar dos conceptos: las variables independientes son aquellas que pueden tomar cualquier valor, mientras que las variables dependientes tomarán valores de acuerdo con su relación matemática con las variables independientes. Según esta clasificación existen tres tipos de modelos:

- a. **Modelos discretos:** Son aquellos en los que el comportamiento del sistema se observa en intervalos en el tiempo, porque las variables dependientes cambian de manera discreta.
- b. **Modelos continuos:** En estos modelos las variables dependientes cambian de manera continua y no en intervalos.
- c. **Modelos combinados:** Son modelos en los que algunas variables dependientes pueden variar tanto discretamente como continuamente.

- **Otras clasificaciones**

Existen otras dos clasificaciones de los modelos:

- a. **Icónicos versus simbólicos versus análogos:** Corresponde a los modelos descritos anteriormente: los modelos icónicos y modelos análogos son los modelos físicos, mientras que los modelos simbólicos son los modelos matemáticos.
- b. **Determinísticos versus estocásticos:** Los modelos determinísticos son aquellos en los que se conocen con certeza los datos, por lo que no incluyen el principio de incertidumbre ya que se conoce toda la información para tomar decisiones. Por otro lado, los modelos estocásticos son aquellos en los que se desconoce al menos un dato, por lo que sí incluye la incertidumbre.

### Ejemplificación de las diversas clasificaciones

Tipo de modelo	Ejemplos
Físico	<div style="text-align: center;">  </div> <p style="text-align: center;"><i>Figura 10. Sistema hidráulico - Tomado de Imágenes de Google.</i></p>



Figura 11. Maqueta a escala de edificios. - Tomado de Imágenes de Google.

Matemático

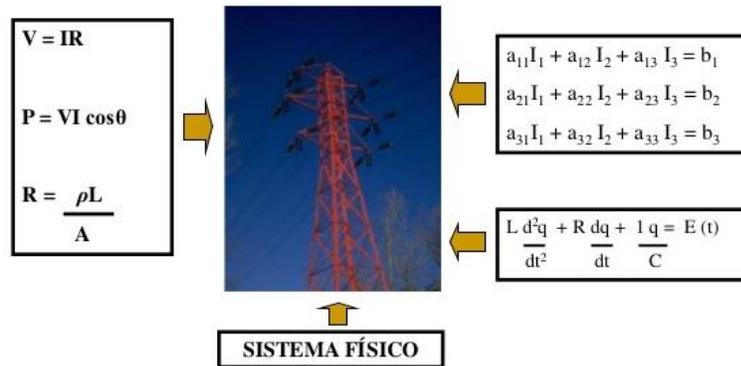


Figura 12. Modelo matemático de un sistema físico. - Tomado de Imágenes de Google.

Físico estático



Figura 13. Modelo de la molécula de ADN. - Tomado de Imágenes de Google.



Figura 14. Modelo a escala de un barco. - Tomado de Imágenes de Google.

Físico dinámico



Figura 15. Modelo a escala de un avión probado en un túnel aerodinámico. - Tomado de Imágenes de Google.

Matemático estático

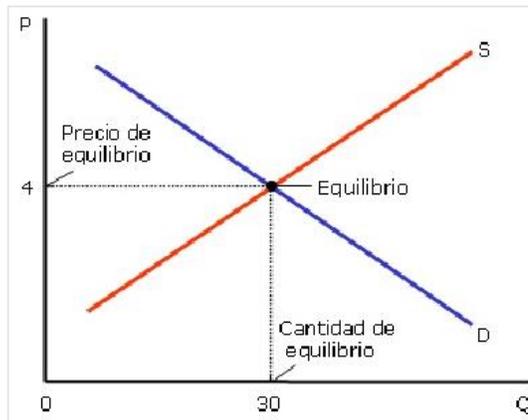


Figura 16. Modelo lineal de mercado donde se muestra el equilibrio entre la oferta y la demanda y ambos dependen del precio. - Tomado de Imágenes de Google.

Matemático dinámico

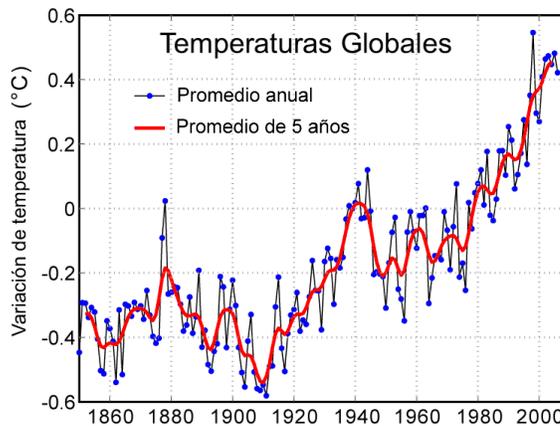


Figura 17. Modelo que indica los cambios de temperatura globales en función del tiempo (en años). - Tomado de Imágenes de Google.

Discreto

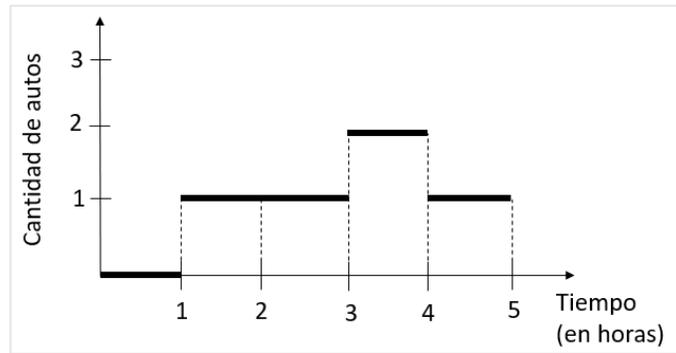


Figura 18. Modelo que representa la cantidad de carros en un lava autos.

Continuo

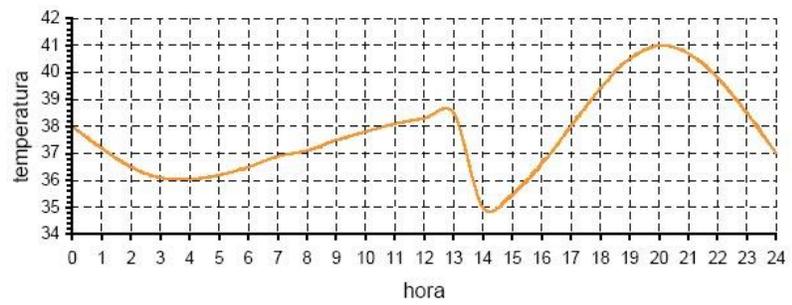


Figura 19. Modelo que representa los cambios de temperatura. - Tomado de Imágenes de Google.

## Capítulo III: Sistemas Dinámicos y Diagramas de Ciclo Causal

En este capítulo se explicarán más detalladamente algunos de los conceptos mencionados en el Capítulo II. Todos estos conceptos están relacionados con las formas de representar los sistemas dinámicos, por lo que es importante brindar una descripción clara para aprender la forma correcta de interpretar diagramas para el posterior diseño de modelos de los sistemas que se pretendan estudiar. De igual manera, en este capítulo se presentarán ejemplos para permitir una mejor comprensión de los conceptos.

### ***Teoría de causalidad***

La causalidad es la que gobierna la relación entre eventos, o visto desde un punto de vista más formal, el mundo consiste en una colección de sistemas causales y cada uno de ellos se compone por una serie de variables causales (Goodman, Ullman, & Tenenbaum, 2008). La teoría de causalidad forma parte de nuestra vida diaria, pues constantemente buscamos relaciones entre las cosas.

La teoría de causalidad no es más que aquel factor que nos permite entender el funcionamiento de los sistemas dinámicos, pues la búsqueda de relaciones para comprender las interacciones dentro de un sistema no son más que el resultado de las relaciones de causa y efecto.

### ***Relaciones de causa-efecto y su representación***

#### **Simbología**

Las relaciones causales, algunas veces llamadas diagramas de influencias, son el principal objeto de estudio de la teoría de causalidad y son las que permiten representar el funcionamiento de los sistemas a través de las variables endógenas, las cuales son las que están dentro de las fronteras del sistema. Estos se componen de tres elementos (Cañadas, Gea, Contreras, & Roa, 2015) y puede observarse su representación gráfica en la Figura 20:

1. **Elemento inicial (A) o causa:** Variable que representa un estado que da origen a un evento o una serie de eventos.

2. **Elemento final (B) o efecto:** Variable que representa el cambio respecto a una situación previa.
3. **Influencia:** Es la relación o correspondencia que existe entre la causa y el efecto y se representa con una flecha.



Figura 20. Representación gráfica de una relación causal.

### Significado de la dirección de la influencia

La dirección de la influencia o relación entre las variables se conoce como **polaridad de los enlaces** y describen la estructura del sistema. Esta puede ser de dos tipos:

- **Polaridad positiva:** Cuando la polaridad se mueve en la misma dirección, la cual se observa cuando:
  - ✓ A (aumenta)  $\rightarrow$ + B (aumenta)
  - ✓ A (disminuye)  $\rightarrow$ + B (disminuye)
- **Polaridad negativa:** Cuando la polaridad se mueve en dirección opuesta, la cual se observa cuando:
  - ✓ A (disminuye)  $\rightarrow$ - B (aumenta)
  - ✓ A (aumenta)  $\rightarrow$ - B (disminuye)

### Tipos de influencias

Se pueden identificar dos tipos de influencias las cuales se representan colocando un signo sobre la flecha (Morlán, 2011). Los tipos de influencias se describen a continuación:

1. **Influencia positiva:** Indica que ambas variables cambian en la misma dirección y se representa con el signo positivo (+). Su representación gráfica se observa en la Figura 21.



Figura 21. Relación de influencia positiva.

**2. Influencia negativa:** Indica que las variables varían en dirección opuesta y se representa con el signo negativo (-). Su representación gráfica se observa en la Figura 22.



Figura 22. Relación de influencia negativa.

### Ley de los signos

Los sistemas se componen varios ciclos causales que dan lugar a los lazos de realimentación, los cuales a su vez permiten comprender el funcionamiento y los cambios que sufren las variables. Sin embargo, como explica (Roberts et al., 1983), los ciclos causales pueden contener cualquier cantidad de variables, siempre que sean suficientes para para indicar lo que sucede dentro del sistema, pero sin que sean demasiados para evitar confusiones.

La ley de los signos permite distinguir entre un lazo de realimentación negativo y un lazo de realimentación positivo. (Pérez & Escobar, 2011) resume esta ley de la siguiente manera:

- Cuando sólo hay signos positivos, el lazo es de realimentación positivo.
- Número impar de signos negativos indica un lazo de realimentación negativo.
- Número par de signos negativos indica un lazo de realimentación positivo.

### Ejemplos

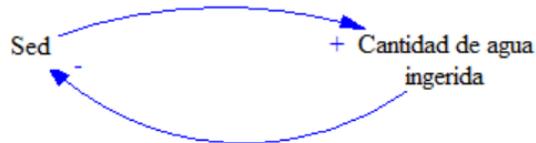
Los siguientes ejemplos tienen el objetivo de permitir una mejor comprensión acerca de los tipos de influencias y la ley de los signos que se observan en los diagramas de ciclo causal.

- **Ejemplo #1 – Dinámica de población:** La dinámica de población es un ejemplo clásico que permite comprender las relaciones de causa y efecto, sin embargo en este ejemplo sólo se tomarán en cuenta las variables de *nacimiento* y *población*. Se tiene que si aumenta la cantidad de nacimientos, aumentará la población y esto a su vez causará el aumento de nacimientos. Se observa que el diagrama

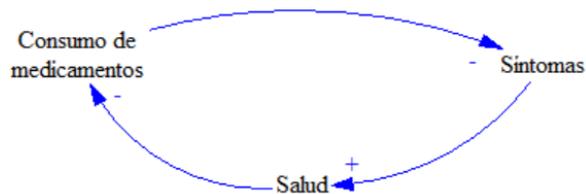
queda de la siguiente manera y que como sólo hay signos positivos, este corresponde a un lazo de realimentación positivo:



- **Ejemplo #2 – Nivel de sed versus cantidad de agua ingerida:** En este ejemplo se tienen las variables *sed* y *cantidad de agua ingerida*. Si aumenta la sed, aumentará la cantidad de agua ingerida, lo cual provocará la disminución de la sed. Se obtiene el diagrama mostrado a continuación y se observa que al haber cantidad impar de signos negativos corresponde a un lazo de realimentación negativo.



- **Ejemplo #3 – Consumo de medicamentos para tratar una enfermedad:** En este ejemplo se analizan las relaciones de causa y efecto de tres variables: *consumo de medicamentos*, *síntomas* y *salud*. El consumo de medicamentos disminuye los síntomas, lo que implica aumento del nivel de salud y este a su vez implica menor consumo de medicamentos. Se obtiene el diagrama a continuación y además se observa una cantidad par de signos negativos lo cual corresponde a un lazo de realimentación positivo.



**Importante:** Al nombrar las variables se debe evitar el uso de nombres que indiquen incremento o disminución de la variable.

## ***Diagramas de ciclo causal***

### **Ventajas y desventajas**

Los diagramas de causal son una herramienta para el estudio de los sistemas dinámicos porque permiten analizar el sistema desde el punto de vista de sus flujos.

- **Ventajas:** Los diagramas de ciclo causal presentan muchas ventajas que los convierten en una de las herramientas más utilizadas a la hora de estudiar sistemas dinámicos.
  - ✓ Identifican los principales ciclos de realimentación sin hacer distinción según la naturaleza de las variables interconectadas.
  - ✓ Presentan las relaciones de causa-efecto más importantes debidamente acopladas.
  - ✓ Sirven como esquemas preliminares acerca de la estructura del sistema.
  - ✓ Ayudan a comprender la forma en que la estructura del sistema provoca su comportamiento.
  - ✓ Simplifican la ilustración del sistema a modelar.
- **Desventajas:** Las principales desventajas de los ciclos causales surgen a partir de errores cometidos durante la graficación del diagrama, por lo que esto representa importantes desventajas a la hora de utilizar el diagrama como esquema preliminar para el diseño del modelo.
  - ✓ Puede dar lugar a que se incluyan relaciones de variables que realmente no explican nada sobre el comportamiento del sistema.
  - ✓ Existe la posibilidad de incluir causalidades redundantes que explican comportamientos que son explicados por otras relaciones causales.
  - ✓ Si no se analiza bien el sistema, existe la tendencia a hacer diagramas muy detallados para problemas muy simples, o bien, diagramas muy pequeños para situaciones complejas.

Como indica (Nicholson, 2005), los diagramas de ciclo causal facilitan la determinación de una hipótesis del comportamiento dinámico del sistema, así como permiten comunicar modelos mentales sobre el sistema en estudio.

## Propiedades

Las tres propiedades que caracterizan a los diagramas de ciclo causal, con base en las explicaciones de (Nicholson, 2005), son:

- **Causalidad:** Se refiere a la secuencia de los eventos, tal que la causa ocurre antes que el efecto y por tanto, la causa influye sobre el efecto. Es decir, se refiere a la estructura que causa un determinado comportamiento.
- **Correlación:** Se refiere al cambio de las variables en el tiempo, es decir el comportamiento del sistema.
- **Realimentación:** Es la propiedad más importante y se refiere a cuando las salidas son redirigidas como entradas, lo que implica intercambio de información.

## Ciclos de retroalimentación

### Retroalimentación positiva

Los ciclos de realimentación positiva son aquellos en los que el cambio de una variable se propaga en todo el ciclo, de modo que se refuerza el cambio inicial (Aracil, 2000). Esto implica el aumento o disminución de una de las variables y por lo tanto, crecimiento o colapso del sistema. En la Figura 23 se muestra la representación de un ciclo de realimentación positivo, en donde el símbolo dentro del ciclo representa un lazo de realimentación de refuerzo.

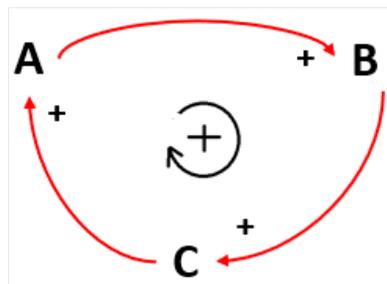


Figura 23. Ciclo de realimentación positivo.

Otro símbolo utilizado para representar los ciclos de realimentación positiva es el mostrado a continuación en la Figura 24:



Figura 24. Otro símbolo para representar ciclos de realimentación positiva.

### Realimentación negativa

Los ciclos de realimentación negativa son aquellos en los que el cambio de una variable se propaga en todo el ciclo, pero provoca que se contrarreste el cambio original (Aracil, 2000). Estos tipos de ciclos se caracterizan por tender al equilibrio. En la Figura 25 se muestra la representación de un ciclo de realimentación negativo, en donde el símbolo dentro del ciclo representa un lazo de realimentación de compensación.

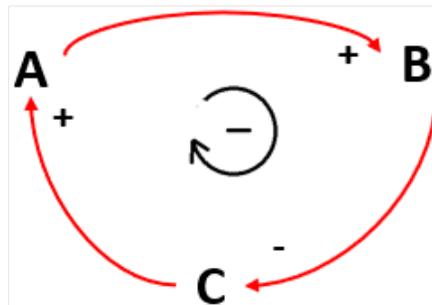


Figura 25. Ciclo de realimentación negativo.

El símbolo que se muestra a continuación en la Figura 26, también se utiliza para representar los ciclos de realimentación negativa:



Figura 26. Otro símbolo para representar los ciclos de realimentación negativa.

### Combinación de ciclos

La estructura de todo sistema dinámico no se compone solamente de un ciclo de realimentación, sino de una combinación de ciclos tanto positivos como negativos, como se observa en la Figura 27. Las interacciones que surgen de las relaciones entre la combinación de ciclos de realimentación determinan el comportamiento global del sistema (Aracil, 2000).

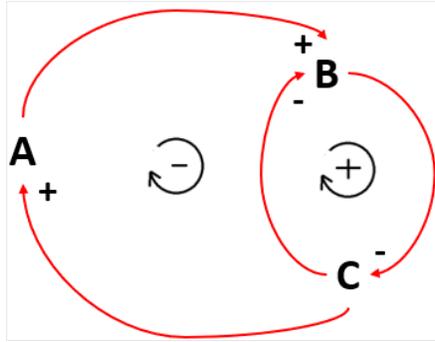


Figura 27. Representación de la combinación de ciclos causales.

### Dominancia

Como todo sistema se compone de varios ciclos causales positivos y negativos, el comportamiento del sistema será determinado por cuál de los bucles domina sobre el otro en cada momento (Aracil, 2000). Es decir, la dominancia de un ciclo sobre otro puede variar a lo largo del tiempo y esto es lo que convierte el sistema en uno dinámico. En este sentido, en un sistema puede dominar un ciclo de realimentación positivo en los estados iniciales, sin embargo al transcurrir el tiempo puede empezar a dominar el ciclo de realimentación negativo.

### Diversidad de comportamiento

La combinación de ciclos de realimentación produce una diversidad de comportamientos, sin embargo se pueden distinguir dos tipos de comportamientos de los sistemas en función del tipo de ciclo de realimentación: explosivo y depresivo. (Morlán, 2011) lo describe así:

- Un bucle de realimentación positivo tendrá un comportamiento **explosivo**, pues este tipo de bucle provoca que el sistema se desestabilice de forma exponencial.
- Un bucle de realimentación negativo tendrá un comportamiento **depresivo**, pues este tipo de bucle genera estabilidad en el sistema y por lo tanto, que este se acerque a un punto de equilibrio.

Sin embargo, cuando se trata de diagramas causales complejos en los que existe diversa cantidad de ciclos, es más difícil predecir el comportamiento total del sistema.

## Variables exógenas

Las variables exógenas son aquellas variables influyen en el comportamiento de dicho sistema, pero no sufren modificaciones por parte de este (Montero Bermúdez, 2012). En los diagramas de ciclo causal, este tipo de variables suponen valores independientes de los estados de otras variables del sistema, puesto que su comportamiento depende de otros factores que componen el ambiente del sistema.

## Graficación y análisis de sistemas de retroalimentación

### Patrones

Durante el estudio de los sistemas de realimentación es posible observar diversos patrones de comportamiento que surgen de los diferentes tipos de estructura que se pueden observar en los sistemas dinámicos. Como indica (“System Behavior and causal loop diagrams,” 2010), existen cuatro patrones de comportamiento que pueden observarse en los sistemas, ya se de forma individual o combinados. A continuación se definen estos patrones de comportamiento, con base en las explicaciones de (“System Behavior and causal loop diagrams,” 2010), y se muestran las gráficas para demostrar las características de cada patrón.

1. **Exponencial:** Sucede cuando cantidad inicial de una determinada variable, aumenta proporcionalmente con respecto a su variación en el tiempo. En la Figura 28 se observa la gráfica que caracteriza este tipo de patrón de comportamiento.

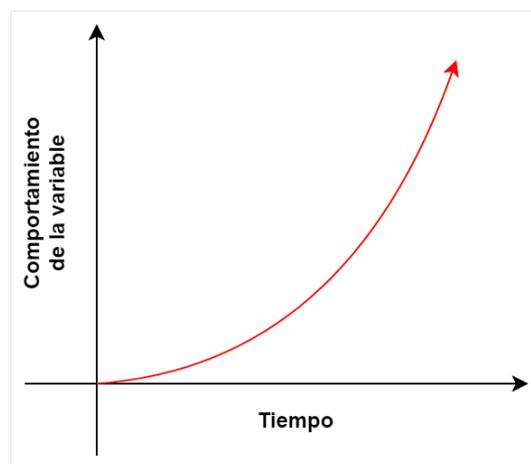


Figura 28. Patrón de comportamiento exponencial. – Tomado y adaptado de (“System Behavior and causal loop diagrams,” 2010).

2. **Orientado a una meta:** Se observa cuando una variable comienza a aumentar o disminuir arriba o debajo de una determinada meta y luego, a medida que pasa el tiempo, empieza a moverse hacia esa meta. Esta meta puede entenderse como un punto de equilibrio del sistema. En la Figura 29 se muestra la gráfica correspondiente a este comportamiento.

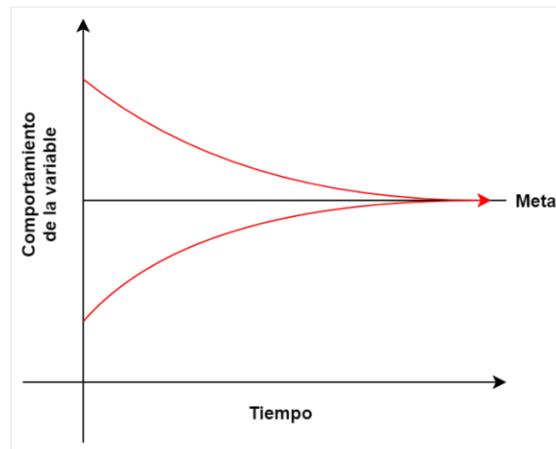


Figura 29. Patrón de comportamiento orientado a una meta. - Tomado y adaptado de ("System Behavior and causal loop diagrams," 2010).

3. **Forma de S:** Se observa un comportamiento de tipo exponencial al principio que luego pasa a ser orientado a una meta, lo que indica la nivelación de la variable. La Figura 30 muestra la gráfica correspondiente a este tipo de comportamiento.

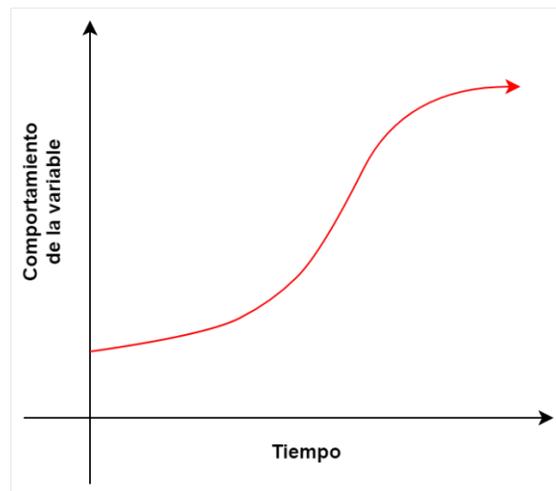


Figura 30. Patrón de comportamiento en forma de S. - Tomado y adaptado de ("System Behavior and causal loop diagrams," 2010).

4. **Oscilatorio:** Sucede cuando la variable de interés fluctúa alrededor de algún nivel. En la Figura 31 se observa la gráfica que caracteriza este tipo de comportamiento.

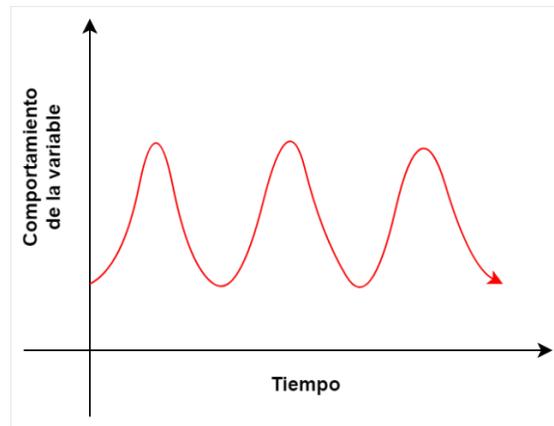


Figura 31. Patrón de comportamiento oscilatorio. - Tomado y adaptado de ("System Behavior and causal loop diagrams," 2010).

### Definición de tasas y niveles

Dentro de los diagramas de ciclo causal, existen dos tipos de variables: las tasas y los niveles. Estas se definen a continuación:

- **Niveles:** Estos representan acumulaciones e indican el estado del sistema por lo que también se denominan **variables de estado**. Como indica (Aracil, 2000), la evolución de este tipo de variables es de gran importancia para el estudio de los sistemas porque representan magnitudes acumuladas que resultan de acciones pasadas. Por este motivo, dentro de todo ciclo de realimentación debe haber al menos una variable de nivel.
- **Tasas:** Estas representan la variación de una variable de nivel, por lo que se puede entender como una variación en el estado del sistema (Aracil, 2000). A diferencia de los niveles, las tasas representan las acciones que tienen lugar en el sistema, que luego se acumulan en las variables de nivel.

La principal importancia de reconocer estos tipos de variables en los diagramas de ciclo causal recae en el hecho de que estos diagramas sirven como modelo para la creación de otro tipo de modelo denominado **diagrama de Forrester**, el cual representa de forma más explícita estos tipos de variables.

## Gráficos y ciclos causales

Los diagramas causales permiten representar las relaciones entre las variables de un sistema dinámico, cuya característica más importante son las variaciones en el tiempo. Basado en esto, a partir de los diagramas causales es posible obtener gráficos que permitan relacionar las variables con respecto al tiempo. Los gráficos mostrados en los patrones de comportamiento de los sistemas, representan los gráficos que se pueden obtener a partir de los diagramas de ciclo causal.

Un ejemplo de esto, es descrito por (Morlán, 2011), el cual representa un diagrama causal en el caso de la regulación de temperatura de una ducha. En la Figura 32 se observa el diagrama causal para este caso:

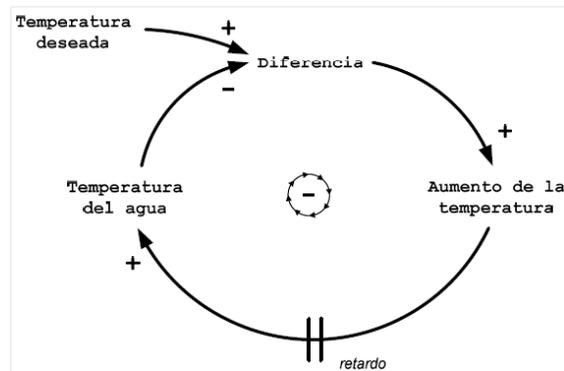


Figura 32. Diagrama causal que representa la regulación de temperatura de una ducha. - Tomado de (Morlán, 2011).

A continuación en la Figura 33, se muestra el gráfico que representa la relación entre la *Temperatura deseada* y la *Temperatura del agua* con respecto al tiempo. Se puede observar el patrón de comportamiento oscilatorio que tiende hacia un punto de equilibrio, lo que significa una combinación de patrones de comportamiento.

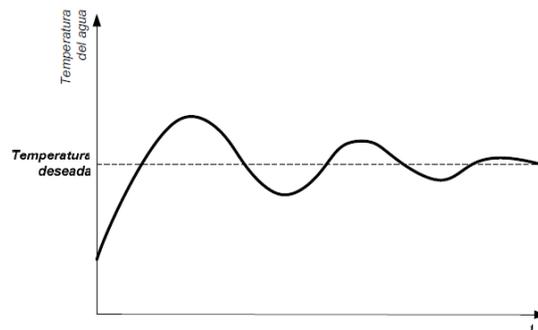
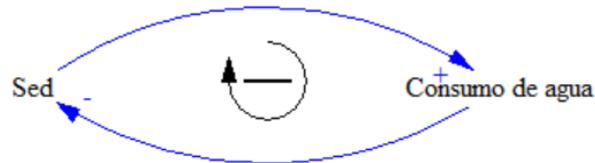


Figura 33. Gráfico que representa el comportamiento de las variables de la Figura 32 con respecto al tiempo. - Tomado de (Morlán, 2011).

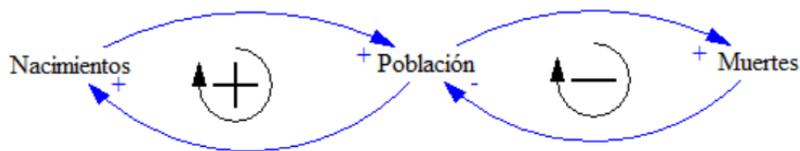
## Ejemplos

Los ejemplos presentados se basan en ejemplos propuestos anteriormente, sin embargo se incluye el tipo de ciclo de realimentación para lograr una mejor comprensión de este tema. Además, se proponen dos ejemplos adicionales: uno donde se incluyen variables exógenas y otro en el que hay una combinación de ciclos causales.

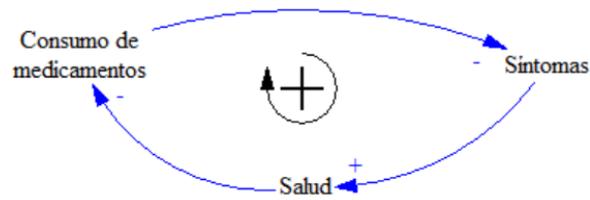
- **Ejemplo #1 – Nivel de sed versus cantidad de agua ingerida:** En este ejemplo sencillo se observa que hay un ciclo de realimentación negativo, ya que hay cantidad impar de signos negativos. Para este ejemplo se entiende que: La sed aumenta (+) el consumo de agua. El consumo de agua disminuye (-) la sed.



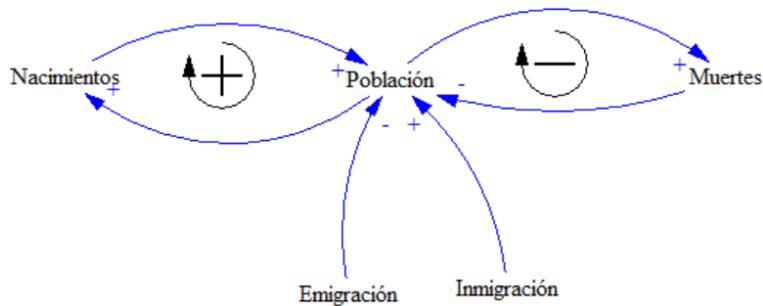
- **Ejemplo #2 – Dinámica de población:** Esta vez, a este ejemplo clásico se le agrega otra variable, además de las variables de *nacimientos* y *población*. Se observa que hay dos bucles de realimentación: uno positivo y uno negativo. Para este ejemplo se puede decir que: Los nacimientos aumentan (+) la población. La población aumenta (+) las muertes. Las muertes disminuyen (-) la población. La población aumenta (+) los nacimientos.



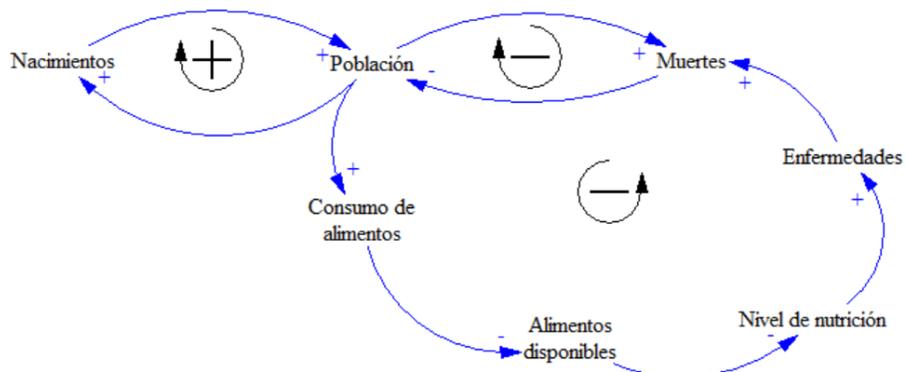
- **Ejemplo #3 – Consumo de medicamentos para tratar una enfermedad:** Para este caso, el diagrama muestra que existe una cantidad par de signos negativos, por lo cual se concluye que es un ciclo de realimentación positivo. Sobre este ejemplo se puede especificar que: El consumo de medicamentos disminuye (-) los síntomas. La disminución de los síntomas aumenta (+) la salud. La salud disminuye (-) el consumo de medicamentos.



- Ejemplo #4 – Dinámica de población con variables exógenas:** Tomando como base el Ejemplo #2, al diagrama se le pueden agregar variables exógenas que, como se ha explicado en este capítulo, influyen en el comportamiento del sistema pero no son influenciadas por este. Para este ejemplo se puede decir que: Los nacimientos aumentan (+) la población. La población aumenta (+) las muertes. Las muertes disminuyen (-) la población. La población aumenta (+) los nacimientos. La inmigración aumenta (+) la población. La emigración disminuye (-) la población.



- Ejemplo #5 – Dinámica de población con combinación de ciclos causales:** Este ejemplo pretende agregar otros ciclos causales a la dinámica de población en un caso hipotético en el que la población de un determinado lugar cuente con una determinada cantidad de alimentos disponibles. Se obtiene el siguiente diagrama:



Sobre este ejemplo se puede indicar lo siguiente: Los nacimientos aumentan (+) la población. La población aumenta (+) las muertes. Las muertes disminuyen (-) la población. La población aumenta (+) los nacimientos. La población aumenta (+) el consumo de alimentos. El consumo de alimentos disminuye (-) los alimentos disponibles. La disminución de alimentos disponibles disminuye (-) el nivel de nutrición. La disminución del nivel de nutrición aumenta (+) las enfermedades. Las enfermedades aumentan (+) las muertes. La inmigración aumenta (+) la población. La emigración disminuye (-) la población.

Además se pueden identificar tres ciclos de realimentación, los cuales se indican a continuación a través de los nombres de las variables:

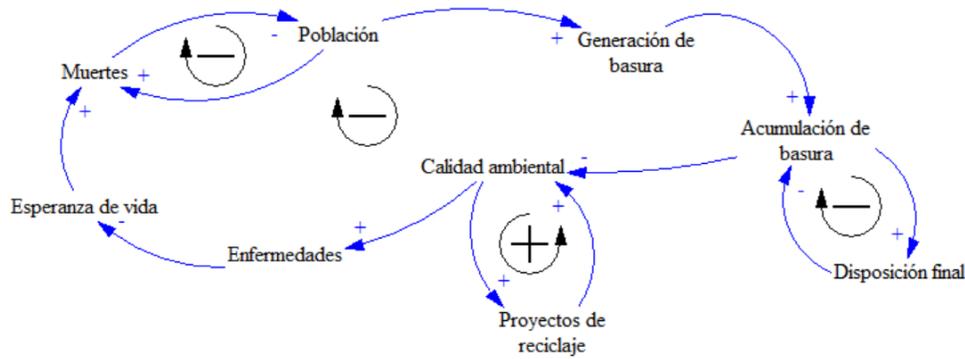
- 1) Nacimientos → Población → Nacimientos= ciclo de realimentación positivo porque sólo hay signos positivos.
- 2) Población → Muertes → Población= ciclo de realimentación negativo porque hay cantidad impar de signos negativos.
- 3) Población → Consumo de alimentos → Alimentos disponibles → Nivel de nutrición → Enfermedades → Muertes → Población= ciclo de realimentación porque hay cantidad impar de signos negativos.

### ***Ejercicios de creación de modelos***

Los ejercicios propuestos a continuación pretenden servir como guía en el uso de los diagramas de ciclo causal como un tipo de modelo para el estudio de sistemas dinámicos.

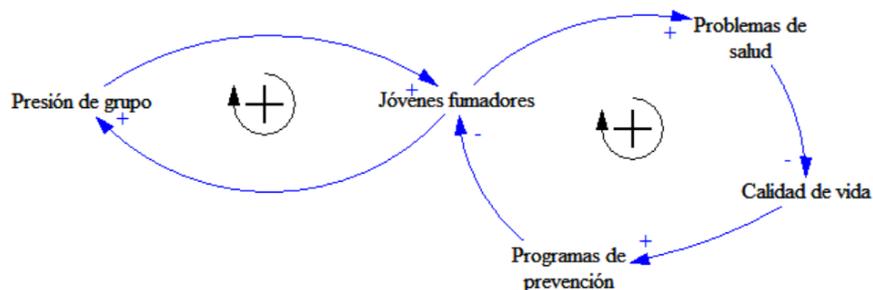
- **Ejercicio #1:** Crear un modelo que muestre las relaciones causales de la generación de basura por una determinada población, utilizando las variables indicadas. Para cada ciclo de realimentación que surja dentro del sistema, indicar el tipo de realimentación así como las variables que pertenecen al ciclo. Las variables del sistema son las siguientes: *población, muertes, esperanza de vida, enfermedades, calidad ambiental, generación de basura, acumulación de basura, disposición final* y *proyectos de reciclaje*.

**Solución:** El diagrama causal sería el siguiente:



Como se pide indicar las variables que forman parte de los ciclos de realimentación del sistema, estos se indican a continuación:

- Población → Muertes → Población= ciclo de realimentación negativo.
  - Población → Generación de basura → Acumulación de basura → Calidad ambiental → Enfermedades → Esperanza de vida → Muertes → Población= ciclo de realimentación negativo.
  - Acumulación de basura → Disposición final → Acumulación de basura= ciclo de realimentación negativo.
  - Calidad ambiental → Proyectos de reciclaje → Calidad ambiental= ciclo de realimentación positivo.
- Ejercicio #2:** En algunos casos, los jóvenes empiezan a fumar debido a la presión de grupo. Tomando esto en cuenta, crear un modelo que muestre las relaciones causales de las variables que forman parte de este sistema e indicar los ciclos de realimentación y las variables que componen cada uno de estos.



**Solución:** En este caso, el problema no indica las variables que forman parte del sistema, por lo que estas dependerán del estudio realizado por el analizador del

sistema. En este sentido, el siguiente diagrama puede ser una forma de representar este sistema:

A continuación se indican los ciclos de realimentación con sus respectivas variables:

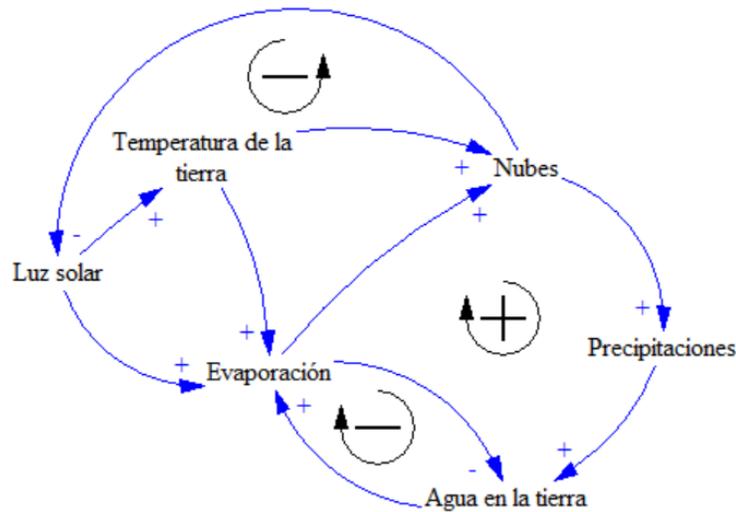
- a) Presión de grupo → Jóvenes fumadores → Presión de grupo= ciclo de realimentación positivo.
- b) Jóvenes fumadores → Problemas de salud → Calidad de vida → Programas de prevención → Jóvenes fumadores= ciclo de realimentación positivo.

### ***Desarrollo de casos***

Los siguientes casos de aplicación pretenden afianzar los conceptos aprendidos durante el capítulo. Estos casos son una adaptación de ejemplos propuestos por (Roberts et al., 1983) y para cada uno de ellos se debe obtener el diagrama de ciclo causal e indicar las variables que forman parte de los ciclo de realimentación obtenidos en el diagrama.

- **Caso #1 – Autorregulación de la biosfera:** La biosfera es una de las capas que rodea la tierra y se compone de la suma de todos los ecosistemas. Uno de los sistemas que componen la biosfera es el que regula el balance de agua en la tierra y un resumen del funcionamiento de este sistema es el siguiente: La evaporación del agua de los océanos debido a la incidencia de luz solar genera una serie de eventos que regulan la cantidad de agua en la tierra. El vapor que resulta de la evaporación se eleva y forma las nubes que posteriormente generan precipitaciones. Las nubes empiezan a desaparecer mientras que el sol continúa formando nubes. Este sistema no sólo contribuye a la regulación de la cantidad de agua, sino que también regula la temperatura de la tierra. Para que esto suceda, el sol calienta la tierra lo que incrementa la evaporación y formación de nubes. Mientras haya más nubes en el cielo, menos cantidad de calor del sol alcanzará la tierra. Cuando hay un descenso de la temperatura, las nubes liberan agua y desaparecen. Luego, la luz del sol incide sobre la tierra e inicia el ciclo nuevamente.

**Solución:** Con base en la descripción del sistema de autorregulación de la biosfera, se obtiene el siguiente diagrama de ciclo causal:

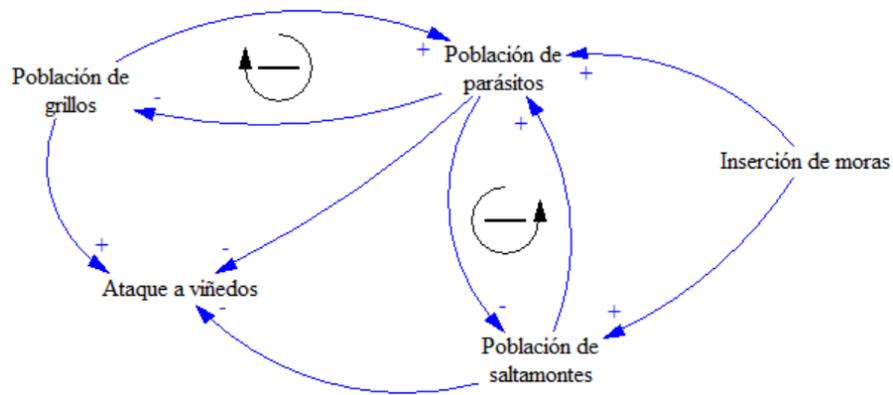


Los ciclos de realimentación con sus respectivas variables son:

- Luz solar → Evaporación → Nubes → Luz solar= ciclo de realimentación negativo.
  - Evaporación → Nubes → Precipitaciones → Agua en la tierra → Evaporación= ciclo de realimentación positivo.
  - Evaporación → Agua en la tierra → Evaporación= ciclo de realimentación negativo.
- **Caso #2 – Daños a viñedos por el grillo de la uva:** Una especie de grillo conocido como grillo de la uva causó daños en los viñedos de un determinado lugar. La población de grillos disminuyó debido al ataque de un parásito natural, por lo que la fuente de alimentos de los parásitos se redujo debido a la reducción de la población de grillos. Al disminuir la población del parásito, inició nuevamente el aumento de la población de grillos, que contribuyó al aumento de la población de parásitos, de manera que este ciclo se repite. Además de esto, los viticultores saben que el parásito de los grillos también se alimenta de una especie de saltamontes que no implica riesgo de daños en los viñedos, pues estos se alimentan de moras. Sabiendo esta información, los viticultores decidieron sembrar pequeñas cantidad de moras en los viñedos, de manera que se establezca

una población considerable de parásitos que permita controlar la población de grillos de la uva.

**Solución:** La descripción del sistema permite obtener el siguiente diagrama causal:



Los ciclos de realimentación con sus respectivas variables son los siguientes:

- Población de grillos → Población de parásitos → Población de grillos= ciclo de realimentación.
- Población de parásitos → Población de saltamontes → Población de parásitos= ciclo de realimentación negativo.

## Capítulo IV: Diagramas de Flujos Dinámicos

### ***Introducción***

En el capítulo anterior se describieron diferentes conceptos relacionados al desarrollo de modelos a través de la herramienta denominada diagramas de ciclo causal, además de que se propusieron diversos ejemplos y problemas para ampliar la explicación expuesta a lo largo del capítulo. Sin embargo, dentro del estudio de la Ingeniería de Sistemas Dinámicos existe otra herramienta que diferencia más explícitamente las variables que forman parte del sistema. Con base en esto, los diagramas de ciclo son modelos conceptuales o cualitativos que funcionan como base para la elaboración de los diagramas de flujo dinámico.

Los diagramas de flujo dinámico, también denominados **diagramas de Forrester**, son representaciones gráficas de modelos cuantitativos que permiten realizar simulaciones del sistema y así obtener las ecuaciones matemáticas que determinan el comportamiento de este (Morlán, 2011). Este tipo de diagrama es más específico que los diagramas de ciclo causal, pues su simbología permite diferenciar entre los tipos de variables que conforman el sistema.

### ***Tipos de variables y símbolos para diagramas de flujo dinámico***

#### **Niveles**

Las variables de nivel representan cantidades que acumulan resultados de acciones pasadas, por lo que definen el estado del sistema (Aracil, 2000). Los niveles acumulan materiales a través del tiempo, lo que implica que su evolución es relevante para el estudio del sistema. Cabe destacar que los niveles cambian en función de las variaciones de los flujos o en algunos casos, de las variables auxiliares (Caro, Goyhenecha, Moscoso, & Sepúlveda, 2006). El símbolo que representa a una variable de nivel se observa en la Figura 34.

#### **Flujos o ratas**

Las variables de flujo representan el cambio de las variables de nivel a través del tiempo, por lo que esto puede entenderse como un cambio en el estado del sistema (De Mata, Dormido, & Morilla, 2005). Los flujos definen el comportamiento del sistema porque

indican la velocidad del flujo de material, lo cual tienen lugar de acuerdo con un conjunto de ecuaciones asociadas (Caro et al., 2006). Tal como indica (Aracil, 2000), las variables de flujo sólo reciben como entrada a las variables de nivel y a las variables auxiliares, y como salida proporciona el flujo que alimenta a una variable de nivel. El símbolo que representa a una variable de flujo se muestra en la Figura 35. Se pueden distinguir dos tipos de flujos o canales y a continuación se describen con base en las definiciones de (De Mata et al., 2005):

- 1. Flujo de material:** Es un canal a través del cual se transmite una magnitud física que se conserva. El símbolo para representarlo se observa en la Figura 36.
- 2. Flujo de información:** Es un canal a través del cual se transmite alguna información que no es necesario que se conserve. El símbolo para representarlo se observa en la Figura 37.

### **Variables auxiliares**

Una variable auxiliar es una cantidad con una determinada representación física en el mundo real (De Mata et al., 2005). Este tipo de variables son dependientes e implican pasos intermedios que simplifican el proceso del cálculo de funciones asociadas a los flujos o bien, determinan el comportamiento de una variable de nivel (Caro et al., 2006). He aquí la importancia de las variables auxiliares, pues como indica (Morlán, 2011), estas se utilizan para transformar ecuaciones complejas en ecuaciones más sencillas y así facilitar la comprensión del funcionamiento del modelo. Además, es importante indicar que las variables auxiliares reciben como entrada la información de otras variables y la salida que proveen sirve como entrada de otra variable auxiliar o de una variable de flujo. En la Figura 38 se muestra el símbolo que representa a una variable auxiliar.

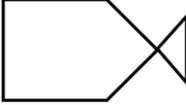
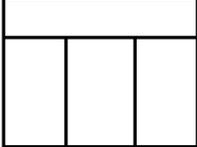
### **Constantes**

Las constantes o parámetros son elementos que representan valores fijos del sistema (Caro et al., 2006) y por lo tanto, su valor numérico no cambia durante las corridas de simulación del modelo (De Mata et al., 2005). El símbolo que representa a una constante se observa en la Figura 39.

## Retrasos

Los retrasos son elementos que simbolizan demoras en la transmisión a través de los flujos de material o de información (De Mata et al., 2005). La principal función de este elemento dentro del modelo es proporcionar una mayor descripción del sistema, pues simplemente representa los elementos que provocan el retraso (Caro et al., 2006). El símbolo que representa a un retraso se muestra en la Figura 40.

En la siguiente tabla se resumen los símbolos para diagramas de flujo dinámico descritos anteriormente con sus respectivas figuras:

<b>Símbolos para diagramas de flujo dinámico</b>	
<b>Nivel</b>	 <p><i>Figura 34. Símbolo de Nivel.</i></p>
<b>Flujo</b>	 <p><i>Figura 35. Símbolo de Flujo.</i></p>
<b>Flujo de material</b>	 <p><i>Figura 36. Símbolo de Flujo de material.</i></p>
<b>Flujo de información</b>	 <p><i>Figura 37. Símbolo de Flujo de información.</i></p>
<b>Variable auxiliar</b>	 <p><i>Figura 38. Símbolo de Variable auxiliar.</i></p>
<b>Constante</b>	 <p><i>Figura 39. Símbolo de Constante.</i></p>
<b>Retraso</b>	 <p><i>Figura 40. Símbolo de Retraso.</i></p>

## ***Estructuras de sistemas dinámicos***

### **Ciclo de retroalimentación**

Dentro de los ciclos de realimentación de un sistema ocurre cada toma de decisión y esta, a su vez, altera a las variables de nivel que influyen en la toma de decisiones. Por ello, los ciclos de realimentación son el elemento básico de la estructura de los sistemas y el comportamiento dinámico de estos sistemas es producido por la realimentación.

### **Niveles y ratas**

Los ciclos de realimentación se componen de dos subestructuras básicas: las variables de nivel y las variables de flujo. Las variables de nivel representan el estado del sistema, mientras que las variables de flujo representan acciones, por lo que ambos tipos de variables son necesarias para el funcionamiento del sistema. Es importante recalcar que:

1. Las variables de nivel integran a las variables de flujo, además de que crean continuidad en el sistema entre intervalos de tiempo.
2. Las variables de nivel sólo pueden ser modificadas por variables de flujo.
3. Una variable de flujo no puede controlar a otra de su mismo tipo sin la intervención de una variable de nivel, por lo que los flujos sólo dependen de los niveles y de las constantes.
4. Como las variables de nivel representan el estado del sistema, sólo estas son necesarias para describir de forma completa la condición del sistema.

### **Definiciones**

#### **Identificación de niveles y ratas**

Como explica (Barlas, 2002), una manera fácil de identificar las variables de nivel y de flujo. En el caso de los niveles, se debe determinar cuáles variables persisten si imaginamos que el tiempo se detiene, pues los niveles estarán debidamente definidos incluso cuando no existe el tiempo debido a que son cantidades acumuladas. Un ejemplo de variable de nivel es la población, puesto que sus niveles persisten, sin embargo si se detienen sus flujos entonces no habría más nacimientos.

En el caso de las variables de flujo o ratas, se debe tomar en cuenta a las unidades de medición de las variables de nivel, ya que los flujos de los niveles se miden en función

del tiempo. Por ejemplo, en el caso de la variable de nivel de la población, la unidad de medición sería *personas*, por lo que los flujos de esa variable podría ser *personas/año*. Es decir, los flujos se miden en *unidades/periodo de tiempo*, lo que implica que los flujos permanecen indefinidos con el paso del tiempo.

Es importante recalcar que no todas las variables que pasan las condiciones anteriores serán modeladas como niveles, por el contrario, muchas pueden ser modeladas como variables auxiliares. Sin embargo, se debe recordar que para toda variable de nivel se debe modelar su respectiva variable de flujo.

### ***Elementos genéricos de una estructura de retroalimentación de un modelo de un sistema dinámico***

#### **Integración gráfica para estimar comportamiento**

A partir de las variables de nivel es posible inferir el comportamiento de las variables de flujo, ya que desde un punto de vista matemático los niveles integran a los flujos. Como la relación entre los niveles y los flujos es directa, no es estrictamente necesario utilizar matemáticas para analizar el comportamiento de un sistema, pues existe el proceso conocido como **integración gráfica** el cual consiste en evaluar el área a partir de una gráfica de flujo.

- **Flujos exógenos**

Un flujo exógeno es aquella variable de flujo que no puede ser modificada por el sistema al cual pertenece, es decir, no depende de ninguna variable de nivel (Oh, 1995). Cuando se trata de flujo exógenos constantes, fácilmente se puede estimar el comportamiento del sistema, ya que si el flujo entrante es constante y positivo entonces el nivel se **incrementará** de forma lineal y la pendiente del nivel será positiva. En la Figura 41 se observa un ejemplo de una gráfica de flujo constante positivo y en la Figura 42 se muestra su correspondiente gráfica de nivel.

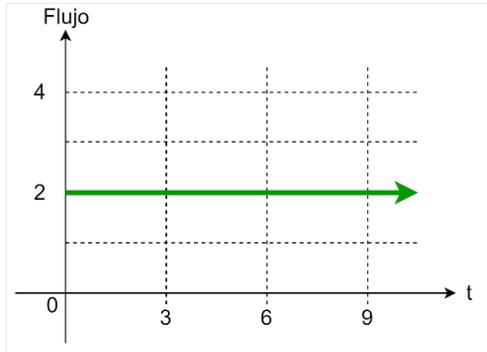


Figura 41. Gráfica de flujo constante positivo. - Adaptado de (Oh, 1995).

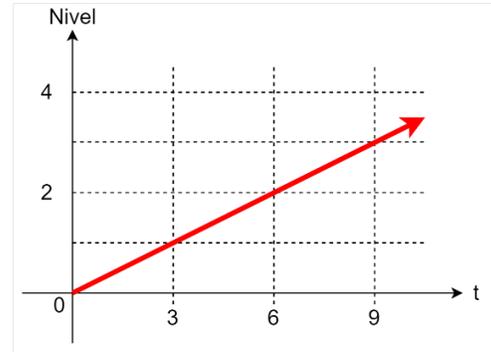


Figura 42. Gráfica de nivel que incrementa linealmente. - Adaptado de (Oh, 1995).

De lo contrario, si el flujo entrante es igual a cero y existe un flujo saliente con valor positivo, entonces el nivel se **decrementará** de forma lineal y la pendiente del nivel será negativa. En este sentido, se puede decir que la pendiente del nivel corresponde al valor del flujo (Agatstein & Breierova, 1996). En la Figura 43 se observa un ejemplo de una gráfica de flujo constante negativo y en la Figura 44 su correspondiente gráfica de nivel.

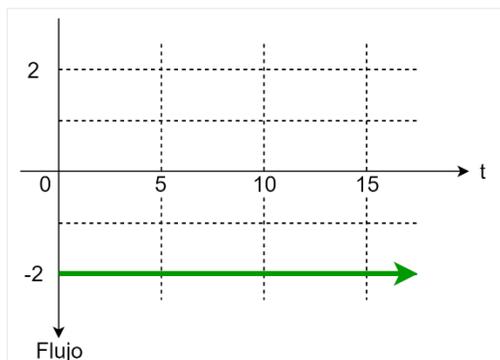


Figura 43. Gráfica de flujo constante negativo. - Adaptado de (Oh, 1995).

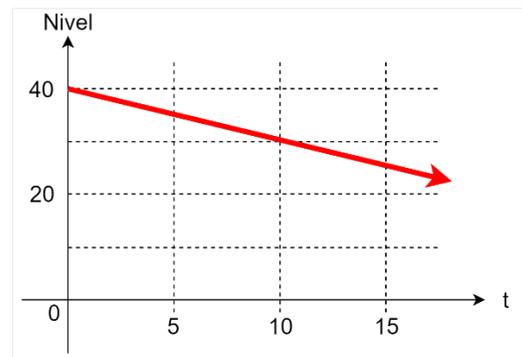


Figura 44. Gráfica de nivel que decrecienta linealmente. - Adaptado de (Oh, 1995).

- **Función step**

Este tipo de función, también denominada función escalón, definen el comportamiento de una variable de flujo exógena que varía con el tiempo. En la función step se observa que esta comienza con un flujo cuyo valor es constante y posteriormente **incrementa o decrecienta** a otro flujo cuyo valor es constante, formando así *escalones* (Oh, 1995). A partir de esto, el comportamiento del nivel será constante hasta el primer escalón y luego irá formando pendientes positivas o negativas, dependiente del comportamiento del flujo exógeno. En la Figura 45 se muestra un ejemplo de una gráfica de flujo definido por una función step y en la Figura 46 se observa su correspondiente gráfica de nivel.

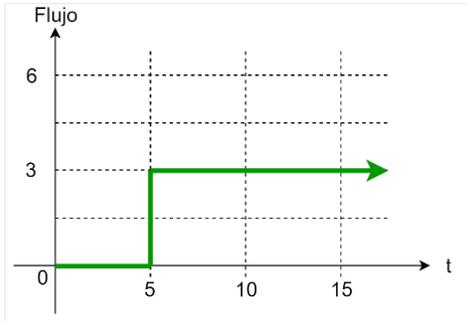


Figura 45. Gráfica de flujo definido por una función step. - Adaptado de (Oh, 1995).

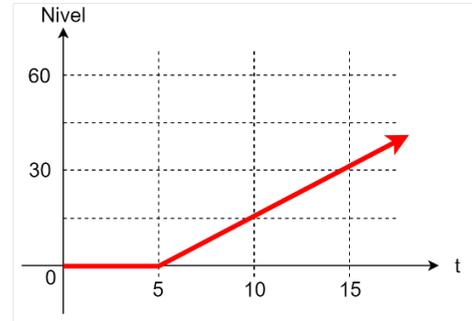


Figura 46. Gráfica de nivel resultante de una función step. - Adaptado de (Oh, 1995).

- **Funciones rampa**

Las funciones rampa se refiere a flujos cuyo comportamiento es **linealmente creciente o decreciente**, lo que quiere decir que no es constante a través del tiempo (Agatstein & Breierova, 1996). Cuando el flujo es positivo y tiene un comportamiento linealmente creciente, el nivel crece exponencialmente; análogamente, cuando el flujo es negativo y tiene un comportamiento linealmente decreciente, el nivel decrece exponencialmente (Schaffernicht, 2006). Como indica (Agatstein & Breierova, 1996), el cálculo del área entre la gráfica del flujo y la línea que corresponde a un flujo igual a cero, es importante para la integración gráfica porque facilita el cálculo del valor final del nivel, el cual se obtiene sumando el valor inicial del nivel con el valor obtenido del cálculo del área total de la gráfica de flujo. En la Figura 47 se muestra una gráfica de flujo positivo que crece linealmente y en la Figura 48 su correspondiente gráfica de nivel con crecimiento exponencial, mientras que en la Figura 49 se observa una gráfica de flujo negativo que decrece linealmente y en la Figura 50 se muestra su correspondiente gráfica de nivel con decrecimiento exponencial.

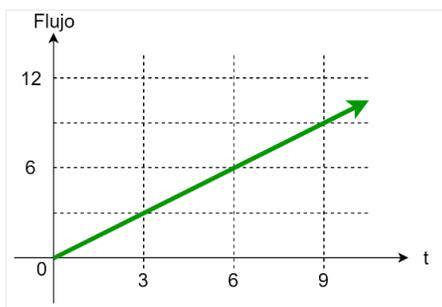


Figura 47. Gráfica de flujo positivo linealmente creciente. - Adaptado de (Agatstein & Breierova, 1996).

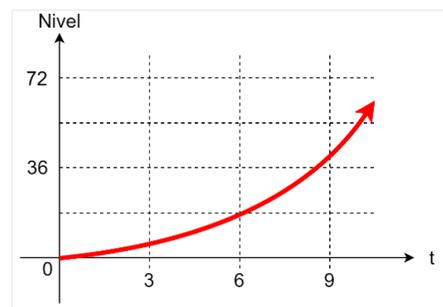


Figura 48. Gráfica de nivel que crece exponencialmente. - Adaptado de (Agatstein & Breierova, 1996).

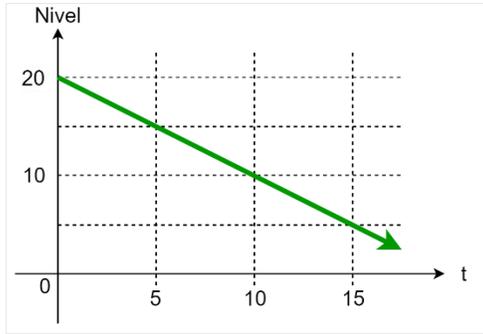


Figura 49. Gráfica de flujo negativo linealmente decreciente. - Adaptado de (Agatstein & Breierova, 1996).

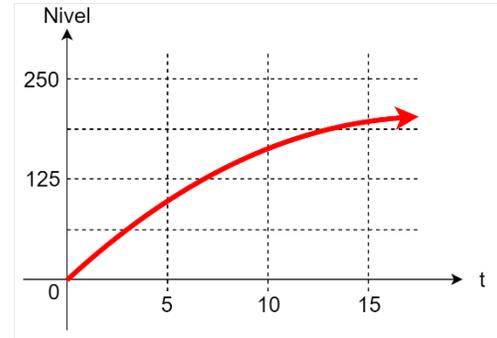


Figura 50. Gráfica de nivel que decrece exponencialmente. - Adaptado de (Agatstein & Breierova, 1996).

## Redes (Secuencia Rata – Nivel)

Un factor importante dentro de los modelos es que cada nivel tiene su variable de flujo, por lo que conforme se adicionen más **secuencias flujo – nivel**, la dinámica del modelo se modificará y será más compleja (Barlas, 2002). El conjunto de secuencias flujo – nivel se denominan **redes**, por lo que analizar y hacer pruebas con el modelo se convertirá en un proceso más complejo debido a que estas secuencias agregan una mayor escala de complejidad al modelo.

## Sistemas de Ecuaciones

### Periodos de tiempo

La principal característica de los sistemas dinámicos es su evolución a través del tiempo y por esta razón, las variables que describen el comportamiento el sistema están definidas en función del tiempo. Basado en este principio, se puede decir que todo sistema dinámico se compone de un conjunto que contiene todos los valores del tiempo  $t$  en los que pueden evaluarse las variables del sistema.

### Ecuaciones

- **De nivel**

La siguiente ecuación representa la evolución de una variable de nivel (Aracil, 2000):

$$N(t) = N(t_0) + \int_{t_0}^t (FE(t) - FS(t))dt,$$

donde  $N(t)$  es el nivel, al cual se le asocia un flujo de entrada  $FE(t)$  y un flujo de salida  $FS(t)$ . Se debe recordar que debido a que los niveles acumulan a los flujos, los niveles son la integración de sus flujos.

- **De rata**

Como los niveles son integración de los flujos, los flujos entonces son la derivación de los niveles, por lo que la siguiente expresión representa a una variable de flujo (Morlán, 2011):

$$\frac{d(N(t))}{dt} = FE(t) - FS(t)$$

- **Auxiliares**

Como las variables auxiliares son dependientes, estas se utilizan dentro de las ecuaciones de flujo para simplificar el cálculo las variables de flujo. Por otro lado, muchas veces influyen en el estado del sistema debido a que pueden influir sobre una variable de nivel.

- **Constantes**

Al igual que las variables auxiliares, las constantes pueden influir sobre las variables de flujo y de nivel, por lo que las constantes se incluyen en las ecuaciones de flujo y de nivel.

### ***Conceptualización de una situación determinada***

La conceptualización de una situación consiste en lograr una representación simplificada del problema que se pretende analizar, de modo que el modelo muestre los aspectos más relevantes del sistema. Para ello se necesita de una definición concreta del problema y definir cuál será el propósito del modelo.

Es importante determinar los límites del estudio, así como analizar cuáles serán las variables que se tomarán en cuenta. En este punto, es elemental determinar los elementos que forman parte de la descripción del problema y establecer las influencias que estos elementos provocan sobre el sistema (Aracil & Gordillo, 1997).

## ***Metodología para el desarrollo de un proyecto de modelización y análisis de sistemas***

Una serie de pasos son necesarios para el desarrollo de proyectos de modelización y análisis de sistemas, los cuales pueden variar dependiendo de la naturaleza del problema y a continuación se describen estos pasos con base en las explicaciones de (Barlas, 2002):

- 1. Identificar y definir el problema:** El problema a estudiar debe tener dos características esenciales: ser dinámico y presentar realimentación. Se pueden identificar problemas con estas dos características a partir de gráficas de datos o de información acerca de las cualidades de este.
- 2. Establecer una hipótesis dinámica y conceptualizar el modelo:** Desarrollar una teoría que describa las causas del comportamiento dinámico del problema, es decir, un modelo conceptual que describa la hipótesis para su posterior comprobación. Para ello se requiere:
  - a) Examinar el problema real.
  - b) Listar todas las variables que crean el comportamiento dinámico del sistema.
  - c) Identificar las relaciones de causa y efecto y los ciclos de realimentación entre esas variables.
  - d) Construir un diagrama de ciclo causal inicial e indagar diferentes alternativas de hipótesis.
  - e) Agregar o quitar variables según sea necesario con el fin de perfeccionar el diagrama.
  - f) Identificar las principales variables de nivel y de flujo.
  - g) Concluir la hipótesis dinámica como una base concreta para la construcción formal del modelo.
- 3. Construir el modelo formal:** Crear el modelo que será utilizado para la simulación. Para ello es necesario:
  - a) Construir la estructura del modelo a través del diagrama de flujo dinámico.
  - b) Determinar las ecuaciones que describen las relaciones de causa y efecto de las variables.

- c) Establecer los valores numéricos de los parámetros y los valores iniciales de las variables de nivel.
  - d) Verificar la consistencia del modelo a través de pruebas.
4. **Probar la credibilidad del modelo:** Validar el modelo con base en dos aspectos:  
1) Si la estructura del modelo es una descripción representativa de las relaciones reales que existen en el problema en estudio y 2) Si los patrones de comportamiento dinámico que genera el modelo son equivalentes a los generados por el sistema real.
  5. **Analizar el modelo:** Comprender las propiedades dinámicas del modelo, a través de experimentos de simulación. Las corridas de simulación proveen información acerca de las propiedades del modelo y esta información puede ser comparada con datos reales.
  6. **Diseñar mejoras:** Buscar políticas alternativas que permitan perfeccionar la dinámica del modelo y luego probarlas a través de la simulación.
  7. **Implementar:** Este es el objetivo final, ya que se busca obtener mejoras sustentables para el sistema o problema en estudio.

### ***Simulación en computador***

El proceso de simulación consiste en utilizar un modelo de un sistema real y realizar experimentos con este, con el fin de obtener datos que permitan analizar el comportamiento del sistema y así establecer estrategias para el funcionamiento de este (Tarifa, 1988). Como indica (Barlas, 2002), al igual que la estructura de un sistema opera a través del tiempo, un modelo opera a través de un tiempo simulado, siendo esto lo que permite hacer predicciones sobre el sistema real.

La simulación por computadora permite procesar un modelo simbólico, el cual está en esencia conformado por un sistema de ecuaciones (Aracil, 2000) y para ello se requiere de lenguajes de programación adecuados y específicos para este proceso, de modo que se puedan obtener datos válidos. Como ejemplo de herramientas para realizar simulaciones se pueden mencionar: DYNAMO, STELLA, Arena, Vensim, MATLAB, entre otros.

### ***Comportamiento del modelo***

El comportamiento del modelo es el resultado obtenido de las simulaciones (Aracil & Gordillo, 1997). En otras palabras, los datos resultantes de las corridas de simulación por computadora permiten hacer comparaciones con los datos del sistema real y así hacer comparaciones y predicciones. La principal característica es que, debido a que tanto el modelo como el sistema real operan a través del tiempo, el comportamiento expone la naturaleza dinámica del modelo (Barlas, 2002). Por lo tanto, el comportamiento del modelo es un aspecto esencial que permite constatar que efectivamente el modelo representa al sistema real.

### ***Definición de escenarios***

Una vez se ha validado el modelo es conveniente definir diferentes escenarios para ser sometidos al proceso de simulación, con el fin de estudiar las estrategias que se pretenden implementar en el funcionamiento del sistema (Schaffernicht, 2006). Un escenario es una descripción de una situación basada en la conceptualización de futuros estados del sistema (De Leon, 2012), por lo que una concreta delimitación del sistema es un factor imprescindible.

Como indica (Gutman, 1995), la definición de escenarios es una fase importante en la validación de modelos, debido a que desde un punto de vista práctico, es una herramienta que permite investigar situaciones en las que un conocimiento limitado no posibilita la construcción de modelos detallados. Por ello, (Rasmussen, 2011) sugiere el uso de escenarios cuando se presentan las siguientes condiciones: complejidad, incertidumbre, necesidad de perspectivas a corto y largo plazo y disponibilidad de recursos y responsabilidad para poder transformar el sistema en estudio.

### ***Análisis de resultados***

El análisis de resultados es una de las fases del proceso de modelización en la que los datos obtenidos de las simulaciones del modelo son recopilados ya sea en textos o gráficos, para posteriormente ser analizados a través de métodos estadísticos (Bernd & Mandar, 2014). La estadística descriptiva es una herramienta fundamental en este proceso, pues provee la información necesaria para comprender el comportamiento del sistema basado en los escenarios simulados, de modo que se puedan hacer

predicciones sobre el comportamiento futuro del sistema real y tomar decisiones acerca de las estrategias adecuadas a aplicar.

### **Ejercicios prácticos**

A continuación, se presenta un ejemplo desarrollado a través del programa de simulación Vensim, con el objetivo de que funcione como base para el desarrollo de otros ejemplos de aplicación basados en sistemas reales:

**Enunciado:** Un estudiante de la Facultad de Sistemas Computacionales de la UTP desea iniciar un pequeño negocio de venta de pizza. Para obtener la mercancía, el estudiante debe realizar una **inversión**, por lo que este será el flujo de entrada. Las cajas de pizza las puede comprar en un supermercado cerca de la universidad y con esto se percata de que el **precio por caja** afectará al **precio de cada pedazo de pizza**.

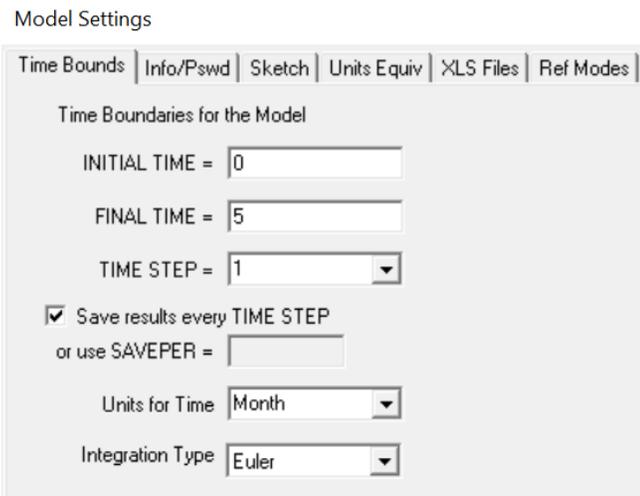
Por otro lado, como el estudiante quiere adquirir ganancias, este debe aplicar un **porcentaje** sobre el precio de cada pedazo de pizza. Entonces se define un flujo de salida denominado **ventas**, el cual es determinado por el precio de cada pedazo de pizza y la **cantidad total de pedazos que vende**, por lo que el máximo será la **cantidad de cajas** de pizza compradas multiplicado por la cantidad de pedazos que trae cada caja. Adicional, basado en sus ganancias, el estudiante pretende invertir un porcentaje adicional en mejorar el servicio y en publicidad. Debido a que las **ganancias** se acumularán a través del tiempo, esta será la variable de nivel.

**Solución:** A continuación, se resumen las variables del sistema y el tipo a la que corresponde cada una:

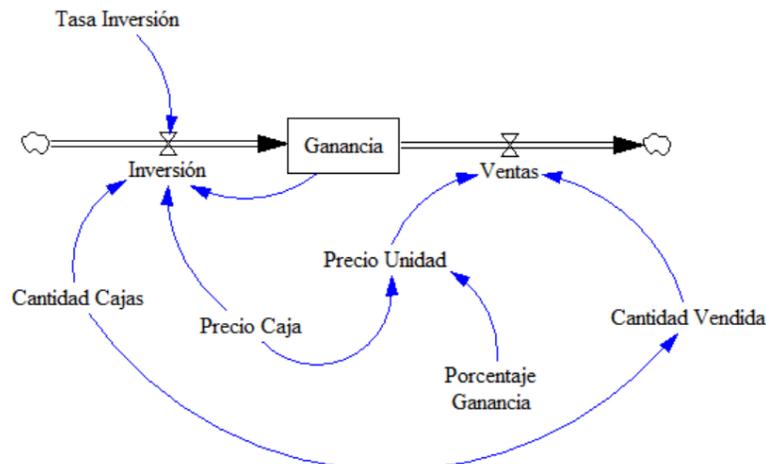
<b>Variable</b>	<b>Tipo de variable</b>	<b>Unidades</b>
Ganancia	Nivel	dólares/mes
Inversión	Flujo	dólares/mes
Ventas	Flujo	dólares/mes
Cantidad Cajas	Auxiliar	1/mes
Precio Caja	Auxiliar	dólares
Porcentaje Ganancia	Auxiliar	PG

Precio Unidad (Pizza)	Auxiliar	dólares
Cantidad Vendida	Auxiliar	1/mes
Tasa Inversión	Auxiliar	TI

Primero se debe crear el modelo y se escoge las unidades de tiempo y el tiempo inicial y final para la simulación. Para este ejemplo, la unidad de tiempo será en **meses (Month)** y se desea conocer cómo se comportará el sistema en un periodo de **cinco** meses.



Luego, tomando en cuenta el cuadro de variables, se procede a crear el diagrama de Forrester, iniciando con las variables de nivel y de flujo. Para la variable de nivel se hace clic en **Level** y para las variables de flujo se hace clic en **Rate**. Posteriormente, se agregan las variables auxiliares haciendo clic en **Variable**, por lo que finalmente se obtiene el siguiente diagrama que muestra las influencias que tienen lugar en el sistema:

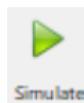


Una vez se ha creado el modelo, es necesario agregar las ecuaciones para cada una de las variables para poder realizar el proceso de simulación. Para ello, se hace clic en **Equations** y se hace clic sobre la variable que se desea modificar. A continuación se especifican las ecuaciones para las variables de este ejemplo:

<b>Inversión</b>	<p>Edit: Inversión</p> <p>Variable Information</p> <p>Name Inversión</p> <p>Type Auxiliary Sub-Type Normal</p> <p>Units dolares/Month Check Units <input type="checkbox"/> Supplementa:</p> <p>Group .ejemplo pizza Min Max</p> <p>Equations (Cantidad Cajas*Precio Caja)+(Ganancia*Tasa Inversión)</p> <p>=</p>
<b>Ganancia</b>	<p>Edit: Ganancia</p> <p>Variable Information</p> <p>Name Ganancia</p> <p>Type Level Sub-1</p> <p>Units dolares/Month</p> <p>Group .ejemplo pizza</p> <p>Equations Ventas-Inversión</p> <p>= INTEG (</p> <p>Initial Value 0</p>
<b>Ventas</b>	<p>Edit: Ventas</p> <p>Variable Information</p> <p>Name Ventas</p> <p>Type Auxiliary Sub-Type Normal</p> <p>Units dolares/Month Check</p> <p>Group .ejemplo pizza Min</p> <p>Equations (Cantidad Vendida*Precio Unidad)</p> <p>=</p>
<b>Tasa Inversión</b>	<p>Edit: Tasa Inversión</p> <p>Variable Information</p> <p>Name Tasa Inversión</p> <p>Type Constant</p> <p>Units TI</p> <p>Group .ejemplo pizza</p> <p>Equations 0.20</p> <p>=</p>
<b>Porcentaje Ganancia</b>	<p>Edit: Porcentaje Ganancia</p> <p>Variable Information</p> <p>Name Porcentaje Ganancia</p> <p>Type Constant</p> <p>Units PG</p> <p>Group .ejemplo pizza</p> <p>Equations 0.40</p> <p>=</p>

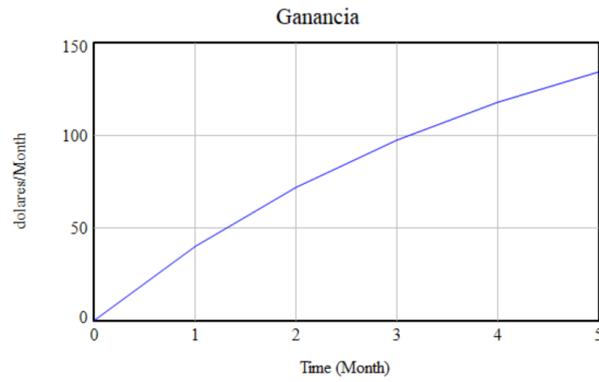
<b>Cantidad Vendida</b>	Edit: Cantidad Vendida Variable Information Name Cantidad Vendida Type Auxiliary Sub-T Units 1/Month Group .ejemplo pizza Equations Cantidad Cajas*8 =
<b>Precio Caja</b>	Edit: Precio Caja Variable Information Name Precio Caja Type Constant Units dolares Group .ejemplo pizza Equations 10 =
<b>Cantidad Cajas</b>	Edit: Cantidad Cajas Variable Information Name Cantidad Cajas Type Constant Units 1/Month Group .ejemplo pizza Equations 10 =
<b>Precio Unidad</b>	Edit: Precio Unidad Variable Information Name Precio Unidad Type Auxiliary Sub-Type Normal Units dolares Check Units Supplement Group .ejemplo pizza Min Max Equations (Precio Caja/8)+((Precio Caja/8)*Porcentaje Ganancia) =

Finalmente se procede a hacer la simulación del modelo, para lo cual se debe hacer clic sobre el botón mostrado a continuación. Este permite ejecutar la simulación del modelo utilizando los valores indicados en la configuración de las variables:



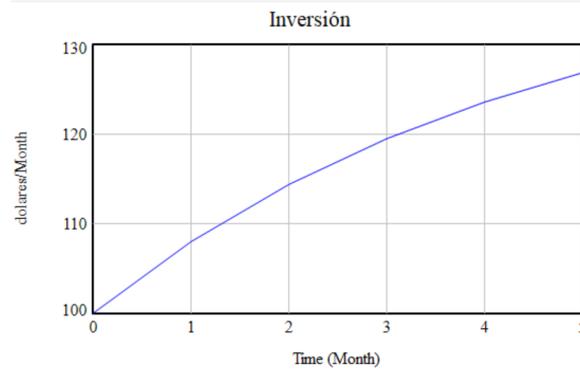
por lo que al ser las ganancias lo que le interesa conocer al estudiante, se obtiene la siguiente tabla que muestra cómo se acumulan las ganancias en los próximos cinco meses y la gráfica que lo representa:

Time (Month)	0	1	2	3	4	5
Ganancia : Current	0	40	72	97.6	118.08	134.464



De igual manera, se puede observar la inversión que debe realizar el estudiante si este desea mejorar el servicio ofrecido y hacer publicidad:

Time (Month)	0	1	2	3	4	5
Inversión : Current	100	108	114.4	119.52	123.616	126.893



## Bibliografía

- Agatstein, K., & Breierova, L. (1996). Ejercicios de Integración Gráfica. Segunda Parte: Funciones Rampa.
- Apestegui Florentino, Y. (2011). Dinámica de Sistemas. Retrieved from [http://biblioteca.uns.edu.pe/saladocentes/archivoz/publicacionez/ms\\_s7\\_teo.pdf](http://biblioteca.uns.edu.pe/saladocentes/archivoz/publicacionez/ms_s7_teo.pdf)
- Aracil, J. (2000). Elementos de la Dinámica de Sistemas.
- Aracil, J., & Gordillo, F. (1997). Dinámica de Sistemas. *Dinámica de Sistemas*. Retrieved from <http://tiesmexico.cals.cornell.edu/courses/shortcourse5/minisite/pdf/Literatura/AracilGordilloDS.pdf>
- Arnold, M., & Osorio, F. (1998). Introducción a los Conceptos Básicos de la Teoría General de Sistemas. *Departamento de Antropología*, 40–49.
- Arnold, M., & Osorio, F. (2009). Introducción a los conceptos básicos de la teoría General de Sistemas. *América Latina Hoy*, 52, 41–61. <https://doi.org/1130-2887>
- Barlas, Y. (2002). System Dynamics: systemic feedback modeling for policy analysis. *Knowledge for Sustainable Development: An Insight into the Encyclopedia of Life Support Systems*, 1131–1175. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1727\(199623\)12:3<1131::AID-SDR103>3.0.CO;2-4](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1727(199623)12:3<1131::AID-SDR103>3.0.CO;2-4)
- Bernd, N., & Mandar, J. (2014). Output Analysis for Simulation Model. Retrieved from [https://www.uni-due.de/imperia/md/content/tul/download/ews2014\\_2015\\_sl02\\_im\\_output\\_analysis.pdf](https://www.uni-due.de/imperia/md/content/tul/download/ews2014_2015_sl02_im_output_analysis.pdf)
- Cañadas, G. R., Gea, M. M., Contreras, J. M., & Roa, R. (2015). La Causalidad y su relación con la correlación y asociación. *17JAEM Cartagena 2015: Jornadas Sobre El Aprendizaje y La Enseñanza de Las Matemáticas.*, 1–13. Retrieved from <http://17jaem.semrm.com/aportaciones/n73.pdf>
- Caro, L., Goyhenecha, C., Moscoso, M., & Sepúlveda, M. (2006). Diagrama de Forrester.

El diagrama característico de la dinámica de sistemas.

Carvajal Villaplanta, Á. (2002). Teorías y modelos: formas de representación de la realidad. *Revista Comunicación*, 12(1), 1–14. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.18845/rc.v12i1.1212>

Chiavenato, I. (2013). *Introducción a la Teoría General de la Administración*. Mc Graw Hill Interamericana. Retrieved from <https://naghelsy.files.wordpress.com/2016/02/introduccion-a-la-teoria-general-de-la-administracion-7ma-edicion-idalberto-chiavenato.pdf>

Dangerfield, B. (2014). Systems thinking and system dynamics: A primer. *Discrete-Event Simulation and System Dynamics for Management Decision Making*, 9781118349(January 2014), 26–51. <https://doi.org/10.1002/9781118762745.ch03>

De Leon, V. (2012). Construcción de escenarios.

De Mata, J., Dormido, S., & Morilla, F. (2005). Fundamentos de la dinámica de sistemas y Modelos de dinámica de sistemas en epidemiología. Retrieved from [http://www.proyectosame.com/ds\\_documentos/manual\\_dinamica\\_sistemas.pdf](http://www.proyectosame.com/ds_documentos/manual_dinamica_sistemas.pdf)

Fishman, G. S. (2013). *Discrete-event simulation: modeling, programming, and analysis*. Springer Science & Business Media.

Forrester, J. (2009). Some basic concepts in system dynamics. *Sloan School of Management*, ..., 1–17. Retrieved from [http://www.systemsmodelbook.org/uploadedfile/238\\_63f73156-02df-4d87-b0c6-c286a7beec26\\_SomeBasicConcepts.pdf](http://www.systemsmodelbook.org/uploadedfile/238_63f73156-02df-4d87-b0c6-c286a7beec26_SomeBasicConcepts.pdf)

González, B., & Múgica, B. (1998). La Dinámica de Sistemas como Metodología para la elaboración de modelos de Simulación.

Goodman, N. D., Ullman, T. D., & Tenenbaum, J. B. (2008). Goodman,etal,2011,PsyRev\_Learning a theory of causality, 2188–2193.

Gutman, P. (1995). Escenarios ecológicos. *El Futuro Ecológico de Un Continente: Una Visión Prospectiva de La América Latina*, 2, 1126.

- Hussein, A. (2013). Block diagram.
- Johansen Bertoglio, O. (2008). *Introducción a la Teoría General de Sistemas*.
- Klages, R. (2008). Introduction to dynamical systems.
- Maiocchi, M. (2009). Apuntes sobre Pensamiento Sistémico.
- Martínez, F. L., & Londoño, J. E. (2012). El pensamiento sistémico como herramienta metodológica para la resolución de problemas. *Soluciones de Posgrado EIA*, 4(8), 43–65. Retrieved from <https://repository.eia.edu.co/bitstream/11190/689/1/RSO00081.pdf>
- Montero Bermúdez, E. J. (2012). *Aplicación de la dinámica de sistemas en el análisis del campo laboral en Quito del Ingeniero en Sistemas*.
- Morlán, I. (2011). Modelo de Dinámica de Sistemas para la implantación de Tecnologías de la Información en la Gestión Estratégica Universitaria, 55–84.
- Nicholson, C. (2005). Diagramas ciclos causales (DCC).
- Oh, A. (1995). Ejercicios de Integración Gráfica. Primera Parte: Flujos Exógenos.
- Ojea, G. (2007). Sistemas, Señales y Modelos.
- Osorio, J. C. (2007). Introducción al mundo sistémico. aproximación práctica 1. *Scientia et Technica*, (34), 349–353.
- Ossa, C. (2017). *Teoría General de Sistemas . Conceptos y aplicaciones . 2016 . En el repositorio de la U . T . P .*
- Pejé-Bach, M., & Cerié, V. (2007). Development and Validation of System Dynamics. *Journal of Information and Organizational Sciences*, 31(1), 171–185.
- Pérez, K., & Escobar, C. (2011). Diagramas causales, 28–43. Retrieved from [http://datateca.unad.edu.co/contenidos/299310/Material\\_didactico\\_eXe/leccin\\_23\\_diagramas\\_causales.html](http://datateca.unad.edu.co/contenidos/299310/Material_didactico_eXe/leccin_23_diagramas_causales.html)
- Ramírez, L. (2002). Teoría de Sistemas.

- Rasmussen, L. B. (2011). *Facilitating change: Using interactive methods in organizations, communities and networks*. Polyteknisk Forlag.
- Richardson, G. P., & Pugh III, A. I. (1981). *Introduction to system dynamics modeling with DYNAMO*. Productivity Press Inc.
- Roberts, N., Andersen, D. F., Deal, R. M., Garet, M. S., Shaffer, W. A., & others. (1983). *Introduction to computer simulation: the system dynamics approach*. Addison-Wesley Publishing Company.
- Rocha, J., & Lara, E. (2008). Gráficos de flujo de señal.
- Sarabia, Á. A. (1995). La Teoría General de Sistemas. *Departamento de Geografía Humana. Universidad de Sevilla*, 1–171.
- Schaffernicht, M. (2006). Indagación de situaciones dinámicas mediante la Dinámica de sistemas.
- Senge, P. M., Kleiner, A., Roberts, C., Ross, R., & Smith, B. (2006). La Quinta Disciplina en la Práctica: Estrategias para el pensamiento sistémico. *Granica S.A.*, 81. Retrieved from <ftp://ftp.icesi.edu.co/farenas/laquintadisciplinaenlapractica.pdf>
- System Behavior and causal loop diagrams. (2010). <https://doi.org/10.1080/00140130802331583>
- Tang, V., & Vijay, S. (2015). System Dynamics. *Essentials of Vehicle Dynamics*, (1971), 261–269. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100036-6.00017-0>
- Tarifa, E. (1988). Teoría de modelos y simulación: Introducción a la simulación. *Universidad Nacional de Jujuy*, 1–17. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01299>
- Von Bertalanffy, L. (1989). General System Theory. *Teoría General de Los Sistemas*, 311. Retrieved from [http://cienciasyparadigmas.files.wordpress.com/2012/06/teoria-general-de-los-sistemas\\_-fundamentos-desarrollo-aplicacionesludwig-von-bertalanffy.pdf](http://cienciasyparadigmas.files.wordpress.com/2012/06/teoria-general-de-los-sistemas_-fundamentos-desarrollo-aplicacionesludwig-von-bertalanffy.pdf)

## **Anexo 1: Pruebas Rápidas**

Universidad Tecnológica de Panamá  
Facultad de Ingeniería en Sistemas Computacionales  
Herramientas aplicadas a la Inteligencia Artificial

Parcial #1

Nombre: \_\_\_\_\_ Cédula: \_\_\_\_\_ Grupo: \_\_\_\_\_  
Profesor: Dr. Carlos A. Rovetto Puntos Obtenidos: \_\_\_\_/\_\_\_\_

I Parte: Llene los espacios en blanco

1. Un \_\_\_\_\_ es un conjunto ordenado de elementos interrelacionados entre sí para lograr un objetivo.
2. Un \_\_\_\_\_ puede definirse como una parte constitutiva o integrante de algo o la parte de un todo.
3. La \_\_\_\_\_ es un termino de origen griego que significa “ordenación” y esta no es mas que la ciencia que estudia los principios y fines de la clasificación.
4. Escriba dos clasificaciones de la taxonomía de los sistemas:  
\_\_\_\_\_ y \_\_\_\_\_.
5. Los antecedentes de la sismología como disciplina se remonta a la:  
\_\_\_\_\_

BUENA SUERTE

Universidad Tecnológica de Panamá  
Facultad de Ingeniería en Sistemas Computacionales  
Herramientas aplicadas a la Inteligencia Artificial

Parcial #2

Nombre: \_\_\_\_\_ Cédula: \_\_\_\_\_ Grupo: \_\_\_\_\_  
Profesor: Dr. Carlos A. Rovetto Puntos Obtenidos: \_\_\_\_/\_\_\_\_

I Parte: Cierto y Falso

1. \_\_\_\_\_ En la época primitiva se incremento el conocimiento del hombre acerca del entorno en el que vivía, así como su capacidad para alterarlo.
2. \_\_\_\_\_ A mediados del siglo XVIII surgieron tres pensamientos con el propósito de entender el mundo en la era de las maquinas: el perfeccionismo, el realismo y surrealismo.
3. \_\_\_\_\_ A principios de los años 20, un grupo de biólogos se opuso al reduccionismo, pues promovían el desarrollo de ideas referentes al organismo como un todo.
4. \_\_\_\_\_ En los años 80, el ingeniero en sistemas Jay Forrester desarrollo la metodología denominada “dinámica de sistemas”, la cual aplico por primera vez durante el análisis de la estructura de una empresa norteamericana.
5. \_\_\_\_\_ La metodología para la construcción de un modelo consiste en tres fases de carácter iterativo.
6. \_\_\_\_\_ El sensor brinda realimentación al sistema y permite comparar la salida con la entrada del sistema.

II Parte: Desarrollo

1. Explique con sus palabras todo lo que entiende sobre la Teoría General de Sistemas.

BUENA SUERTE

Universidad Tecnológica de Panamá  
Facultad de Ingeniería en Sistemas Computacionales  
Herramientas aplicadas a la Inteligencia Artificial

Parcial #3

Nombre: \_\_\_\_\_ Cédula: \_\_\_\_\_ Grupo: \_\_\_\_\_  
Profesor: Dr. Carlos A. Rovetto Puntos Obtenidos: \_\_\_\_/\_\_\_\_

I Parte: Selección múltiple

1. Va más allá de comprender el concepto de sistema sus diversas clasificaciones, implicando analizar situaciones o fenómenos contemplándolos como un todo y no a través de procesos aislados.
  - a. Enfoque de sistemas
  - b. Pensamiento sistémico
  - c. fundamentos
2. Es la actitud del ser humano basada en la percepción del mundo real en términos de totalidades para su análisis, comprensión y accionar.
  - a. Enfoque de sistemas
  - b. Pensamiento sistémico
  - c. fundamentos
3. Permiten que esta perspectiva pueda aplicarse satisfactoriamente en el análisis de cualquier sistema ya que se basa en metodologías orientadas al conocimiento
  - a. Enfoque de sistemas
  - b. Pensamiento sistémico
  - c. fundamentos

II Parte: Desarrollo

1. Describa los tres fundamentos descritos por Martínez & Londoño
2. Explique en que consiste los niveles del pensamiento sistémico

BUENA SUERTE

Universidad Tecnológica de Panamá  
Facultad de Ingeniería en Sistemas Computacionales  
Herramientas aplicadas a la Inteligencia Artificial

Parcial #4

Nombre: \_\_\_\_\_ Cédula: \_\_\_\_\_ Grupo: \_\_\_\_\_  
Profesor: Dr. Carlos A. Rovetto Puntos Obtenidos: \_\_\_\_/\_\_\_\_

I Parte: Llene los espacios.

1. Se refiere a las diferentes interrelaciones estables entre los componentes del sistema que pueden identificarse en un determinado momento: \_\_\_\_\_
2. La \_\_\_\_\_ se refiere a los límites que separan al sistema de su ambiente y por ende, definen aquello que pertenece dentro o fuera de dicho sistema.
3. Puede definirse como la evolución a lo largo del tiempo de los distintos atributos de los elementos que forman el sistema: \_\_\_\_\_.
4. La estructura interna de los sistemas se clasifica en tres: \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_ y \_\_\_\_\_.
5. Los \_\_\_\_\_ son una representación grafica de las funciones desempeñadas por cada uno de los componentes del sistema, así como el flujo de señales de un componente a otro.

II Parte: Selección Múltiple

1. Se representa por un punto y define una señal de entrada, salida o intermedia.  
a. Nodo      b. Nodo de entrada      c. Nodo mixto
2. También llamado sumidero, es un nodo que solo tiene flechas que entran en el.  
a. Nodo de entrada      b. nodo de salida      nodo mixto
3. Se refiere a la evolución del sistema a través del tiempo, lo cual permite hacer predicciones sobre futuros comportamientos.  
a. Espacio      b. Tiempo      c. Dinámica

BUENA SUERTE

Universidad Tecnológica de Panamá  
Facultad de Ingeniería en Sistemas Computacionales  
Herramientas aplicadas a la Inteligencia Artificial

Parcial #5

Nombre: \_\_\_\_\_ Cédula: \_\_\_\_\_ Grupo: \_\_\_\_\_  
Profesor: Dr. Carlos A. Rovetto Puntos Obtenidos: \_\_\_\_/\_\_\_\_

I Parte: Selección Múltiple

1. Es un principio que se refiere al punto en que las modificaciones en la estructura del sistema pueden dar lugar a mejores significativas e indefinidas.  
a. Apalancamiento b. Espacio c. Circularidad
2. Es la parte mas importante de un sistema dinámica, ya que expone las interrelaciones que existen entre los componentes del sistema  
a. Dinámica b. Tiempo c. Estructura

II Parte: Desarrollo

1. Explique brevemente los 10 pasos para la modelización de cualquier sistema que presente un comportamiento dinámico.
2. Explique con sus palabras lo que se entiende por definición del concepto de modelo
3. Mencione los 4 grandes grupos de acuerdo con la taxonomía de los modelos.
4. Mencione dos puntos relevantes sobre la Teoría de casualidad
5. Cuáles son los tres elementos que componen la simbología en las relaciones de causa – efecto y su representación.
6. Explique brevemente los tipos de influencia y describa los dos tipos de influencia.

Universidad Tecnológica de Panamá  
Facultad de Ingeniería en Sistemas Computacionales  
Herramientas aplicadas a la Inteligencia Artificial

Parcial #6

Nombre: \_\_\_\_\_ Cédula: \_\_\_\_\_ Grupo: \_\_\_\_\_  
Profesor: Dr. Carlos A. Rovetto Puntos Obtenidos: \_\_\_\_/\_\_\_\_

I Parte: Llene los espacios

1. La \_\_\_\_\_ permite distinguir entre un lazo de realimentación negativo y un lazo de realimentación positivo.
2. Son ejemplos de la ley de los signos: \_\_\_\_\_,  
\_\_\_\_\_ y \_\_\_\_\_.
3. Escriba una ventaja y desventaja del diagrama del ciclo causal:  
V: \_\_\_\_\_  
D: \_\_\_\_\_
4. Mencione las tres propiedades que caracterizan a los diagramas del ciclo causal:  
\_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_ y \_\_\_\_\_.
5. Escriba 3 tipos de ciclos de retroalimentación: \_\_\_\_\_,  
\_\_\_\_\_ y \_\_\_\_\_.

II Parte: Desarrollo

1. Explique que quiere decir la palabra Dominancia con respecto a los ciclos de retroalimentación.

BUENA SUERTE

Universidad Tecnológica de Panamá  
Facultad de Ingeniería en Sistemas Computacionales  
Herramientas aplicadas a la Inteligencia Artificial

Parcial #7

Nombre: \_\_\_\_\_ Cédula: \_\_\_\_\_ Grupo: \_\_\_\_\_  
Profesor: Dr. Carlos A. Rovetto Puntos Obtenidos: \_\_\_\_/\_\_\_\_

I Parte: Cierto y Falso

1. \_\_\_\_\_ Un bucle de realimentación positivo tendrá un comportamiento depresivo pues provoca que el sistema se desestabilice de forma exponencial.
2. \_\_\_\_\_ Un bucle de realimentación negativo tendrá un comportamiento depresivo ya que genera estabilidad en el sistema y por lo tanto, que este se acerque a un punto de equilibrio.
3. \_\_\_\_\_ Las variables exógenas son aquellas variables que influyen en el comportamiento de dicho sistema, pero no sufren modificaciones por parte de este.
4. \_\_\_\_\_ Los tipos de patrones son oscilatorios, Forma S, orientado a una meta y exponencial
5. \_\_\_\_\_ Dentro de los diagramas de ciclo causal existen 5 tipos de variables: las tasas, los niveles, el tiempo, los patrones y el ambiente.

II Parte: Selección Múltiple

1. Representan acumulaciones e indican el estado del sistema por lo que también se denominan variables de estado.  
a. Niveles                      b. Tasas
2. Representan la variación de una variable de nivel, por lo que se puede entender como una variación en el estado del sistema  
a. Niveles                      b. Tasas

BUENA SUERTE

Universidad Tecnológica de Panamá  
Facultad de Ingeniería en Sistemas Computacionales  
Herramientas aplicadas a la Inteligencia Artificial

Parcial #8

Nombre: \_\_\_\_\_ Cédula: \_\_\_\_\_ Grupo: \_\_\_\_\_  
Profesor: Dr. Carlos A. Rovetto Puntos Obtenidos: \_\_\_\_/\_\_\_\_

I Parte: Desarrollo

1. Que nos permite los diagramas causales
2. Explique 1 ejemplo del diagrama de ciclo causales
3. Escriba dos tipos de variables y símbolos para diagramas de flujos dinámicos
4. Resuma lo que usted entiende por diagramas de flujo dinámico
5. Describa que se refiere variables auxiliares

BUENA SUERTE

Universidad Tecnológica de Panamá  
Facultad de Ingeniería en Sistemas Computacionales  
Herramientas aplicadas a la Inteligencia Artificial

Parcial #9

Nombre: \_\_\_\_\_ Cédula: \_\_\_\_\_ Grupo: \_\_\_\_\_  
Profesor: Dr. Carlos A. Rovetto Puntos Obtenidos: \_\_\_\_/\_\_\_\_

I Parte: Cierto y Falso

1. \_\_\_\_\_ Los retrasos son elementos que simbolizan demoras en la transmisión a través de los flujos de material o información.
2. \_\_\_\_\_ La principal función de los retrasos es proporcionar una mayor descripción del sistema.
3. \_\_\_\_\_ Los ciclos de realimentación de un sistema ocurre cada toma de decisión y esta a su vez, altera a las variables de nivel que influyen en la toma de decisiones.
4. \_\_\_\_\_ Una variable de flujo puede controlar otra de su mismo tipo sin la intervención de una variable de nivel.
5. \_\_\_\_\_ Las variables de nivel no pueden integrar las variables de flujo, además de que crean continuidad en el sistema entre intervalos de tiempo.

II Parte: Desarrollo

1. Dibuje los símbolos para diagramas de flujo dinámicos no olvide colocar el nombre de cada uno.

BUENA SUERTE

Universidad Tecnológica de Panamá  
Facultad de Ingeniería en Sistemas Computacionales  
Herramientas aplicadas a la Inteligencia Artificial

Parcial #10

Nombre: \_\_\_\_\_ Cédula: \_\_\_\_\_ Grupo: \_\_\_\_\_  
Profesor: Dr. Carlos A. Rovetto Puntos Obtenidos: \_\_\_\_/\_\_\_\_

I Parte: Llene los espacios

1. Es aquella variable de flujo que no puede ser modificada por el sistema al cual pertenece, es decir no depende de ninguna variable de nivel: \_\_\_\_\_.
2. La función \_\_\_\_\_ se refiere a flujos cuyo comportamiento es linealmente creciente o decreciente.
3. Son tipos de ecuaciones encontradas en los periodos de tiempo: \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_ y \_\_\_\_\_.

II Parte: Desarrollo

1. Mencione dos de los pasos para la metodología del desarrollo de un proyecto de modelización y análisis de sistemas.
2. Explique en qué consiste el proceso de simulación en computador.
3. A que se refiere la definición de escenarios.

BUENA SUERTE

## **Anexo 2: Presentaciones**

# Ingeniería de Sistemas Dinámicos

Autor: Dr. Carlos A. Rovetto

1

## Capítulo I

2

### Capítulo I: El Enfoque de Sistemas

Existen diferentes definiciones para el concepto de sistema, sin embargo, se propone lo siguiente como una definición general: "Un sistema es un conjunto ordenado de elementos interrelacionados entre sí para lograr un objetivo".

Con base en lo anterior, se puede deducir que:

- Un sistema se compone de la suma de sus elementos
- Los elementos deben estar relacionados
- Todo sistema tiene un objetivo
- Un sistema determina la naturaleza de sus elementos

3

## Elemento

Un elemento puede definirse como una parte constitutiva o integrante de algo o la parte de un todo. Características de los elementos:

Tienen características específicas que influyen en las características del sistema. De la misma forma, las características del sistema influyen en las de los elementos.

Al estudiar un sistema, depende del analista del sistema decidir cuáles son los elementos que va a considerar para la evaluación.

Un elemento puede ser considerado un sistema y en tal caso se denomina subsistema.

4

## Taxonomía de los sistemas

Taxonomía es un término de origen griego que significa "ordenación", y esta no es más que la ciencia que estudia los principios y fines de la clasificación. En este sentido, la taxonomía de los sistemas se refiere a la clasificación de los sistemas.

5

## La sistemología como disciplina integradora

La sistemología como disciplina integradora implica tener una visión global, es decir, estudiar los sistemas como un todo e interrelacionando procesos. Esto es considerablemente conveniente al analizar fenómenos complejos que requieren de la interdisciplinariedad, tal como indica. Los antecedentes datan desde la época primitiva, mediados del siglo XVIII, siglo XX,

6

## Teoría General de Sistemas

La Teoría General de Sistemas (TGS) fue propuesta en 1950 por Karl Ludwing von Bertalanffy, contribuyendo así a la aparición de un nuevo paradigma científico basado en la interrelación entre los elementos que forman los sistemas, debido a la interdisciplinariedad, la TGS no busca alcanzar analogías vagas y superficiales que podrían perjudicar el desarrollo de los diferentes campos, sino que busca ser una herramienta que pueda brindar modelos utilizables y transferibles en dichos campos

7

## El enfoque de sistemas

El enfoque de sistemas va más allá de comprender el concepto de sistema y sus diversas clasificaciones, pues implica analizar situaciones o fenómenos contemplándolos como un todo y no a través de procesos aislados.

**Pensamiento sistémico:** El pensamiento sistémico es la actitud del ser humano basada en la percepción del mundo real en términos de totalidades para su análisis, comprensión y accionar.

**Fundamentos del pensamiento sistémico:** la articulación del problema, el análisis de sistemas, el uso de modelos.

**Niveles del pensamiento sistémico:** Primer nivel – Acontecimientos, Segundo nivel – Pautas de conducta, Tercer nivel – Estructuras sistémicas, Cuarto nivel – Modelos mentales

8

## La dinámica de sistemas y sus contribuciones

El término dinámica expresa el carácter cambiante de algo. En este sentido, dinámica de sistemas se refiere a las diferentes variables que se pueden asociar a las partes de un sistema, y que sufren cambios a lo largo del tiempo, produciendo interacción.

Desarrollo y aportes

La dinámica de sistemas fue concebida para resolver un problema concreto: el que presentaba una empresa de productos electrónicos, que teniendo pocos clientes y todos ellos con unos pedidos muy estables y previsibles, registraba considerables oscilaciones en la línea de producción. Dnes entre ellas.

9

## Aportes de la Dinámica de Sistemas

**Diagrama causal:** Es una herramienta que muestra las relaciones causales entre los componentes de un sistema, de modo que se facilite el análisis de los comportamientos de realimentación a través del tiempo (Morlán, 2011).

**Diagrama de Forrester:** Es uno de los instrumentos básicos en la dinámica de sistemas (Aracil & Gordillo, 1997) y consiste en un modelo gráfico donde se observa la relación entre tres tipos de variables del sistema: de nivel o acumulación, de flujo o razón de cambio y auxiliar o de cálculo intermedio, en base al diagrama causal.

**Metodología para la construcción de un modelo:** Tal como explica (Aracil & Gordillo, 1997), esta metodología consiste en tres fases de carácter iterativo, pues se puede pasar de una fase a otra sin un orden en particular

10

## Elementos de un Diagrama de bloques de un sistema de control

**Referencias o entradas:** Es la señal que le da al sistema el estímulo necesario para que produzca una respuesta o salida.

**Controlador:** Manipula la entrada del proceso.

**Actuador:** Recibe información del controlador y manipula directamente el proceso.

**Proceso:** Desarrollo necesario para producir las respuestas del sistema.

**Salidas:** Respuestas del sistema.

**Sensor:** Brinda realimentación al sistema y permite comparar la salida con la entrada del sistema.

**Perturbación:** Señales no deseadas que influyen en el funcionamiento del sistema

11

## Casos de Aplicación

**Caso de aplicación #1 – Sistema de control de lazo abierto:** Una persona desea llenar una piscina utilizando una manguera. La persona abre la llave donde está conectada la manguera y regresa adentro de su casa para dejar que la piscina se llene, esperando que algún familiar se encargue de vigilar el llenado de la piscina. Sin embargo, este no sabe que está solo en casa. Construir el diagrama de bloques para este sistema, asumiendo que la persona no verifica cada cierto tiempo el nivel de agua dentro de la piscina.

12

## Capítulo II

13

## Capítulo II: Sistemas y sus representaciones

La descripción de sistemas es la primera fase del análisis de sistemas y forma parte de la conceptualización, el cual es el primer paso en la metodología para la construcción de un modelo. Esta fase requiere de gran cantidad de información y técnicas de codificación y organización de la información. En este sentido, es conveniente destacar que todos los sistemas que verdaderamente son de interés para un analista:

- Se componen de múltiples partes
- Se constituyen por una gran variedad de materiales
- Operan por largo tiempo bajo diversas condiciones

14

## Estructura

La estructura de un sistema se refiere a las diferentes interrelaciones estables entre los componentes del sistema que pueden identificarse en un determinado momento.  
Tipos de estructura:

**De refuerzo:** Ocurre cuando la realimentación de los cambios en el sistema se amplifica porque se produce en la misma dirección del cambio original.

**De compensación:** Ocurre cuando la realimentación de los cambios en el sistema va en dirección contraria al cambio original con el fin de moderar el efecto

15

## Fronteras

La frontera de un sistema se refiere a los límites que separan al sistema de su ambiente y por ende, definen aquello que pertenece dentro o fuera de dicho sistema. Para ello es importante tomar en cuenta lo siguiente:

- ✓ Enumerar todos los componentes que integran al sistema permite tener una mejor perspectiva de las interacciones dentro del sistema.
- ✓ Indicar todos los flujos que atraviesan la frontera. En este sentido, puede haber dos tipos: los que entran desde el ambiente al interior de la frontera del sistema o entradas y los que van desde el interior de la frontera al exterior o salidas.
- ✓ Identificar todos los elementos que contribuyen a la obtención de metas específicas e incluirlas dentro de la frontera si aún no lo están

16

## Comportamiento

El comportamiento puede definirse como la evolución a lo largo del tiempo de los distintos atributos de los elementos que forman el sistema. Cuando se estudia el comportamiento de un sistema, se asume que éste cambia con el tiempo y que nos interesa dar razón de ese cambio.

17

## Estructura Interna de los Sistemas

La estructura interna de los sistemas se clasifica en tres:

- Endoestructura: Es la estructura interna de un sistema y corresponde al conjunto de relaciones entre los componentes del sistema.
- 2. Exoestructura: Es la estructura externa de un sistema y corresponde al conjunto de relaciones entre los componentes del sistema y los elementos de su entorno.
- 3. Estructura total: Es la unión o suma lógica entre la endoestructura y la exoestructura del sistema.

18

## Diagramas de bloques y flujo de señales

Los diagramas de bloques son una representación gráfica de las funciones desempeñadas por cada uno de los componentes del sistema, así como el flujo de señales de un componente a otro

19

## Elementos de un diagrama de bloques

La forma más simple de un diagrama de bloques se compone de un bloque individual que transforma o procesa una entrada para producir una salida. Los elementos de este tipo de diagrama son:

- ✓ Variable de entrada: Es el estímulo o señal que se debe transformar para producir un resultado.
- ✓ Variable de salida: Es el resultado de la transformación de la variable de entrada.
- ✓ Bloque: Representa la operación de transformación que sufre la entrada para producir la salida.
- ✓ Flecha: Representa una y sólo una variable; la punta de la flecha indica la dirección del flujo de señales o la dirección de la información.

20

## Elementos de un diagrama de flujo de señales

Los elementos de un diagrama de flujo de señales son descritas por (Rocha & Lara, 2008) y se especifican a continuación:

- ✓ **Nodo:** Se representa por un punto y define una señal de entrada, salida o intermedia.
- ✓ **Nodo de entrada:** También llamado fuente, es un nodo que sólo tiene flechas que salen de él.
- ✓ **Nodo de salida:** También llamado sumidero, es un nodo que sólo tiene flechas que entran a él.
- ✓ **Nodo mixto:** Tiene tanto flechas de entrada como de salida.
- ✓ **Transmitancia o transferencia:** Se representa por una flecha orientada que une dos nodos y define la función de transferencia que vincula a los dos nodos o señales.
- ✓ **Trayecto o camino:** Es el recorrido en el sentido de las flechas que une dos nodos. Si sólo toca los nodos una vez, se dice que es un camino abierto, mientras que si finaliza en el mismo nodo del cual partió y pasa por los restantes nodos una sola se dice que es un camino cerrado o lazo.
- ✓ **Trayecto o camino directo:** Son los caminos, en el sentido de las flechas, que unen de forma directa un nodo de entrada con uno de salida.

21

Un sistema dinámico es un sistema que presenta estados que evolucionan a lo largo del tiempo. Una definición formal, propuesta por (Klages, 2008), sería la siguiente: "Un sistema dinámico consiste en un conjunto de transformaciones en el espacio de estado que evolucionan a lo largo del tiempo, ya sea este continuo o discreto"

## Sistemas dinámicos y sus representaciones

22

## Características de los sistemas dinámicos

**Estructura:** Es la parte más importante de un sistema dinámico, ya que expone las interrelaciones que existen entre los componentes del sistema.

**Dinámica:** Se refiere a la evolución del sistema a través del tiempo, lo cual permite hacer predicciones sobre futuros comportamientos.

**Circularidad:** Se refiere a al principio de causa y efecto que permite representar las interconexiones de los componentes del sistema, así como a los lazos de realimentación que surgen de estas relaciones.

**Espacio:** Se refiere al distanciamiento que existe entre los lazos de realimentación. Este es un factor importante a la hora de determinar los límites del sistema.

**Tiempo:** El principal factor de un sistema dinámico, ya que sobre este es que ocurren los cambios del sistema. Por ello, se estudia este tipo de sistemas en función de las variaciones que sufre en un determinado tiempo.

**Apalancamiento:** Es un principio que se refiere al punto en que las modificaciones en la estructura del sistema pueden dar lugar a mejoras significativas e indefinidas

23

## Pasos para el diseño

1. Describir qué problemas presenta el sistema que requieran ser mejorados.
2. Aislar los factores que interactúan para identificar los síntomas observados.
3. Estudiar los ciclos de causa y efecto de información y realimentación que unen las decisiones a las acciones, de tal forma que la acción resultante cambie las nuevas decisiones.
4. Formular reglas, formales y aceptables, que describan cómo las decisiones resultan de las corrientes de información disponible.
5. Construir un modelo matemático de las reglas de decisiones, fuente de información e interacciones de los componentes del sistema.
6. Generar el comportamiento a través del tiempo del sistema descrito en el modelo (usualmente se ejecutan los cálculos por medio de computadoras).
7. Comparar todos los resultados contra todo el conocimiento pertinente disponible del sistema actual.
8. Revisar el modelo hasta que sea aceptable y sea una representación del sistema actual.
9. Experimentar con el modelo; rediseñar dentro del modelo las relaciones organizacionales y reglas que puedan ser alteradas en el sistema actual para encontrar los cambios que mejoran el comportamiento del sistema.
10. Alterar el sistema actual en las direcciones del experimento en el modelo para mejorar el rendimiento del sistema.

24

## El concepto de modelo

“Un modelo es una aproximación esquematizada de un sistema que recolecta los aspectos más significativos y que pretende mostrar las condiciones que dan lugar a los comportamientos del sistema”.

**Estructura:** El modelo de un sistema dinámico debe representar estas interacciones, ya que la estructura es la que permite definir el 40 comportamiento del sistema, y por lo tanto, hacer predicciones a través del análisis de los comportamientos haciendo uso del modelo del sistema en estudio.

**Fronteras** Al igual que las fronteras de un sistema dinámico, los límites del modelo deben ser análogos a los límites del sistema.

**Modelos confiables y observables** Los modelos son herramientas de simulación por lo que la exactitud de un modelo depende del análisis que se le haga al sistema, de modo que sea posible obtener datos y hacer una comparación de los resultados

25

## Taxonomía de los modelos

Los modelos pueden clasificarse de diferentes maneras y es necesario conocer cada una de ellas para saber las tecnologías que se deben utilizar. Los modelos se clasifican en cuatro grandes grupos:

De acuerdo con el enfoque del modelo

De acuerdo con los cambios o variaciones del modelo

Icónicos versus Físicos versus Análogos

Determinísticos versus Estocásticos

26

## Capítulo III

27

## Capítulo III: Sistemas Dinámicos y Diagramas de Ciclo Causal

**Teoría de causalidad:** La teoría de causalidad forma parte de nuestra vida diaria, pues constantemente buscamos relaciones entre las cosas. La teoría de causalidad no es más que aquel factor que nos permite entender el funcionamiento de los sistemas dinámicos, pues la búsqueda de relaciones para comprender las interacciones dentro de un sistema no son más que el resultado de las relaciones de causa y efecto

28

## Relaciones de causa-efecto y SU representación

### Simbología

Las relaciones causales, algunas veces llamadas diagramas de influencias, son el principal objeto de estudio de la teoría de causalidad y son las que permiten representar el funcionamiento de los sistemas a través de las variables endógenas.

### Significado de la dirección de la influencia

La dirección de la influencia o relación entre las variables se conoce como polaridad de los enlaces y describen la estructura del sistema.

### Tipos de influencias

Se pueden identificar dos tipos de influencias las cuales se representan colocando un signo sobre la flecha. Los tipos de influencias son: positivas y negativas.

29

## Ley de los signos

Los sistemas se componen varios ciclos causales que dan lugar a los lazos de realimentación, los cuales a su vez permiten comprender el funcionamiento y los cambios que sufren las variables. Sin embargo esta ley se resume a la siguiente:

- Cuando sólo hay signos positivos, el lazo es de realimentación positivo.
- Número impar de signos negativos indica un lazo de realimentación negativo.
- Número par de signos negativos indica un lazo de realimentación positivo

30

## Diagramas de ciclo causal

Ventajas	Desventajas
Identifican los principales ciclos de realimentación sin hacer distinción según la naturaleza de las variables interconectadas	Puede dar lugar a que se incluyan relaciones de variables que realmente no explican nada sobre el comportamiento del sistema.
Presentan las relaciones de causa-efecto más importantes debidamente acopladas	Existe la posibilidad de incluir causalidades redundantes que explican comportamientos que son explicados por otras relaciones causales
Sirven como esquemas preliminares acerca de la estructura del sistema.	Si no se analiza bien el sistema, existe la tendencia a hacer diagramas muy detallados para problemas muy simples, o bien, diagramas muy pequeños para situaciones complejas
Ayudan a comprender la forma en que la estructura del sistema provoca su comportamiento.	
Simplifican la ilustración del sistema a modelar.	

31

## Propiedades

Las tres propiedades que caracterizan a los diagramas de ciclo causal, con base en las explicaciones de (Nicholson, 2005), son:

**Causalidad:** Se refiere a la secuencia de los eventos, tal que la causa ocurre antes que el efecto y por tanto, la causa influye sobre el efecto. Es decir, se refiere a la estructura que causa un determinado comportamiento.

**Correlación:** Se refiere al cambio de las variables en el tiempo, es decir el comportamiento del sistema.

**Realimentación:** Es la propiedad más importante y se refiere a cuando las salidas son redirigidas como entradas, lo que implica intercambio de información.

32

## Ciclos de retroalimentación

**Retroalimentación positiva:** Los ciclos de realimentación positiva son aquellos en los que el cambio de una variable se propaga en todo el ciclo, de modo que se refuerza el cambio inicial.

**Realimentación negativa:** Los ciclos de realimentación negativa son aquellos en los que el cambio de una variable se propaga en todo el ciclo, pero provoca que se contrarreste el cambio original.

**Combinación de ciclos:** La estructura de todo sistema dinámico no se compone solamente de un ciclo de realimentación, sino de una combinación de ciclos tanto positivos como negativos

33

**Dominancia:** Como todo sistema se compone de varios ciclos causales positivos y negativos, el comportamiento del sistema será determinado por cuál de los bucles domina sobre el otro en cada momento.

**Diversidad de comportamiento:** La combinación de ciclos de realimentación produce una diversidad de comportamientos, sin embargo se pueden distinguir dos tipos de comportamientos de los sistemas en función del tipo de ciclo de realimentación: explosivo y depresivo.

**Variables exógenas:** Las variables exógenas son aquellas variables influyen en el comportamiento de dicho sistema, pero no sufren modificaciones por parte de este

34

## Graficación y análisis de sistemas de retroalimentación

**Patrones:** Durante el estudio de los sistemas de realimentación es posible observar diversos patrones de comportamiento que surgen de los diferentes tipos de estructura que se pueden observar en los sistemas dinámicos. Ejemplos de patrones:

Exponenciales  
orientado a una meta  
forma de S  
oscilatorio.

35

## Definición de tasas y niveles

Dentro de los diagramas de ciclo causal, existen dos tipos de variables: las tasas y los niveles. Estas se definen a continuación:

**Niveles:** Estos representan acumulaciones e indican el estado del sistema por lo que también se denominan variables de estado.

**Tasas:** Estas representan la variación de una variable de nivel, por lo que se puede entender como una variación en el estado del sistema (

36

## Gráficos y ciclos causales

Los diagramas causales permiten representar las relaciones entre las variables de un sistema dinámico, cuya característica más importante son las variaciones en el tiempo. Los gráficos mostrados en los patrones de comportamiento de los sistemas, representan los gráficos que se pueden obtener a partir de los diagramas de ciclo causal.

37

## Capítulo IV

38

Los diagramas de flujo dinámico, también denominados diagramas de Forrester, son representaciones gráficas de modelos cuantitativos que permiten realizar simulaciones del sistema y así obtener las ecuaciones matemáticas que determinan el comportamiento de este



39

## Tipos de variables y símbolos para diagramas de flujo dinámico

### Niveles

Las variables de nivel representan cantidades que acumulan resultados de acciones pasadas, por lo que definen el estado del sistema.

### Flujos o ratas

Las variables de flujo representan el cambio de las variables de nivel a través del tiempo, por lo que esto puede entenderse como un cambio en el estado del sistema.

### Variables auxiliares

Una variable auxiliar es una cantidad con una determinada representación física en el mundo real.

### Constantes

Las constantes o parámetros son elementos que representan valores fijos del sistema y por lo tanto, su valor numérico no cambia durante las corridas de simulación del modelo.

### Retrasos

Los retrasos son elementos que simbolizan demoras en la transmisión a través de los flujos de material o de información

40

## Estructuras de sistemas dinámicos

### Ciclo de retroalimentación

Dentro de los ciclos de realimentación de un sistema ocurre cada toma de decisión y esta, a su vez, altera a las variables de nivel que influyen en la toma de decisiones.

### Niveles y ratas

Los ciclos de realimentación se componen de dos subestructuras básicas: las variables de nivel y las variables de flujo.

41

## Elementos genéricos de una estructura de retroalimentación de un modelo de un sistema dinámico

Integración gráfica para estimar comportamiento: A partir de las variables de nivel es posible inferir el comportamiento de las variables de flujo, ya que desde un punto de vista matemático los niveles integran a los flujos.

Flujos exógenos: Un flujo exógeno es aquella variable de flujo que no puede ser modificada por el sistema al cual pertenece, es decir, no depende de ninguna variable de nivel

Función step Este tipo de función, también denominada función escalón, definen el comportamiento de una variable de flujo exógena que varía con el tiempo.

Funciones rampa: Las funciones rampa se refiere a flujos cuyo comportamiento es linealmente creciente o decreciente, lo que quiere decir que no es constante a través del tiempo

42

## Redes (Secuencia Rata – Nivel)

Un factor importante dentro de los modelos es que cada nivel tiene su variable de flujo, por lo que conforme se adicionen más secuencias flujo – nivel, la dinámica del modelo se modificará y será más compleja.

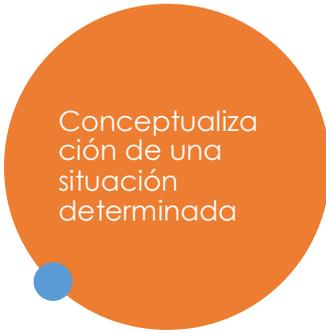
El conjunto de secuencias flujo – nivel se denominan redes, por lo que analizar y hacer pruebas con el modelo se convertirá en un proceso más complejo debido a que estas secuencias agregan una mayor escala de complejidad al modelo

43

## Sistemas de Ecuaciones

- Periodos de tiempo: La principal característica de los sistemas dinámicos es su evolución a través del tiempo y por esta razón, las variables que describen el comportamiento el sistema están definidas en función del tiempo.
- Ecuaciones: Existen de nivel, de rata, auxiliares, y constantes.

44



Conceptualización de una situación determinada

La conceptualización de una situación consiste en lograr una representación simplificada del problema que se pretende analizar, de modo que el modelo muestre los aspectos más relevantes del sistema.

Es importante determinar los límites del estudio, así como analizar cuáles serán las variables que se tomarán en cuenta. En este punto, es elemental determinar los elementos que forman parte de la descripción del problema y establecer las influencias que estos elementos provocan sobre el sistema

45



Metodología para el desarrollo de un proyecto de modelización y análisis de sistemas

1. Identificar y definir el problema: El problema a estudiar debe tener dos características esenciales: ser dinámico y presentar realimentación. Se pueden identificar problemas con estas dos características a partir de gráficas de datos o de información acerca de las cualidades de este.
2. Establecer una hipótesis dinámica y conceptualizar el modelo: Desarrollar una teoría que describa las causas del comportamiento dinámico del problema, es decir, un modelo conceptual que describa la hipótesis para su posterior comprobación.
3. Construir el modelo formal: Crear el modelo que será utilizado para la simulación.
4. Probar la credibilidad del modelo: Validar el modelo con base en dos aspectos: 1) Si la estructura del modelo es una descripción representativa de las relaciones reales que existen en el problema en estudio y 2) Si los patrones de comportamiento dinámico que genera el modelo son equivalentes a los generados por el sistema real

46



Metodología para el desarrollo de un proyecto de modelización y análisis de sistemas

5. Analizar el modelo: Comprender las propiedades dinámicas del modelo, a través de experimentos de simulación. Las corridas de simulación proveen información acerca de las propiedades del modelo y esta información puede ser comparada con datos reales.
6. Diseñar mejoras: Buscar políticas alternativas que permitan perfeccionar la dinámica del modelo y luego probarlas a través de la simulación.
7. Implementar: Este es el objetivo final, ya que se busca obtener mejoras sustentables para el sistema o problema en estudio.

47



Simulación en computador

El proceso de simulación consiste en utilizar un modelo de un sistema real y realizar experimentos con este, con el fin de obtener datos que permitan analizar el comportamiento del sistema y así establecer estrategias para el funcionamiento de este.

La simulación por computadora permite procesar un modelo simbólico, el cual está en esencia conformado por un sistema de ecuaciones y para ello se requiere de lenguajes de programación adecuados y específicos para este proceso, de modo que se puedan obtener datos válidos.

48

---

#### Comportamiento del modelo

El comportamiento del modelo es el resultado obtenido de las simulaciones. En otras palabras, los datos resultantes de las corridas de simulación por computadora permiten hacer comparaciones con los datos del sistema real y así hacer comparaciones y predicciones.

#### Definición de escenarios

Una vez se ha validado el modelo es conveniente definir diferentes escenarios para ser sometidos al proceso de simulación, con el fin de estudiar las estrategias que se pretenden implementar en el funcionamiento del sistema.

#### Análisis de resultados

El análisis de resultados es una de las fases del proceso de modelización en la que los datos obtenidos de las simulaciones del modelo son recopilados ya sea en textos o gráficos, para posteriormente ser analizados a través de métodos estadísticos