

Capítulo 1.

Introducción a la sistémica

Fuente: <https://unsplash.com/photos/jHZ70nRk7Ns>

Recuperado 8 de diciembre de 2019

Para comprender el significado del término *sistema*, aquí se plantean varios conceptos de diversos autores, con el propósito de que el lector pueda entender mejor el verdadero alcance de esta palabra. Una definición inicial plantea lo siguiente:

Un sistema se entiende como una unidad cuyos elementos interaccionan juntos, ya que consecutivamente se afectan unos a otros, de modo que operan hacia un propósito común. Es algo que se aprecia como una identidad que la diferencia de lo que la rodea, y que es competente [para] mantener esa identidad a lo largo del tiempo y bajo entornos variables. [1]

Como se puede ver en esta cita, se denomina sistema a la unión de varios elementos interrelacionados que tienen un propósito común y con ello se diferencian de otros elementos. Otra concepción del término se expresa así:

Después de la tormenta, el agua de desagüe caerá en ríos y lagunas a kilómetros de distancia, y el cielo estará despejado para mañana. Todos estos acontecimientos están distanciados en el espacio y en el tiempo, pero todos están conectados dentro del mismo patrón. Solo se comprende el sistema de la tormenta al contemplar el todo, no cada elemento individual. [2]

En esta descripción, se hace una comparación entre las condiciones del ambiente después de una tempestad y el concepto de sistema; así se resalta el rasgo de integralidad que tiene dicho concepto. Algunos autores dicen que las “condiciones para que un agregado de componentes, procesos o actividades estructuradas sean admitidas como un sistema” son las siguientes:

Debe tener una métrica que cuantifique el desempeño, además de un consumidor, quien establece los estándares y la medida del rendimiento, y [...] un diseñador que conceptualiza su naturaleza y que puede variar las acciones tanto del comprador como del decisor. [3]

Otros expertos afirman que los sistemas generalizados o sus subclases, independientemente de la clase particular, dependen de la naturaleza de sus elementos componentes y de las relaciones o fuerzas que se establecen entre estos [4].

Por otra parte, en la definición de sistema como un acumulado de objetos o normas que de forma ordenada favorecen el logro de una terminación [5] se hace énfasis en el hecho de que en el sistema se acumulan sucesos o estándares que, con un ordenamiento definido, llegan a la obtención de cierto propósito. En ese mismo sentido, otro autor dice que “un sistema es un conjunto de elementos que se vinculan en un todo con el propósito habitual de lograr una finalidad” [6]. Por eso, el sistema puede definirse también como una “acumulación de componentes interrelacionados que trabajan juntos hacia un fin común, admitiendo entradas y generando salidas en un proceso de transformación estructurado” [7].

De la misma forma, algunos autores, expertos en sistemas de información, conciben el término como:

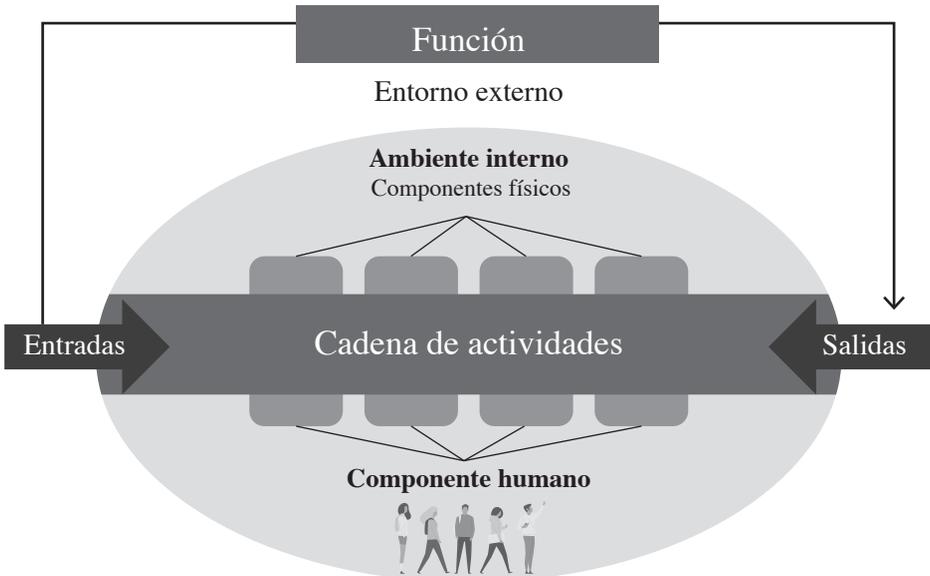
Un conglomerado de elementos organizados que se encuentran en interacción, que buscan cierta meta u objetivos comunes, mediante la adquisición de datos e información sobre energía, materia y organismos, en una referencia temporal, para producir como salida cierta información, energía, materia y otros organismos. [8]

Varios autores insisten en definir el sistema como “un conjunto de elementos interdependientes e interactuantes o un grupo de unidades combinadas que forman un todo organizado” [9], “una reunión de elementos relacionados y que se pueden estructurar con conceptos, objetos y sujetos” [10] o “un conjunto de partes que interactúan entre sí para formar un todo, relacionándose con su medio” [11]. También es posible decir que “un sistema puede existir realmente como un agregado natural de partes o componentes encontrados en la naturaleza, o puede ser un agregado inventado por el hombre” [3]. Por otro lado, puede ser una forma de ver un problema que resulta de una decisión deliberada de suponer que un conjunto de elementos está relacionado y constituido en una unidad denominada sistema [12].

En este libro, se define el término *sistema* como una cohesión holística de componentes que, permanentemente, se interrelacionan e interactúan de forma sinérgica persiguiendo continuamente un objetivo o propósito que es de carácter común. Por lo general, el sistema está constituido por un entorno o ambiente externo, dentro del cual hay una serie de elementos: unos hacen las veces de entradas (luego hay un proceso de transformación) y otros actúan como salidas. De la misma forma, se involucra en el proceso una retroalimentación que permite cerrar el circuito entre entradas y salidas, lo que permite para efectuar cambios en el sistema. En la figura 1.1 se ve la representación de

un sistema junto con las partes que lo constituyen: una función específica, las entradas, el componente físico, el componente humano, el ambiente interno, la cadena de actividades, el entorno externo y las salidas.

FIGURA 1.1. Estructura típica de un sistema.



elaborada por el autor.

La *función* de un determinado sistema es su razón de ser, es el impulso que causó su existencia. Desde el punto de vista industrial, se pueden citar los siguientes ejemplos de funciones en distintos sistemas. 1) La función del sistema educativo es ofrecer programas y servicios académicos que permitan al educando formar una empresa; su función también es lograr la inclusión de las nuevas generaciones en los diferentes mercados de trabajo. 2) El sistema logístico es una parte del proceso de la cadena de abastecimientos; la función de este sistema es planificar, implementar y controlar el flujo hacia atrás y hacia adelante y el almacenamiento eficaz y eficiente de los bienes, los servicios y la información relacionada, desde el punto de origen hasta el punto de consumo, con el objetivo de satisfacer los requerimientos de los consumidores. 3) El sistema de gestión dirige y controla una organización con respecto a la calidad, esa es su función. 4) El sistema de producción es el conjunto de elementos que concurren en la transformación de un bien o

un servicio, esa es su función. 5) Un sistema de inventario es un conjunto de normas, métodos y procedimientos aplicados de manera sistemática y cuya función es planificar y controlar los materiales y productos que se emplean en una organización; este sistema puede ser manual o automatizado. Estos son solo algunos ejemplos entre muchos.

En las *entradas* del sistema se pueden incluir las materias primas, los insumos, las partes semiterminadas, los productos terminados, los accesorios, las herramientas, los dispositivos, las certificaciones de origen, las remisiones, las facturas de traslado, la información contable, los pronósticos de ventas, las horas hombre disponibles, la capacidad de producción, la productividad del sistema, el número de pacientes, la cantidad de operarios, los kilovatios hora (kWh) requeridos, la cantidad de envíos por mes, los metros cúbicos de gas natural consumidos por semana, la información técnica, los galones de gasolina requeridos, entre otros. El *componente humano* se refiere, en el caso de factorías o empresas de servicios, a los empleados administrativos y a los trabajadores operativos. En el caso de las factorías, se pueden incluir cargos de alta gerencia, como presidentes, gerentes y directores; también mandos medios, como jefes y coordinadores; y cargos de tercer orden, como empleados rasos y operarios.

El *componente físico* involucra los recursos materiales que permiten la transformación de las entradas en salidas. Pueden ser componentes que intervienen directamente en la transformación de las entradas, tales como máquinas, equipos, herramientas y accesorios. También pueden ser otros componentes que, a pesar de no involucrarse directamente, son un soporte para la transformación, entre los que están los instrumentos de medición, como los micrómetros, los pies de rey, los goniómetros, los altímetros, los manómetros, las termocuplas, los tacómetros, los rugosímetros, los torquímetros, etc.

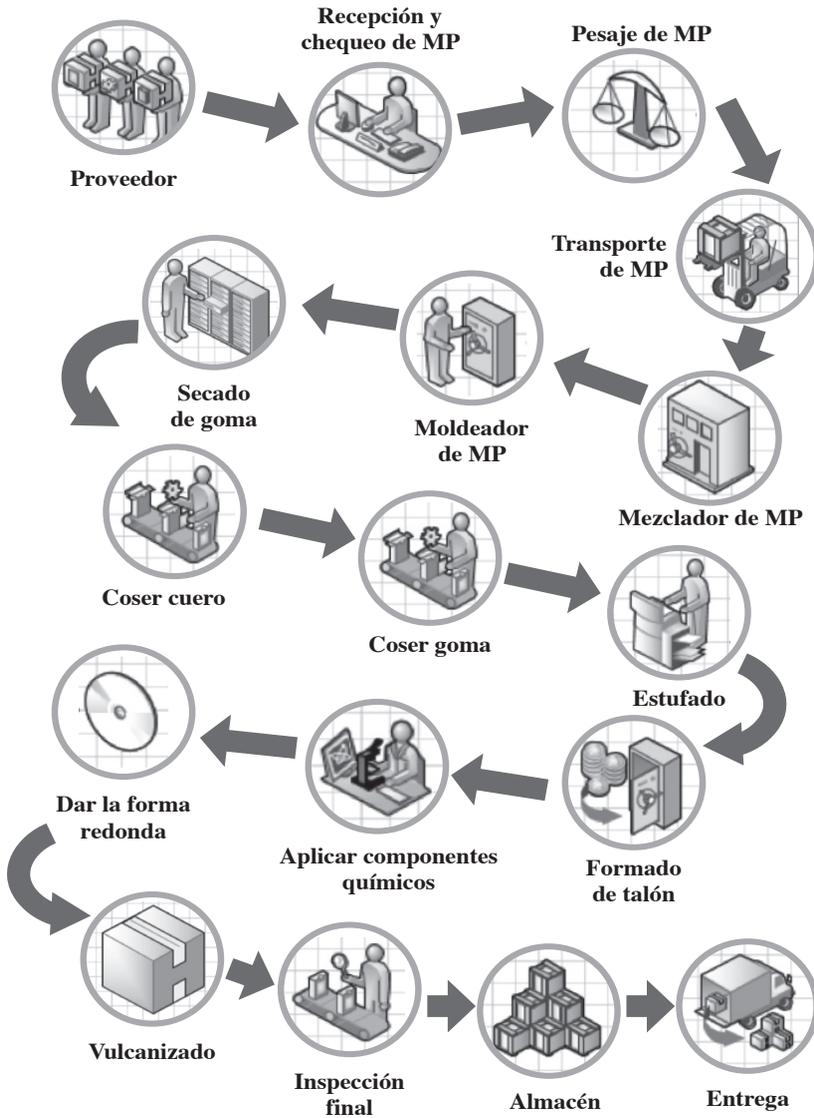
Por *ambiente interno* se entiende el medio que rodea los diferentes elementos que componen el sistema. Algunos ejemplos son las temperaturas de la planta, la humedad en los distintos sectores de los almacenes de materias primas, la cantidad de partículas por millón (ppm) en la planta de producción, los niveles de ruido que se pueden tener en las zonas donde funcionan las máquinas y equipos, el clima organizacional al interior de los diferentes procesos (el cual depende única y exclusivamente del ser humano) y las presiones sindicales que generan malestar a todo nivel, entre otros. Por su parte, el *entorno externo* se define como el contorno o ambiente que rodea la organización. A modo de ejemplo nombremos la sociedad, las

comunidades, los sectores comerciales, los sectores industriales, los barrios, las vías públicas, etc.

Las *salidas* son los resultados generados por una secuencia de actividades y pueden ser bienes tangibles o servicios. Por ejemplo, en un proceso cervecero las salidas son las bebidas alcohólicas (con los documentos que certifican la calidad de los procesos involucrados) y, adicionalmente, los servicios posventa que son suministrados por la firma. Así mismo, en una empresa de mensajería las salidas son, a la vez, los servicios de mensajería y los documentos o paquetes que se envíen a los clientes. Por último, definimos la *secuencia de actividades*, la cual involucra todas las actividades que se deben realizar para lograr la transformación de las diferentes entradas en salidas. Para ejemplificar esta secuencia, presentamos dos ejemplos: el primero, en empresas de servicios y el segundo, en empresas manufactureras.

En la figura 1.2 se presenta la secuencia de actividades en un proceso de manufactura de llantas para automóviles, desde la recepción de las materias primas (MP) hasta la entrega del producto final. La transformación propiamente dicha inicia en el secado de la goma y termina en la inspección final. Dentro de los procesos principales están: la gestión con los proveedores, la recepción y chequeo de la materia prima, el pesaje de los materiales, la movilización, la mezcla y el moldeamiento de la materia prima, el secado de la goma, la costura del cuero, la costura de la goma, el estudio físico-químico de la goma, el formado de talón, la aplicación de componentes químicos, el proceso de dar la forma redonda a la llanta, seguido por el proceso de vulcanización, la inspección final, el envío al almacén de producto terminado y la entrega.

FIGURA 1.2. Ejemplo de una secuencia de actividades en un proceso de fabricación de llantas.

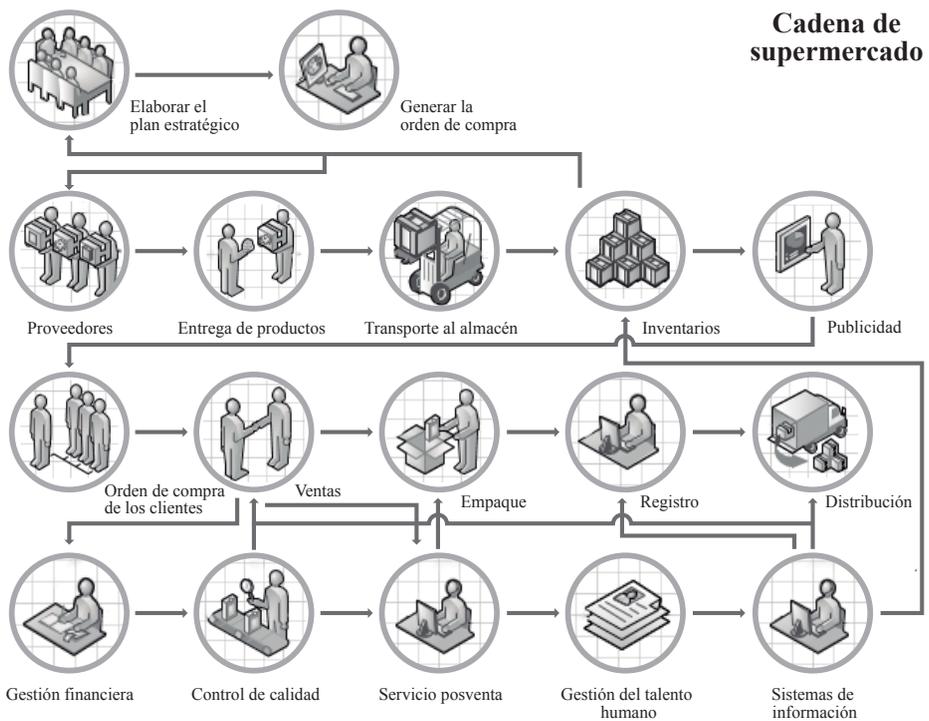


Secuencia elaborada por el autor.

Por su parte, la secuencia de pasos en la actividad de servicios de paquetería (ver figura 1.3) inicia cuando se genera la orden de compra y termina con los sistemas de información, e incluye actividades tales como la elaboración de

un plan estratégico, la gestión con los proveedores, la entrega de productos, el transporte al almacén, la gestión de inventarios, la publicidad, las órdenes de compra, las ventas, el empaque, el registro y la distribución de paquetes. Todos estos procesos están apoyados por la gestión financiera, el control de calidad, el servicio posventa, la gestión del talento humano y los sistemas de información. La secuencia de las diferentes actividades que se presentan en la figura 1.3 representa el sistema completo que puede apreciarse en una cadena de supermercado. Por ejemplo, la gestión del talento humano puede tener una relación directa con el empaque en el caso de que se requiera una capacitación o un entrenamiento para el sellado y la identificación del producto.

FIGURA 1.3. Ejemplo de una secuencia de actividades en un proceso de servicio de paquetería.



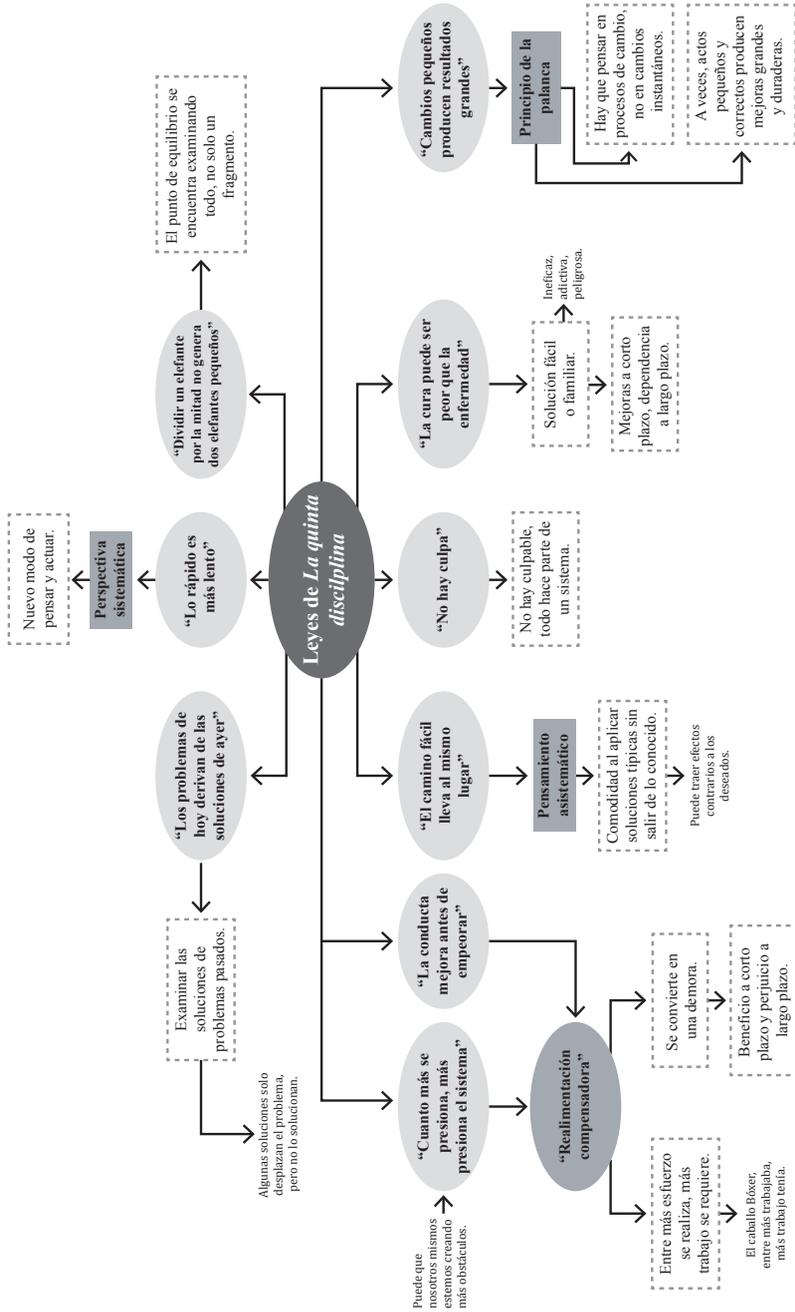
Secuencia elaborada por el autor.

Para concluir lo dicho sobre el funcionamiento de la secuencia de actividades de un sistema, vale la pena traer a colación el libro *La quinta disciplina*, de

Peter Senge [2] (ver figura 1.4), en el que el autor refiere cinco disciplinas para la resolución de los problemas grupales de una organización. Estas disciplinas son el dominio personal, los modelos mentales, la construcción de una visión compartida, el aprendizaje en equipo y el pensamiento sistémico. La primera, el dominio personal, alude al aprendizaje y al crecimiento de la persona mediante el establecimiento de visiones a largo plazo, con el mejoramiento y el permanente cambio de las situaciones que se presentan día a día en las organizaciones. La segunda disciplina, los modelos mentales, se pregunta por la forma de entender el mundo que nos rodea y la manera de proceder en él mediante la generación de nuevos modelos y sistemas. La tercera disciplina propone construir una visión que integre no solo el pensamiento individual, sino también lo que piensan los demás. La cuarta disciplina propone implementar el trabajo en equipo mediante la alineación de las acciones y las capacidades de todos los funcionarios que conforman un determinado sistema en una sola dirección, la cual debe dirigir al éxito de las organizaciones.

La quinta disciplina propone la instauración de un pensamiento sistémico, el cual facilita las interrelaciones entre los diferentes elementos que conforman un determinado sistema. Estos elementos actúan como un todo y este sistema utiliza ciertas herramientas, dentro de las que están el entendimiento de las leyes fundamentales, los círculos de causalidad (que permiten tener una responsabilidad compartida), la retroalimentación y el equilibrio (que permite obtener la solución de problemas originados por demoras de tiempo). Dentro de las herramientas del pensamiento sistémico está, además, la aplicación del principio de la palanca, según el cual con pequeñas acciones se pueden obtener significativas mejoras dentro de cualquier organización. Y, finalmente, la quinta disciplina contempla también otro principio a partir del cual se debe optar por mantener un equilibrio en la información. Senge explica esto con la frase “ver los árboles, sin mostrar el bosque”, lo que significa que no toda la información que se maneja en la organización la deben conocer todos los funcionarios internos o externos a esta. El líder de la empresa debe saber cómo y a quién suministrar toda esa información y qué partes presentar a sus colaboradores.

FIGURA 1.4. Mapa conceptual, sobre el libro de Peter Senge *La quinta disciplina*.



Elaborado por el autor

1.1. Tipos de sistemas

1.1.1. Sistema estático

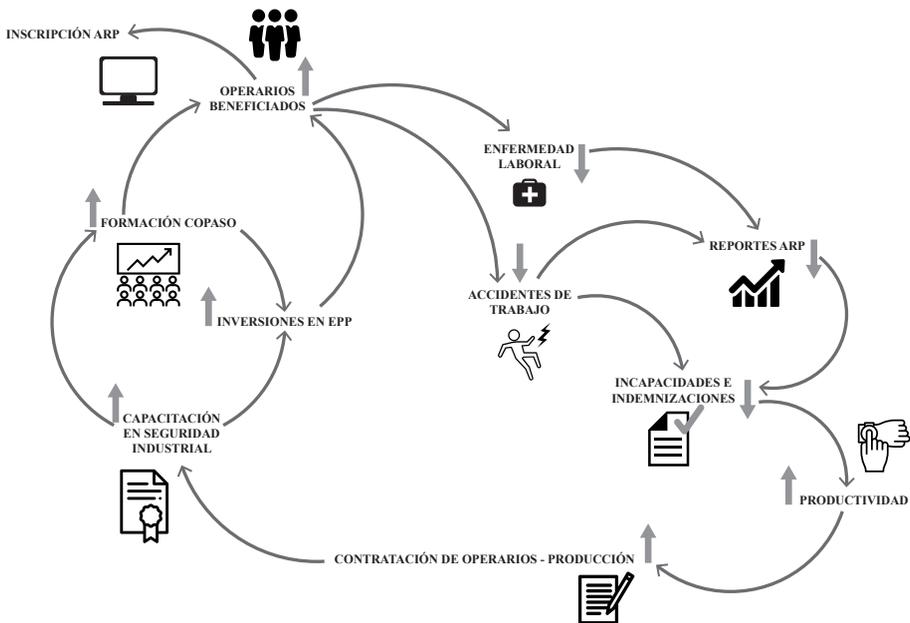
Se llaman estáticos aquellos sistemas cuyos componentes son invariables en el tiempo. Para ejemplificar el estado estático pensemos en una viga, que está fija y es invariable, y en un vaso con agua, que está inmóvil. Los sistemas estáticos se pueden convertir en dinámicos en el momento en el que una fuerza externa actúe sobre aquellos y, así, cambie su posición original. De la misma forma, podemos hablar de sistemas estáticos naturales, como las montañas o las grandes rocas inmóviles. Si en determinada situación se presentara un fenómeno natural, como un temblor o un terremoto, tanto el sistema de montañas como las rocas pueden tener un movimiento limitado. Dado el enorme tamaño de ambas, solo así sería posible que aquellas cambiaran su estado estático.

1.1.2. Sistema dinámico

Se llaman dinámicos aquellos sistemas cuyos diferentes componentes varían con el transcurso del tiempo. El sistema dinámico puede ser de dos categorías: uno de orden natural, como el sistema de cascadas y montañas o el sistema planetario que rodea el Sol, y otro que es creado por el hombre, por ejemplo, un sistema logístico de servicios de entrega de paquetería (ver figura 1.5) o un sistema de gestión en salud y seguridad industrial. Cualquier cambio presentado en los sistemas dinámicos naturales es ocasionado, justamente, por razones netamente naturales; en cambio, en los otros tipos de sistemas dinámicos las variaciones que se presentan se dan por la mano del hombre, que, en los ejemplos citados (el sistema logístico y el sistema de gestión), puede ser la mano de un ingeniero industrial.

El sistema de servicios de entrega de la figura 1.8 inicia con la necesidad del cliente. A este punto de partida le siguen los despachos de mercancías, con ciertas tarifas y bonificaciones, y se incluyen las garantías, los servicios sustitutos y el servicio al cliente. También se incluyen en este sistema los criterios de selección de mercancía, el control del proceso, los tiempos de entrega, así como la recepción de quejas y reclamos. De igual forma, se involucran actividades de dimensionamiento de cargas, de pesaje de mercancías y el respectivo costeo de los embalajes. Adicionalmente, el sistema incluye los medios de pago, los medios de reparto y la cobertura.

FIGURA 1.6. Ejemplo de sistema dinámico no natural: sistema de gestión en salud y seguridad industrial.



Tomado de un trabajo presentado por Angélica Morales González y Lady Milena Poveda Muñoz para la asignatura Simulación II, Universidad Militar Nueva Granada, 2012.

En el sistema de gestión en salud y seguridad industrial de la figura 1.9, los elementos que se incluyen son la inscripción a la administración de riesgos profesionales (ARP), los operarios beneficiarios, la formación del comité paritario de salud ocupacional (COPASO), las inversiones en elementos de protección personal, las enfermedades laborales, los accidentes de trabajo, los reportes de la ARP, las incapacidades e indemnizaciones, los comportamiento de la productividad y las contrataciones de los operarios.

1.2. Modelos

El modelo es la representación de la estructura y la forma de un determinado sistema. Los modelos pueden clasificarse de la siguiente manera.

1.2.1. Modelos físicos

Los modelos físicos son aquellos que representan la forma del sistema. Ejemplos de esta clase de modelos son las maquetas, los prototipos y las esculturas. La maqueta representa, a escala, un sistema real. Este tipo de representación física tiene como ventaja principal el hecho de permitir la realización de modificaciones posteriores en el sistema real, pues reduce los costos y los posibles problemas que puedan encontrarse, en un futuro, en el diseño de la construcción.

El prototipo es una representación idéntica, desde el punto de vista técnico (incluye propiedades fisicoquímicas), de un determinado producto (ver figura 1.7). Este tipo de representación puede ser un modelo, una demostración o una simulación fácilmente extensiva y transformable de un sistema concebido que probablemente contiene las interfaces y los aspectos que conciernen a su funcionalidad, tanto lo que tiene que ver con los accesos al sistema como con los éxodos del mismo. Existen tres tipos de prototipos: el alfa, el beta y el de producción piloto.

Los prototipos alfa se emplean, por lo general, para evaluar si el producto funciona como se pretende. Las partes de los prototipos alfa son a menudo semejantes, en cuanto a material y geometría, a las piezas que se usarán en la versión manufacturada del producto; pero, en general, se hacen con procesos de producción propios de los prototipos. Por ejemplo, las piezas de plástico en un prototipo alfa pueden maquinarse o moldearse en hule, en lugar de moldearse por inyección, como se hace propiamente en la producción. Los prototipos beta se emplean, por lo general, para evaluar la confiabilidad y para identificar defectos en el producto. Los prototipos de preproducción son los primeros productos que se hacen con todo el proceso de producción, aunque en este punto dicho proceso no opera todavía con su plena capacidad y se fabrican cantidades limitadas del producto. Estos prototipos se usan para verificar la capacidad del proceso de producción, por ello se someten a más pruebas y, con frecuencia, se ofrecen a clientes preferidos. Los prototipos de preproducción reciben a veces el nombre de prototipos de producción piloto [13].

FIGURA 1.7. Prototipo experimental de los automóviles Audi TTS 2.0 y Volvo S-60, vehículos de última generación.



Fotografía del álbum personal del autor, Feria Internacional del Automóvil en Bogotá, 2010.

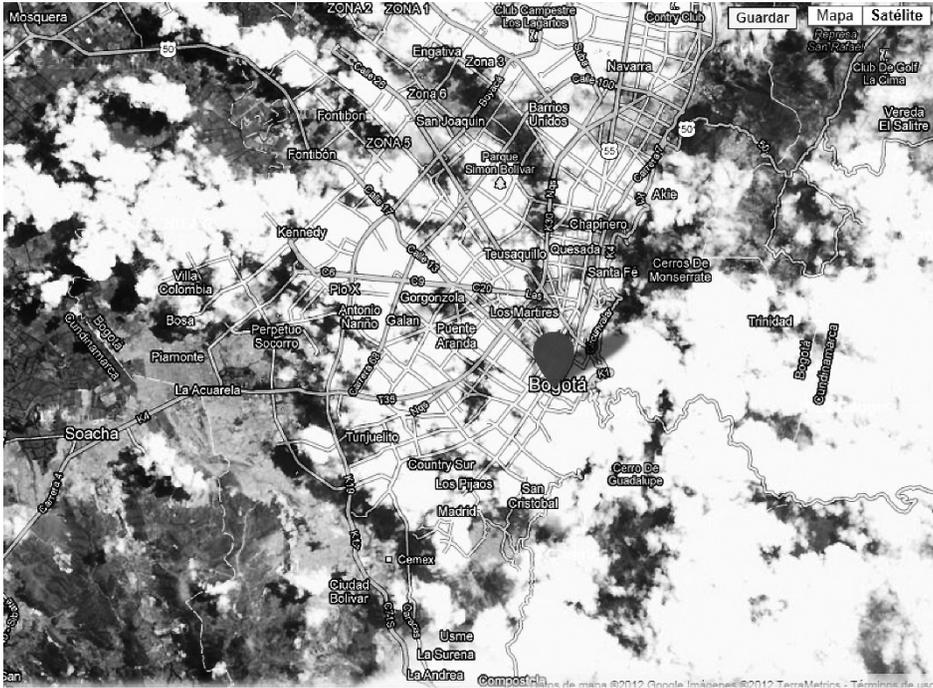
Por último, señalemos que la escultura es el arte de modelar, tallar o esculpir un material (barro, piedra, madera, metal, etc.) con el fin de representar figuras en tres dimensiones. A diferencia de la pintura, que es plana, las esculturas tienen volumen, ocupan un espacio determinado y pueden ser apreciadas no solo de frente, sino desde distintos puntos de vista.

1.2.2. Modelos análogos

Los modelos análogos son aquellos que representan un sistema o un proceso de forma material, con el propósito de validar su inicio, su estructuración y su operatividad. Como ejemplos de este tipo de modelos están los mapas georeferenciados, los mapas de carreteras, los planos de productos, las gráficas de control, los diagramas de barras y la simulación de sistemas. El mapa georeferenciado (ver figura 1.8) es la localización en el espacio de un objeto, dentro de un sistema de coordenadas determinado. Una imagen de satélite, al igual que las fotografías aéreas, no proporciona información georeferenciada y, además, puede sufrir una serie de distorsiones, similares a las de los fotogramas, debidas a los movimientos del satélite. Las correcciones necesarias para restaurar en cada punto de la imagen las coordenadas reales se basan en ecuaciones polinomiales que permiten modificar, de forma flexible, las características finales de la imagen. El orden del polinomio determina la flexibilidad del ajuste y de

la transformación. Normalmente se emplean transformaciones de tipo lineal, cuadrático o cúbico [14].

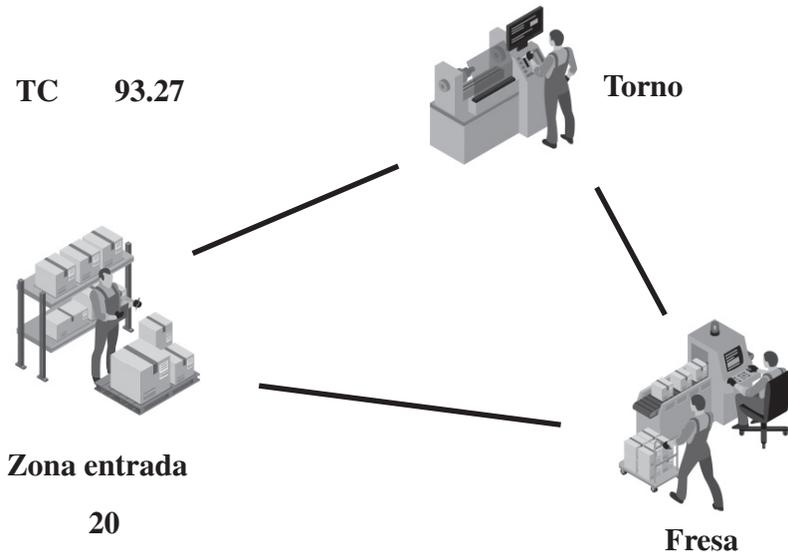
FIGURA 1.8. Mapa georeferenciado de Bogotá, Colombia.ty.



Tomado de: MAP DATA, http://www.gosur.com/en/colombia/bogota-mapa/?gclid=CJzE0o3xwbIC-FQ4nAodgkIA_w. Copyright 2012 por Google, INEGI, Inav/Geosistemas SRL, Maplink, map ci

El plano de un producto es una representación gráfica en la que se incluye tanto la información visual, basada en líneas y elementos geométricos, como la información tecnológica, apoyada en convencionalismos y símbolos [15]. La simulación discreta (ver figura 1.9) es considerada un modelo análogo y es definida como un conjunto de relaciones lógicas, matemáticas y probabilísticas que integran el comportamiento de un sistema (que está bajo estudio) cuando se presenta un evento determinado. El objetivo del modelo de simulación consiste, precisamente, en comprender, analizar y mejorar las condiciones de operación relevantes del sistema [16].

FIGURA 1.9. Simulación discreta de un sistema de producción metalmecánico.



Tomado de *Simulación con ProModel. Casos de producción y logística*, p. 4, por L. Blanco-Rivero e I. Fajardo-Piedrahita, Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería, 2003. Copyright 2003 por Escuela Colombiana de Ingeniería.

1.2.3. Modelos simbólicos o matemáticos

Los modelos simbólicos representan el comportamiento de un determinado sistema a través del uso de ecuaciones matemáticas. Por ejemplo, en sistemas de líneas de espera, se puede medir el desempeño de la cola mediante algunas expresiones de tipo matemático, con base en la distribución del tiempo entre cada llegada y el tiempo del servicio. De la misma forma, en el manejo de inventarios con demanda estocástica se utiliza el cálculo integral y el cálculo diferencial para el desarrollo matemático, lo que permite saber cuál es la cantidad económica que debe pedir la empresa por cada referencia de producto. Un último ejemplo son las cadenas de Markov, en las que se utilizan diversas operaciones matriciales que permiten saber cuáles son, en probabilidad, los estados futuros de la naturaleza actual y, además, facilitan el manejo de procesos secuenciales en los que existen estados absorbentes. A continuación, se presentan tres ejemplos de modelos matemáticos aplicados a la ingeniería industrial (ecuaciones 1.1, 1.2 y 1.3), tomados de tres fuentes distintas.

a) Modelo matemático de líneas de espera [17].

$$P_0 = \left(\sum_{n=0}^{S-1} \frac{\rho^n}{n!} + \frac{\rho^S \left(1 - \left(\frac{\rho}{S}\right)^{N-S+1}\right)}{S! \left(1 - \frac{\rho}{S}\right)} \right), \frac{\rho}{S} \neq 1 \quad (1.1)$$

b) Modelo matemático de inventarios estocásticos [18].

$$E[C(S)] = c(S - I) + h \int_0^S f(D)(S - D)dD + p \int_S^\infty (D - S) f(D)dD \quad (1.2)$$

c) Modelo matemático de cadenas de Markov absorbentes [19].

$$P = (I - N)^{-1}A \quad (1.3)$$

1.3. Simulación continua o dinámica de sistemas

La simulación continua consiste en la representación formal del comportamiento de un sistema real en función del tiempo y tiene como soporte un modelo con ecuaciones diferenciales. El soporte fundamental de la dinámica de sistemas, también llamada simulación continua, es la teoría general de los sistemas, en particular lo que se refiere a la representación matemática de los sistemas de la naturaleza. La estructura de un modelo de dinámica de sistemas se conforma de las siguientes partes.

1.3.1. Elementos

Se denominan elementos los componentes claves que constituyen el sistema descrito, los cuales representan, de forma abreviada, alguna característica que conforma el sistema real que se pretende constituir. Por lo general, existen menos componentes en el modelo de dinámica de sistemas que en el sistema real que se quiere estudiar. Ejemplos de estos elementos son el flujo de productos por unidad de tiempo que entran en un almacén, la cantidad inventariada en

una bodega de materias primas, la tasa de producción de cierto componente, los metros cúbicos de agua que salen por minuto de un tanque de reserva, los kilovatios hora (kWh) que se transmiten por una línea de tensión a un bloque de apartamentos, entre otros.

1.3.2. Redes de comunicación

Los elementos o componentes de los sistemas están interrelacionados e interactúan entre sí por medio de redes de comunicación. Existen, por ejemplo, las redes de acueductos y alcantarillados, las redes telefónicas, las carreteras que comunican diferentes departamentos, ciudades o municipios, las redes neuronales que conectan todas las partes del cuerpo humano con el cerebro, las redes de hidrocarburos en las que se permite el paso de derivados del petróleo a través de diversos ductos que conducen a variadas poblaciones, las redes que llevan energía eléctrica a través de las diversas ciudades de Colombia, las redes de transporte público que permiten la movilización de usuarios a través del sistema integrado de transporte, etc.

1.3.3. Límites

Los límites son características que, como lo dice su nombre, permiten delimitar el punto hasta el que va el sistema real e incluso permiten determinar si un componente es integrante del sistema contemplado, o si no lo es. Pueden existir límites físicos, jurídicos y mentales. Están, por ejemplo, la capacidad instalada de una máquina, las especificaciones establecidas en un proceso de producción, las normas que aplican a la manufactura de un producto o un proceso industrial, los decretos medioambientales que regulan el manejo de vertimientos de sólidos y líquidos en desagües y alcantarillados, las normas sobre la salud ocupacional y la seguridad industrial en los puestos de trabajo, las restricciones que se tienen en lo que respecta a la forma ética y moral en que se debe actuar en la industria y en la sociedad colombiana en general, entre otros.

1.4. Antecedentes históricos de la dinámica de sistemas

La simulación continua, llamada también dinámica de sistemas, es un conjunto de procedimientos racionales utilizados para alcanzar una gama de objetivos que son requeridos para el estudio y el manejo de sistemas de realimentación complejos. Una de las características de esta disciplina es la necesidad de utilizar un computador para realizar las simulaciones, lo que permite estudiar el comportamiento y las consecuencias generadas por los cambios efectuados en los diferentes elementos que constituyen un sistema a través del tiempo. Por eso, las simulaciones se usan en el estudio de sistemas industriales, debido a la inmensa cantidad de elementos presentes y sus interrelaciones, pues en estos sistemas la presencia de elementos no lineales determina el comportamiento y genera una mayor complejidad en la solución analítica. Así mismo, las consecuencias de los cambios y las acciones realizadas sobre los sistemas industriales se presentan en horizontes temporales disímiles y prorrogados. Esta situación obstaculiza la implementación de laboratorios de prueba en los que se puedan ensayar otros escenarios que faciliten la visualización de efectos sobre un sistema en estudio.

Efectivamente, los modelos de dinámica de sistemas permiten el análisis cuando varían ciertos parámetros que son claves para el adecuado funcionamiento del sistema o cuando hay cambios en las políticas administrativas u operativas de una organización. Estos modelos permiten también la verificación de los resultados provocados por la toma de decisiones a nivel ingenieril, por las modificaciones en la distribución de la planta de una firma industrial y por las demoras que, de una u otra forma, influyen en el desarrollo y en la estabilidad de un determinado sistema. Hoy en día su ámbito de aplicación a nivel industrial involucra, entre otros, la planificación y el diseño de políticas organizacionales, la gestión de sistemas de calidad, la implementación de sistemas de seguridad industrial, la gestión de sistemas medioambientales, el análisis de la operación en procesos industriales, la verificación del comportamiento de sistemas financieros, el análisis y el progreso de una investigación de mercados, el flujo de productos e información en la cadena logística de abastecimiento y el mejoramiento de procesos en los que se establece el control estadístico de calidad.

Los antecedentes de la dinámica de sistemas están en la Segunda Guerra Mundial, pues con ella se desarrollaron los primeros computadores, que facilitaron la ejecución de trabajos en el campo científico. En 1940, gracias a

Norbert Wiener, matemático estadounidense, aparece la cibernética (tanto a nivel informático como a nivel de la automatización), nueva realización científica cuyo propósito es el estudio del control de dos sistemas fundamentales, el animal y la máquina, así como el estudio de la comunicación entre ambos. Wiener, considerado el fundador de la cibernética, recalcó la importancia de realizar estudios entre diversas disciplinas y encontró que los procesos retroalimentados son un común denominador en una amplia gama de sistemas.

En 1954, el biólogo Ludwig von Bertalanffy afianzó el concepto de teoría general de los sistemas, aplicándolo a las representaciones matemáticas de los sistemas definidos por la naturaleza. Se trató de una concepción totalizadora de la biología según la cual se conceptualizaba al organismo como un sistema abierto, en constante intercambio con otros sistemas circundantes, por medio de complejas interacciones. Además, Bertalanffy logró utilizar los principios expuestos en su teoría para poder explicar la concepción humanista de la naturaleza humana, con lo cual se oponía duramente a la robótica.

La teoría general de los sistemas, además, alcanza un acumulado de enfoques que difieren en forma e intención, entre los cuales están la teoría de conjuntos (Mihajlo D. Mesarovic), la teoría de las redes (Anatol Rapoport), la cibernética (Norbert Wiener), la teoría de la información (Claude Elwood Shannon y Warren Weaver), la teoría de los autómatas (Alan Turing), la teoría de los juegos (John von Neumann), entre otros. El enfoque sistémico se desarrolló gracias a una serie de investigaciones efectuadas por el Instituto Tecnológico de Massachusetts, la Universidad de la Sorbona de París y la Universidad Libre de Bruselas. En 1955, aparece la biónica, la inteligencia artificial y los robots industriales. El máximo exponente del enfoque sistémico, en esta época, fue el neurólogo y cibernético Warren Sturgis McCulloch.

La dinámica de sistemas como tal fue desarrollada en la década del sesenta gracias al ingeniero Jay Wright Forrester. Sus aportes se materializaron en tres documentos importantes: el libro *Industrial Dynamics*, de 1961, que analiza diversos sistemas comerciales y de gestión, como el control de inventarios, la logística y la toma de decisiones; el libro *Urban Dynamics*, de 1969, que estudia los problemas de la sociedad urbana, como el hacinamiento y el deterioro de las ciudades; y el libro *World Dynamics*, de 1971, que trata problemas como el crecimiento demográfico y la contaminación a escala global. En 1970, en el informe al Club de Roma, coordinado por Donella H. Meadows, se presentó el modelo del mundo, para el que se utilizó la dinámica de sistemas. Estos escritos y su discusión difundieron la dinámica de sistemas a nivel mundial.

1.5. Beneficios de la simulación continua

- ▶ Realizar pruebas en sistemas reales puede generar costos excesivamente altos. Por ejemplo, si se realizan variaciones en las cantidades de productos transportados por unidad de tiempo en una red de distribución se podrían generar excesos de inventarios o déficit de productos, en algunos casos. Esto incurriría en costos de almacenamiento, en costos de faltantes y, en ciertas situaciones, en costos de oportunidad.
- ▶ Efectuar ensayos en sistemas reales puede provocar el deterioro y, en algunos casos, la destrucción de la realidad. Si en una empresa petrolera se incrementa la presión en los ductos con el propósito de aumentar el caudal de hidrocarburo que sale por minuto, se pueden presentar explosiones en la refinería, lo que ocasionaría, además de las pérdidas humanas, un desastre ecológico y medioambiental.
- ▶ En muchas ocasiones, la realización de experimentos con un sistema real puede ser riesgoso para la vida del ser humano. Por ejemplo, si en una línea generadora de energía eléctrica se realizan incrementos exagerados en los kilovatios hora (kWh) que se transmiten, se pueden presentar sobrecargas y cortos circuitos en las redes comunitarias, lo que se convierte en un riesgo para la vida de los ciudadanos.
- ▶ La simulación continua permite la variación de la escala de tiempo real, al prolongarla o recortarla, lo que permite el análisis de situaciones que podrían generarse a raíz de estas modificaciones. Por ejemplo, un sistema de inventarios de productos terminados, que es controlado en lapsos de tiempo semanal, puede ser sometido a cambios interesantes si se efectúa el análisis en intervalos diarios. Esto permite un análisis más preciso del comportamiento de la demanda del producto final.
- ▶ La simulación continua representa, de forma sinérgica, los distintos elementos que constituyen un sistema determinado. Además, facilita la estructuración y el análisis de distintos escenarios generados con los cambios en las diferentes variables que componen el sistema.
- ▶ Con la simulación es posible obtener soluciones analíticas, de manera que los componentes del sistema puedan ser valorados en cualquier instante de tiempo y también que las condiciones del medio puedan establecerse para distintas formas de comportamiento.
- ▶ La simulación permite la inclusión de factores no lineales, de demoras y de un número extremadamente grande de variables.