

**EL APRENDIZAJE DE LA FÍSICA GENERAL ASISTIDO POR EL PENSAMIENTO EN PROCESOS**

EL APRENDIZAJE ASISTIDO POR EL PENSAMIENTO EN PROCESOS

AUTORES: José Raúl Díaz López<sup>1</sup>César Mesa Navarro<sup>2</sup>DIRECCIÓN PARA CORRESPONDENCIA: [jrdiaz@uo.edu.cu](mailto:jrdiaz@uo.edu.cu)

Fecha de recepción: 29 - 09 - 2017

Fecha de aceptación: 13 - 11 - 2017

**RESUMEN**

Existen insuficiencias en la comprensión por los estudiantes de los fenómenos transitorios en los circuitos eléctricos. Ellas se manifiestan en una limitada capacidad para resolver problemas y de explicar la generación de oscilaciones electromagnéticas y otros fenómenos en la asignatura “Electromagnetismo” en los cursos de Física General para las carreras de ingeniería. En el trabajo se aborda el proceso de aprendizaje de estos fenómenos desde la perspectiva dinámica y sistémica (enfoque de procesos) que parte de la construcción de un modelo físico conceptual y su posterior formalización en un diagrama de Forrester, de manera que se abre un mayor espacio a la participación de los estudiantes en el proceso de modelización del objeto físico a partir de sus observaciones del fenómeno y del conocimiento previo, lo cual facilita la construcción de significados y sentidos desde una posición de mayor compromiso en el proceso de aprendizaje y contribuye a elevar la motivación.

**PALABRAS CLAVE:** aprendizaje; dinámica de sistemas; diagramas de Forrester; enfoque de procesos

**THE LEARNING OF GENERAL PHYSICS ASSISTED BY THE THOUGHT IN PROCESSES...****ABSTRACT**

There are gaps in understanding by students of transient phenomena in electrical circuits. They are manifested in a limited capacity to solve problems

---

<sup>1</sup> Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Titular Consultante, imparte docencia de Física General para las carreras de ingeniería en el Departamento de Física Aplicada de la Universidad de Oriente, con 45 años de experiencia. Tiene numerosas publicaciones y ponencias presentadas a eventos internacionales en Cuba y el extranjero sobre la innovación tecnológica y sistemas de generación de electricidad solar fotovoltaica. Realizó una estancia posdoctoral en el Royal Institute of Technology (KTH, Estocolmo, Suecia) y ha participado en varios proyectos y conferencias internacionales CYTED sobre utilización de fuentes renovables de energía. Impartió una conferencia magistral en la Universidad Autónoma de Puebla en el marco del V Congreso Internacional de Ingeniería Industrial en octubre de 2007, sobre el enfoque sistémico de la modelación para la gestión de procesos.

<sup>2</sup> Máster en Ciencias de la Educación Superior. Jefe del Departamento de Física Aplicada. Facultad de Ciencias Naturales y Exactas. Universidad de Oriente. Con más de 38 años de experiencia en la enseñanza de la Física Universitaria. [cmesa@uo.edu.cu](mailto:cmesa@uo.edu.cu)

and explain the generation of electromagnetic oscillations and other phenomena in the course "Electromagnetism" in courses of General Physics for engineering careers. At work the learning process of these phenomena is approached from the perspective dynamic and systemic (process approach) that part of the construction of a conceptual physical model and its subsequent formalization in a diagram of Forrester, so that opens higher room for student participation in the process of modeling the physical object from its observations of the phenomenon and prior knowledge, which facilitates the construction of meanings and senses from a position of greater engagement in the learning process and it contribute to increase motivation.

**KEYWORDS:** learning; dynamic of systems; Forrester diagrams; process approach

## INTRODUCCIÓN

En el proceso de aprendizaje de la Física juega un papel relevante la capacidad de reproducir mentalmente las características principales del objeto de estudio y sus relaciones funcionales, lo cual forma una parte importante de la comprensión.

La comprensión de un fenómeno, durante el complejo proceso de aprendizaje, incluye la modelización del objeto de estudio, durante el cual se relacionan elementos tangibles e intangibles que caracterizan a dicho objeto con la finalidad de describir su comportamiento en un determinado contexto, haciendo abstracción de los aspectos menos relevantes.

El resultado de este proceso de comprensión presenta insuficiencias que se manifiestan en la incapacidad de los estudiantes de explicar los diferentes fenómenos y procesos físicos que forman parte del contenido de las asignaturas empleando las teorías establecidas en la Física así como interpretar adecuadamente el contenido de los problemas académicos y semiprofesionales a través de los cuales se pretende consolidar los conocimientos.

El problema se agudiza en aquellos contenidos que no tienen un evidente reconocimiento sensorial como es el caso de los fenómenos electromagnéticos y donde las mediciones con instrumentos eléctricos realizan una función mediadora.

Un recurso que ha demostrado algunos resultados alentadores es la introducción de elementos metacognitivos en el proceso de instrucción que se concreta en la modelización deliberada del objeto de estudio.

La modelización tradicionalmente incluye la formalización mediante ecuaciones diferenciales o sistemas de ellas, lo que en muchos casos conlleva engorrosos cálculos que distraen de la comprensión física del proceso bajo estudio, así como las dificultades en la interpretación de los resultados.

La Dinámica de Sistemas, resultado del pensamiento sistémico moderno, ofrece una nueva perspectiva para el estudio de procesos complejos basada en la teoría del control y los principios de conservación.

El pensamiento sistémico junto a la Dinámica de sistemas, como método de modelización y comprensión de la realidad, constituyen el llamado pensamiento basado en procesos, donde la idea de la transformación, como manifestación de la realidad objetiva, queda explícita. Ello se constituye en una nueva perspectiva o enfoque desde el cual abordar, con mayor eficiencia, la comprensión de fenómenos dinámicos que resultan de gran complejidad tales como los electromagnéticos, debido a la estrecha interrelación entre los campos eléctrico y magnético.

En este trabajo se pretende ilustrar las potencialidades del enfoque de procesos para la mejor comprensión de los fenómenos transitorios que ocurren en los circuitos eléctricos mediante la modelización y la simulación dinámica de sistemas.

## DESARROLLO

La Dinámica de Sistemas constituye uno de los elementos esenciales del llamado pensamiento basado en procesos, como lo señala Emblemsoev, Jan (2000) y Díaz, J. Raúl. (2008), constituyéndose en una metodología idónea para la representación y descripción de los fenómenos electromagnéticos, en los que se manifiesta la interrelación entre los campos eléctrico y magnético que da lugar a transformaciones del estado de los sistemas. Estas transformaciones son el contenido esencial de los procesos. Por esto es común hablar de “procesos electromagnéticos”, tal como la generación y propagación de oscilaciones y ondas electromagnéticas.

La Dinámica de Sistemas es una disciplina científica creada por el ingeniero electricista Jay W. Forrester, profesor del Sloan School del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT), durante la década de 1950, a partir de los esfuerzos anteriores de otros dos profesores de la misma universidad: el físico Vannevar Bush y el matemático Norbert Wiener, Forrester, Jay (1989), los que a su vez se inspiraron en el trabajo del biólogo y filósofo, creador de la llamada Teoría General de Sistemas, Bertalanffy, Ludwig (1968). Inicialmente ella se aplicó al campo de la ingeniería y la gerencia industrial, particularmente al estudio de las oscilaciones en inventarios y ventas de las empresas industriales. Sus estudios fundacionales se publicaron en el libro *Industrial Dynamics*, Forrester, Jay (1961). Al igual que ocurre en la automática, la búsqueda de los lazos de realimentación que operan dentro de un sistema y la forma en que estos determinan el comportamiento dinámico del mismo constituye la tarea central en la Dinámica de Sistemas.

Un aspecto notable de los modelos conceptualizados y formalizados en la Dinámica de Sistemas, es su enorme capacidad descriptiva. Ellos se representan primeramente como esquemas o mapas de influencias cualitativos que luego se formalizan en diagramas conocidos como diagramas de flujo o

diagramas de Forrester, que pueden implementarse para la simulación en computadora bajo determinadas reglas y entornos de software. La claridad de estos esquemas, como representación de la estructura global del sistema en transformación y de las relaciones entre los elementos constituyentes, es tan alta que pueden ser comprendidos fácilmente incluso por personas no especialistas, lo cual posibilita su crítica y confiabilidad fundamentadas en evidencias explícitas de las hipótesis utilizadas en su construcción. Esto resulta de extraordinaria importancia pues, aceptar la simulación en computadora como medio para conocer la realidad suele ser más un ejercicio de fe en los modeladores que de análisis racional de los modelos, los cuales resultan muchas veces inaccesibles a la mayor parte de la comunidad científica.

En la modelización tradicional, no sistemodinámica, se pone énfasis en la ejecución y explotación de modelos conocidos, sin que signifique aportación alguna al conocimiento porque las leyes son ya conocidas al disponerse de una determinada teoría. La computadora, en este caso, facilita la obtención de resultados cuantitativos precisos en situaciones donde no hay soluciones analíticas y los cálculos pueden resultar engorrosos.

En la modelización con Dinámica de Sistemas se produce una relación diferente, en la que el modelador construye un modelo a partir de hipótesis dinámicas que implementa en la computadora para obtener sus consecuencias dinámicas inmediatamente, a través de la simulación. De esta manera, se complementa la gran capacidad de la mente humana para establecer relaciones estructurales, con la gran capacidad de ejecución del conjunto de relaciones constituyentes del modelo que tiene la computadora, con unicidad en la respuesta. Por lo tanto, la Dinámica de Sistemas es, ante todo, un método de construcción de modelos.

En la primera fase de la conceptualización de un modelo se requiere definir el propósito del mismo Randers, Joergen (1980), lo que significa decidir qué elementos se tomarán en cuenta y qué influencia ejercen unos sobre otros, por lo que el interés se centra en la variación con el tiempo del valor cuantitativo atribuido a cada elemento (variable), las influencias buscadas son aquellas que se manifiestan en el aumento o disminución de una variable en función de otra, de la cual depende. Una forma de representar elementos y relaciones es mediante un grafo orientado y signado, representando lo último el sentido de la influencia (directa o inversa). Un grafo con esas características se conoce como diagrama causal o de influencias Aracil, Javier (1995).

Por ejemplo, en el proceso demográfico, los nacimientos influyen directamente en la población, lo cual se representa en el diagrama de influencias de la Fig. 1.

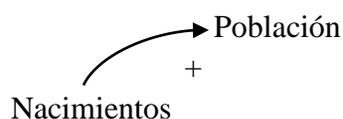


Figura 1. Diagrama de influencias en el proceso demográfico

En muchos procesos, trabajados en la Dinámica de Sistemas, aparecen relaciones de influencia estructuradas en lazos cerrados o de realimentación, de manera que una acción realizada por o sobre un elemento del lazo, se propaga por el mismo de manera que esa acción influye sobre sus propios valores futuros, distinguiéndose dos tipos de lazos: positivos o de reforzamiento y negativos o de control. En la Fig. 2 se muestra un ejemplo de cada tipo de lazo.

Desde el punto de vista dinámico un lazo positivo tiende a producir crecimiento o decrecimiento ilimitado, mientras que un lazo negativo tiende a producir equilibrio. Un modelo sistemodinámico está siempre estructurado como un conjunto de lazos positivos y negativos interconectados entre sí y su comportamiento dinámico dependerá del predominio entre la tendencia a crecer o decrecer de los unos y la tendencia al equilibrio de los otros.

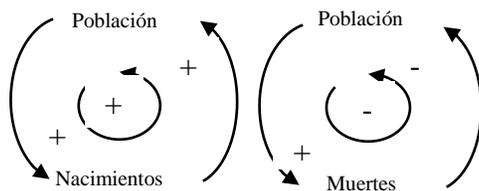


Figura 2. Lazos de realimentación positivo y negativo

En Dinámica de Sistemas los diagramas de influencia son punto de partida para el establecimiento de los diagramas de Forrester en los que aparecen tres tipos de variables:

- Los niveles, que suponen la acumulación en el tiempo de una cierta magnitud. Son variables de estado del sistema, pues sus valores determinan la situación en la que se encuentra el mismo.
- Los flujos, que expresan de manera explícita la variación por unidad de tiempo de los niveles, como el flujo de agua expresa la variación del nivel en un tanque.
- Las variables auxiliares, que son variables de ayuda en el modelo, colaborando en la definición de las variables de flujo y en documentar el modelo haciéndolo más comprensible.

Todo nivel posee uno o más flujos asociados, mientras que las variables auxiliares se enlazan a estos mediante relaciones de información. Un lazo de realimentación siempre incluye un nivel y, por tanto, al menos un flujo.

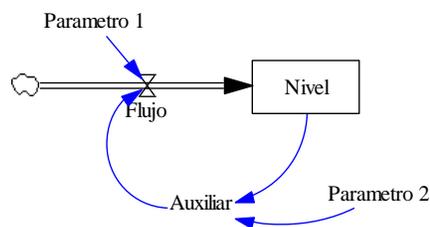


Figura 3. Ejemplo de Diagrama de Forrester

Una importante posibilidad de la modelización en Dinámica de Sistemas es la introducción de relaciones entre variables, a través de los flujos y variables auxiliares, las cuales pueden cuantificarse mediante gráficos, tablas de valores, funciones o relaciones lógicas.

Las variables más difíciles de decidir siempre son los flujos, en particular aquellos que definen las políticas del sistema. Por ello, los flujos son los puntos del modelo donde se plasman las decisiones importantes. Una buena parte del esfuerzo de construcción de modelos sistemodinámicos se dedica a la determinación de los flujos.

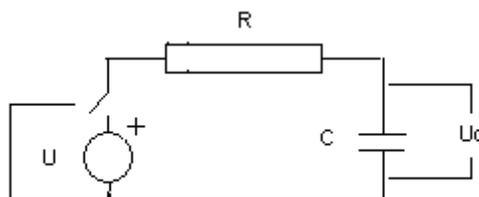
Una vez establecidas todas las relaciones, especificando los valores iniciales de los niveles y de los parámetros, la computadora realizará la integración numérica para proporcionarnos la evolución temporal de las variables. Existen compiladores de simulación específicos de Dinámica de Sistemas entre los que los más populares son STELLA y VENSIM. Ambos son muy similares en su implementación y emplean casi la misma simbología.

Los fenómenos transitorios en circuitos eléctricos se presentan habitualmente utilizando la descripción matemática del principio de conservación de la energía aplicada a los circuitos eléctricos (leyes de Kirchhoff), siguiendo una lógica deductiva que se aleja del modelo conceptual del fenómeno.

En la visión de Dinámica de Sistemas, los procesos transitorios que tienen lugar en los circuitos RC, RL y RLC se presentan a partir de la interpretación conceptual del fenómeno (mapa de conceptos) para luego construir una metáfora con las variables más relevantes, lo que luego se traduce en un diagrama de Forrester que se implementa en la computadora a través de un paquete de software apropiado. Veamos algunos casos particulares:

Modelación sistemodinámica de un circuito RC.

Circuito experimental.



Modelo conceptual.

Al conectar el interruptor a la fuente de FEM exterior ( $U$ ), comienza a circular una corriente cuya intensidad ( $I$ ) hace aumentar la carga ( $Q$ ) en el capacitor ( $C$ ), aumentando la diferencia de potencial en él ( $U_c$ ), lo que ocasiona la disminución de la diferencia de potencial entre el capacitor y la fuente de FEM y, como consecuencia, la disminución de la intensidad de la corriente hasta que

se igualan  $U$  y  $U_c$ . Al colocar el interruptor en la posición de descarga, se invierte el sentido de la corriente.

### Variables:

Carga en el capacitor:  $Q$

Intensidad de la corriente:  $I$

Voltaje en C:  $U_c$

### Parámetros:

Voltaje aplicado:  $U$

Resistencia:  $R$

Capacitancia:  $C$

### Metáfora:

$I \uparrow \Rightarrow Q \uparrow$

$Q \uparrow \Rightarrow U_c \uparrow$

$U_c \uparrow \Rightarrow (U - U_c) \downarrow$

$(U - U_c) \downarrow \Rightarrow I \downarrow$

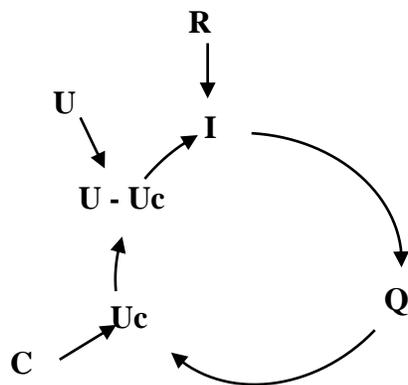


Diagrama de influencia

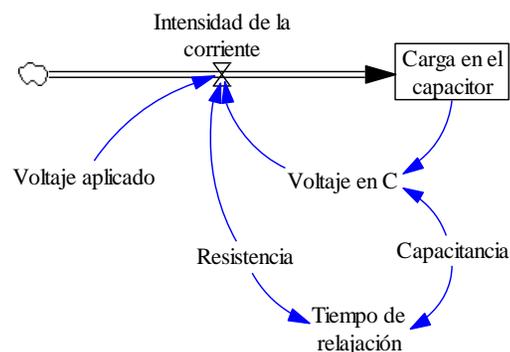


Diagrama de Forrester

Ecuaciones integro diferenciales:

$$\text{Carga\_en\_el\_capacitor}(t) = \text{Carga\_en\_el\_capacitor}(t - dt) + (\text{intensidad\_de\_corriente}) * dt$$

INIT Carga\_en\_el\_capacitor = 0

INFLOWS:

$\text{intensidad\_de\_corriente} = (\text{voltaje\_aplicado} - \text{voltaje\_en\_C}) / \text{resistencia}$

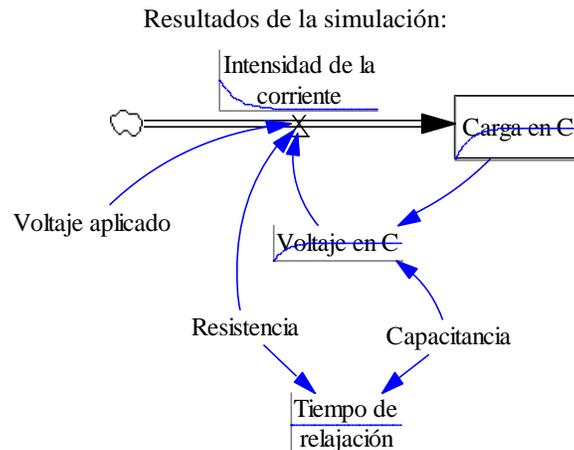
$\text{capacitancia} = 1$

$\text{resistencia} = 5$

$\text{tiempo\_de\_relajación} = \text{resistencia} * \text{capacitancia}$

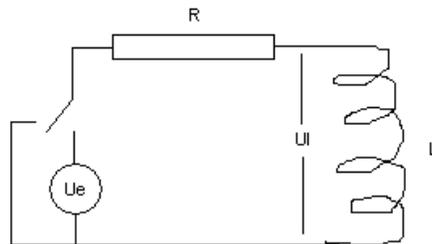
$\text{voltaje} = 12$

$\text{voltaje\_en\_C} = \text{Carga\_en\_el\_capacitor} / \text{capacitancia}$



Modelación sistemodinámica de un circuito RL.

Circuito experimental:



De la observación del experimento con un circuito RL en serie se obtienen los siguientes hechos:

- Al conectar el interruptor a la fuente de voltaje externa  $U_e$ :

La fuente de voltaje externa ( $U_e$ ) trata de hacer circular corriente en el circuito con una intensidad que sería ( $U_e/R$ ) en ausencia de inductor. Pero la velocidad de variación de la intensidad de la corriente ( $di/dt$ ) genera un voltaje de autoinducción ( $U_L = L di/dt$ ). Mientras mayor es la intensidad de la corriente que trata de circular, mayor es la velocidad de variación y mayor el voltaje de autoinducción. Pero mientras mayor es el voltaje de autoinducción, menor es la intensidad de la corriente.

- Al conectar el interruptor en la posición de cortocircuito la corriente invierte su sentido.

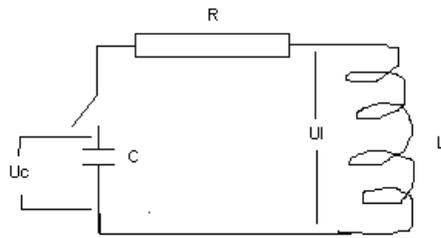
Variables que se pueden distinguir:

Intensidad de la corriente ( $I$ )



Modelación sistemodinámica del circuito RLC en serie.

Circuito experimental:



Modelo conceptual:

En un circuito RLC en serie, la carga inicial en el capacitor ( $Q$ ) origina una diferencia de potencial ( $U_c$ ) que trata de poner en movimiento los portadores de carga a través del inductor y el resistor, estableciéndose una corriente de intensidad  $I$ . Pero la inductancia del inductor se opone al aumento de la intensidad de corriente en el circuito, de manera que la velocidad de variación de la intensidad de corriente ( $V_i$ ) aumenta a medida que disminuye la carga y al mismo tiempo aumenta la intensidad de la corriente. Este aumento provoca, por una parte, el aumento de la carga del capacitor (con signo contrario al inicial) y por la otra, la disminución de la velocidad de variación de la intensidad de corriente.

Variables:

Carga en el capacitor:  $Q$ .

Voltaje en el capacitor:  $U_c$ .

Intensidad de la corriente:  $I$

Velocidad de variación de la  $I$ :  $V_i$

Metáfora:

-  $Q \uparrow \Rightarrow U_c \uparrow$

$U_c \uparrow \Rightarrow V_i \downarrow$

$V_i \downarrow \Rightarrow I \downarrow$

$I \downarrow \Rightarrow Q \downarrow$

$I \downarrow \Rightarrow V_i \uparrow$

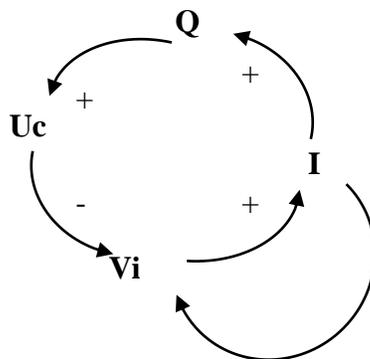


Diagrama de influencias

Ecuaciones integrodiferenciales:

$$I(t) = I(t - dt) + (\text{Vel\_var\_I}) * dt \text{INIT } I = 0$$

INFLOWS:

$$\text{Vel\_var\_I} = -(U_c + U_r)/L$$

$$Q(t) = Q(t - dt) + (\text{Vel\_var\_Q}) * dt \text{INIT } Q = 100$$

INFLOWS:

$$\text{Vel\_var\_Q} = I$$

$$C = 0.2$$

$$L = 0.1$$

$$R = 1$$

$$U_c = Q/C$$

$$U_r = I * R$$

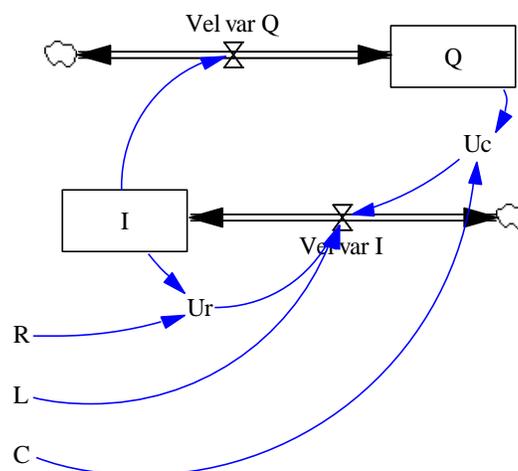


Diagrama de Forrester

Como en los casos anteriores los resultados se presentan en forma de gráficos o tablas de valores.

## CONCLUSIONES

La Dinámica de Sistemas ofrece una metodología para la modelación y simulación de procesos que permite a la mente concentrarse en el significado y sentido del proceso que se estudia, pasando por alto las dificultades de su formalización pero requiere hacer explícitos, claros, sistemáticos y coherentes nuestros supuestos, para luego implementarlos en la computadora en un entorno de software apropiado.

El enfoque sistemodinámico de procesos combina, por tanto, las fortalezas de la mente humana para establecer elementos esenciales y relaciones, con las fortalezas de las computadoras para deducir, rápidamente y sin ambigüedades, las consecuencias dinámicas de nuestros supuestos, por lo que puede convertirse en una poderosa herramienta de aprendizaje en el campo de los fenómenos y procesos complejos como son los electromagnéticos.

#### BIBLIOGRAFÍA

Emblemsvoeg, Jan and Bras, Bert. (2000). Process thinking — a new paradigm for science and engineering. *FUTURES* 32, 635–654.

Díaz López, J. R. (2008) El pensamiento en procesos. Un nuevo paradigma en el aprendizaje de la ingeniería. 5ta Conferencia Internacional de la Facultad de Ingeniería Eléctrica FIE'08. ISBN: 978- 84- 00- 08680- 0.

Forrester, Jay (1989). The Beginning of System Dynamics, Proceedings. of Tenth International Congress of the System Dynamics Society, Alemania.

Bertalanffy, Ludwig Van, (1968) General Systems Theory, George Braziller, New York (Revised Edition).

Forrester, Jay (1961) Industrial Dynamics, MIT Press.

Randers, Joergen (1980) Elements of the System Dynamics Methods. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, ISBN: 978- 84- 00- 08680- 0 and London, England.

Aracil, Javier. (1995) Dinámica de Sistemas. Ed. Isdefe, Madrid.