

# Teoría y ejercicios prácticos de Dinámica de Sistemas

Juan Martín García

Teoría y ejercicios prácticos de Dinámica de Sistemas  
Autor y editor: Juan Martín García

© 2003 Juan Martín García      mail: [jmg@grn.es](mailto:jmg@grn.es)  
Primera edición. Octubre 2003  
Impreso en Barcelona (España)

ISBN 84-607-9304-4  
Depósito Legal B-4958-2003

No está permitida la reproducción total o parcial de este libro, ni su tratamiento informático, ni la transmisión de ninguna forma o por cualquier medio, ya sea electrónico, mecánico, por fotocopia, por registro u otros métodos, sin el permiso previo y por escrito del titular del Copyright.

## INDICE

Prólogo	
Presentación	
1. Introducción .....	9
2. Dinámica de Sistemas .....	17
2.1. La Dinámica de Sistemas .....	19
2.2. Identificar el problema .....	22
2.3. Definir el Sistema .....	23
2.4. Las fronteras de un sistema .....	24
2.5. Diagrama Causal .....	25
2.6. Retroalimentación .....	26
2.7. El factor limitativo .....	28
2.8. Los factores clave .....	29
2.9. Tipos de sistemas.....	31
2.9.1. Sistemas estables e inestables .....	31
2.9.2. Sistemas hiperestables.....	33
2.9.3. Sistemas oscilantes .....	34
2.9.4. Sistemas sigmoidales .....	34
2.10. Estructuras genéricas .....	35
2.10.1. Resistencia al cambio .....	35
2.10.2. Erosión de objetivo .....	35
2.10.3. Adicción .....	38
2.10.4. Paso de la carga al factor externo .....	39
2.10.5. Efectos a corto y a largo plazo .....	40
2.11. Los modelos del mundo .....	41
3. Dinámica de Sistemas Sociales .....	45
3.1. Estado deseado.....	48
3.2. Estado real.....	51
3.3. La Diferencia .....	51
3.4. La Acción .....	52
3.5. Análisis del Comportamiento Humano .....	53
4. Construcción de un modelo .....	57
4.1. Diagrama de Flujos .....	59
4.2. Simulación en ordenador .....	60
4.3. Comportamiento del Modelo .....	62
4.4. Análisis del Sistema .....	63
4.5. Criticas a los modelos .....	64

5. Ejercicios prácticos.....	65
Area Ambiental	
5.1. Dinámica poblacional.....	75
5.2. Ecología de una reserva natural.....	81
5.3. Efectos de la agricultura intensiva.....	93
5.4. La pesca del camarón en Campeche.....	102
5.5. Conejos y zorros.....	110
5.6. Problemática ganadera.....	113
5.7. Ingestión de tóxicos.....	127
5.8. Los alimentos transgénicos.....	133
Area Empresarial	
5.9. Gestión dinámica de existencias.....	147
5.10. Emisiones de CO <sub>2</sub> .....	160
5.11. Como producir más y mejor.....	163
5.12. Averías.....	169
5.13. Gestión dinámica de un proyecto.....	171
5.14. Un modelo de empresa innovadora.....	183
5.15. Control de calidad.....	191
Area Social	
5.16. Llenando un vaso.....	199
5.17. Estudio de una catástrofe.....	202
5.18. El joven ambicioso.....	208
5.19. Desarrollo de una epidemia.....	213
5.20. Dinámica de los dos relojes.....	220
Area Mecánica	
5.21. Dinámica de un depósito.....	225
5.22. Estudio de los movimientos oscilatorios.....	230
5.23. Reactor químico.....	239
5.24. Planificación del entrenamiento deportivo.....	243
5.25. La farola de Darder.....	252
6. Guía para crear un modelo.....	261
7. Epílogo.....	269

## ANEXOS

I. Lecturas complementarias de teoría.....	275
II. Funciones, Tablas y Retrasos.....	277
III. Preguntas Frecuentes.....	285
IV. Cursos de Formación .....	291
V. Software .....	293
VI. Bibliografía .....	295
VII. Agradecimientos.....	298

A Eva, Pamela y Angela

## **PRÓLOGO**

As the complexity of our world increases systems thinking is emerging as a critical factor for success, and even survival. How then can people become skilled systems thinkers? The most effective learning experiences combine experience with reflection, theory with practice.

Traditionally, theory was taught in school and university, and experience was gained in life outside those walls. But in the world of complex dynamic systems such as a business, society, or ecosystem, everyday experience fails because the time horizon and scope of the systems is so vast—we never experience the majority of the effects of our decisions. And without relevant experience, theory is uninteresting to students.

The old ways of learning fail. When experiments in the real world are impossible, simulation becomes the main way we can learn effectively about the dynamics of complex systems. For this reason I'm pleased to introduce Juan Martin Garcia's book, *Teoria y Ejercicios Practicos de Dinamica de Sistemas*. Juan combines theory and practice, experience and opportunities for reflection, so that newcomers to the field can learn for themselves how complex dynamic systems work. The examples span a range of important economic and social issues, from the aging of the population in developed economies to the course of contagious diseases to the accumulation of pollutants in the environment; everyone will find some examples here of direct personal interest.

The modeling exercises guide the learner through the process of building a working simulation; students will not only learn about the issues addressed, and in the use of state of the art simulation software, but will develop skill in the modeling process.

Juan has written a delightful first introduction to the field of system dynamics and complexity, and provides a much-needed addition to the literature available in Spanish.

John D. Sterman  
Cambridge, Massachusetts  
October 2003

## **PRESENTACIÓN**



Este puede ser un buen lugar para vencer algunos fantasmas que existen sobre la Dinámica de Sistemas. Cualquiera persona que desconoce esta metodología intuye que tras estas palabras se esconden las más complejas ecuaciones matemáticas llenas de extraños símbolos griegos y repletas de diferenciales e integrales. Además espera tener que desempolvar los nunca bien aprendidos indicadores estadísticos e intentar recordar sus oscuros significados. Por último espera encontrar complejos programas de software que requieren amplios conocimientos de programación.

Sin duda estos fantasmas, como buenos guardianes del conocimiento, ahuyentan eficazmente a las mentes pusilánimes. Pero en realidad estos fantasmas son más fruto de la imaginación y la ignorancia que de ningún deliberado intento de ocultar una inestimable fuente de conocimiento. Para vencer a estos fantasmas tal vez es necesario explicar en primer lugar que vamos a trabajar sobre el mundo real, y que en este raramente encontraremos complejas formulaciones matemáticas, sino que más bien encontramos una sorprendente sencillez tras analizar con atención cualquier aspecto. La complejidad es siempre más aparente que real y con frecuencia es el merecido fruto de nuestra ignorancia. Por otra parte las integrales no representan más que unas comunes acumulaciones de materia, energía o información. Por lo que hace referencia a la estadística, sin huir de ella la vamos a reservar para profundizar en algunos casos muy especiales, pero más como complemento que como centro de nuestro razonamiento. Y por último, por lo que hace referencia a la complejidad del manejo del software, veremos en las páginas de ejercicios que podremos llamar al pan pan y al vino vino, huyendo de extraños lenguajes de programación informáticos. Destierra pues amigo lector sus temores y déjate llevar por un placentero viaje que le acercará al Conocimiento.

Superados los fantasmas de la puerta, tenemos que hacer frente a una gran pregunta que acecha nada más traspasar en el umbral ¿Para qué sirve en realidad la Dinámica de Sistemas? Podrá el lector encontrar mil respuestas a esta pregunta a lo largo de este y otros libros, pero me permito aquí hacer una sencilla analogía. Imagínese el lector que ha de contar cuantas butacas hay en un cine que tiene 30 filas y 30 asientos en cada fila. Puede contar las butacas: 1, 2, 3, 4, 5... y 899. Al finalizar mi consejo es que las vuelva a contar para estar seguro del resultado. Otro método consiste en utilizar una metodología llamada “multiplicar” y así tomando las dos cifras de 30 por 30 y aplicando esa metodología que aprendió cuando era pequeño obtendrá un resultado rápido y fiable: 900. La Dinámica de Sistemas es una metodología similar, de forma que ofrece resultados más rápidos y fiables que otras formas de percibir la realidad más tradicionales, y nos permite abordar el análisis de la aparente complejidad que encontramos en los temas económicos, ambientales, sociales o simplemente mecánicos.

El propósito de este libro es servir de referencia y ayuda a los estudiantes de esta materia. Ofrece en primer lugar una sucinta visión de los conceptos básicos de esta metodología y una seleccionada colección de ejercicios prácticos que permiten al lector aprender de forma rápida y ordenada. Si sigue las indicaciones que hallará es fácil que sin darse apenas cuenta consiga un aprendizaje completo de esta metodología.

No pretende este libro suplir en modo alguno la labor del profesor que siempre aportará una inestimable ayuda en la resolución de puntuales dudas, que por muy esmerado que sea un libro nunca puede evitar.

Los ejercicios prácticos se han seleccionado para ofrecer al lector una visión organizada de los diferentes aspectos que es necesario conocer. No pretende ofrecer una visión de las realizaciones actuales en este campo ni servir de orientación para proyectos de ningún tema en particular. Para esto el lector deberá de hacer una posterior labor de investigación de qué modelos se han hecho en el campo que a él le interesa. Cuenta con la inestimable ayuda de las abundantes bibliotecas de modelos que existen en internet.

La Dinámica de Sistemas se puede aplicar a un amplio abanico de problemas que nos encontramos a diario, pero en muchas otras ocasiones otras metodologías o nuestra intuición nos ofrecerán solución o nos sacarán del apuro. ¿En qué casos pues hemos de pensar en aplicar la Dinámica de Sistemas? Pues en todas aquellas situaciones en las que puede existir algún tipo de realimentación. Esto es muy frecuente en la vida real, sea en la empresa, en el medio ambiente o en los temas sociales, y es la causa de muchos de los fenómenos contrarios a nuestra intuición que observamos.

Los ejercicios se pueden organizar de muchas maneras, según su temática, su grado de dificultad, etc. Al principio del correspondiente capítulo se dan indicaciones sobre los ejercicios más recomendables en función de las necesidades del lector. De forma secuencial se ha escogido la ordenación en base a las diferentes áreas temáticas: ciencias ambientales, ciencias sociales, ciencias sociales y por último modelos de sistemas mecánicos. No es necesario que el lector haga todos los ejercicios del libro para conocer esta metodología, puede escoger aquellos que por su temática le parecen más amenos o interesantes.

Verá el lector que a diferencia de otros libros con ejercicios prácticos en los que las soluciones se hallan en las páginas finales, en este libro enunciados y soluciones se hallan unidos. El propósito es que el lector aprenda mientras va haciendo los diferentes modelos (learning by doing). La creación de un modelo de simulación es un trabajo totalmente artesanal, donde hay que conocer una cierta técnica, pero después queda a la libre decisión del creador del modelo la estructura que va a tener éste, sobre lo que no existen reglas universales a seguir.

Con frecuencia la falsa idea de que todos los estudios o trabajos con esta metodología consisten en la elaboración de un modelo en el ordenador. Nada más falso. La aplicación de esta metodología sirve para hallar soluciones sencillas a problemas complejos, y para ello la creación de un modelo de simulación se justifica en escasas

ocasiones. Aprender a crear modelos de simulación tiene la utilidad de consolidar los conceptos teóricos, y si se logra con ellos elaborar propuestas de actuación se evita el lento y laborioso trabajo de crear un modelo de simulación, y se pueden realizar eficaces propuestas de una forma más rápida.

El libro se estructura en dos partes bien diferenciadas, la de Teoría y la de Ejercicios. Es conveniente vencer la tentación de empezar a leer el libro directamente por los ejercicios, porque nada es más peligroso que tomar el volante del coche sin antes aprender las normas de circulación, leer un mapa de carreteras o algo de mecánica.

La persona que ya conozca los fundamentos teóricos de esta metodología y desee únicamente aprender el manejo del software puede ir al Capítulo 5 de Ejercicios. El concepto es aprender-haciendo. No es necesario realizar todos los ejercicios para saber cómo hacer este tipo de modelos. Mi consejo es que reproduzca algunos de los ejercicios siguiendo las indicaciones que se halla al inicio de ese capítulo.

Este libro trata de ser un esmerado y depurado trabajo, que evite en todo lo posible las dudas y vacilaciones que cualquier aprendizaje conlleva. Consciente de las dificultades que el aprendizaje con un libro provoca se ha intentado hacer el texto lo más claro y ameno posible. A pesar de todas estas cautelas el sincero consejo final para el lector es que intente encontrar un profesor para esta materia siempre que le sea posible.

*Juan Martín García*  
*Octubre 2003*