Parte 1. Sistemas dinámicos y su control

J.I. Díaz

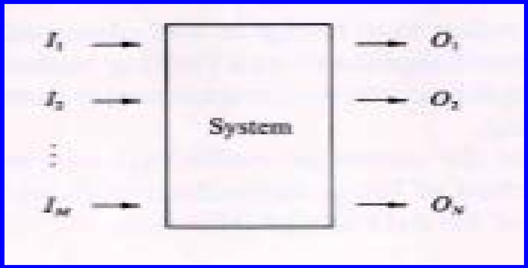
Real Academia de Ciencias

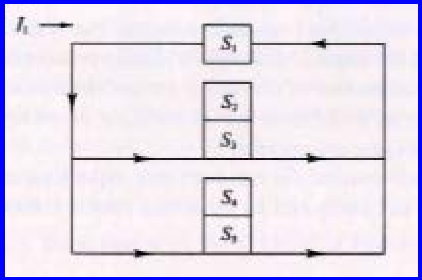
MAH
MASTER EN ARQUITECTURA, ORGANIZACIÓN Y GESTIÓN DE INFRAESTRUCTURAS HOSPITALARIAS

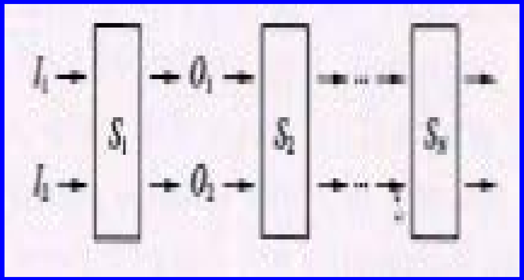
Madrid, 9 de febrero de 2008

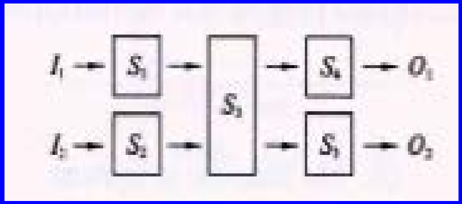
1. Introducción: sistemas

Entrada → Sistema → Salida



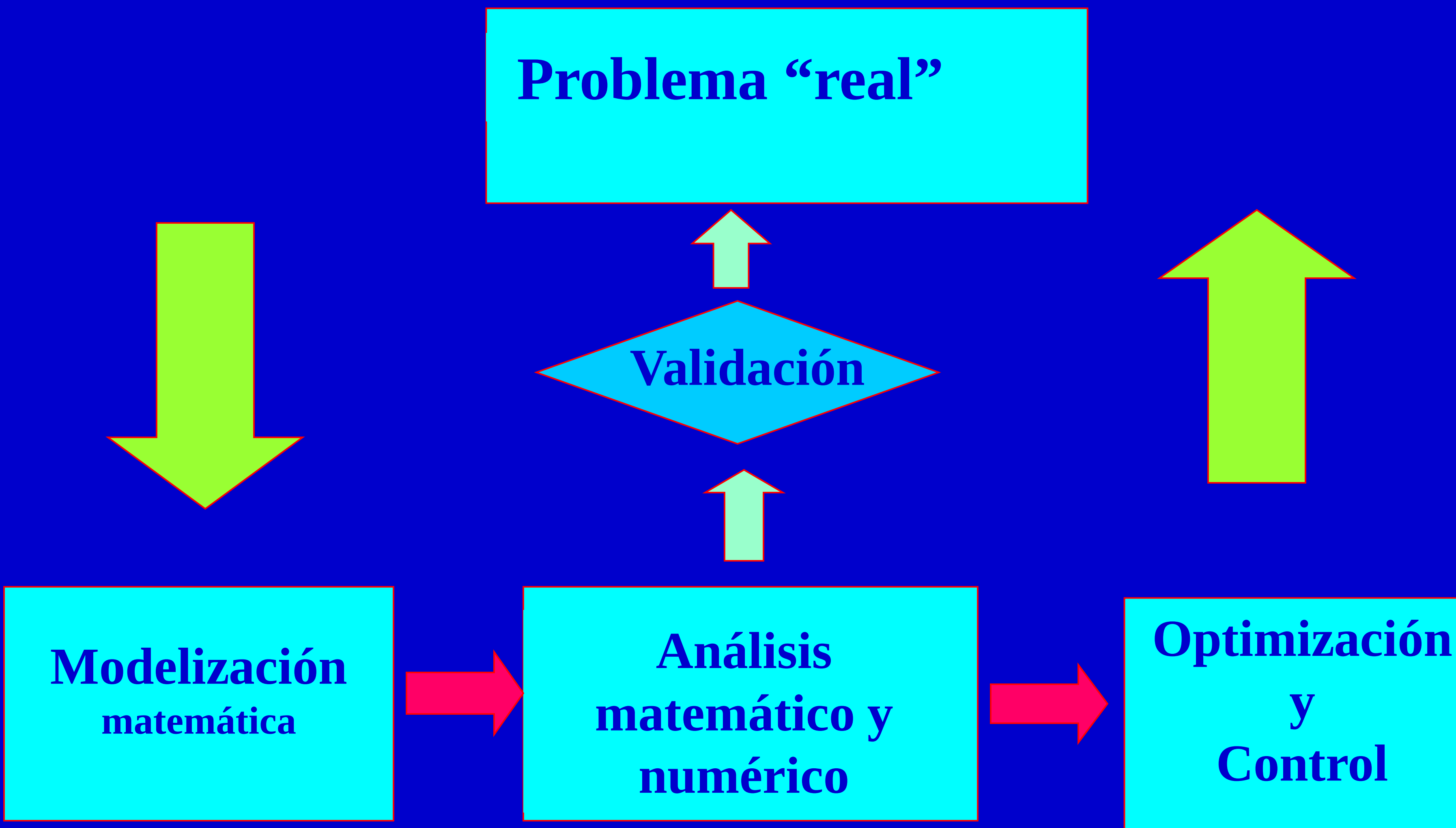






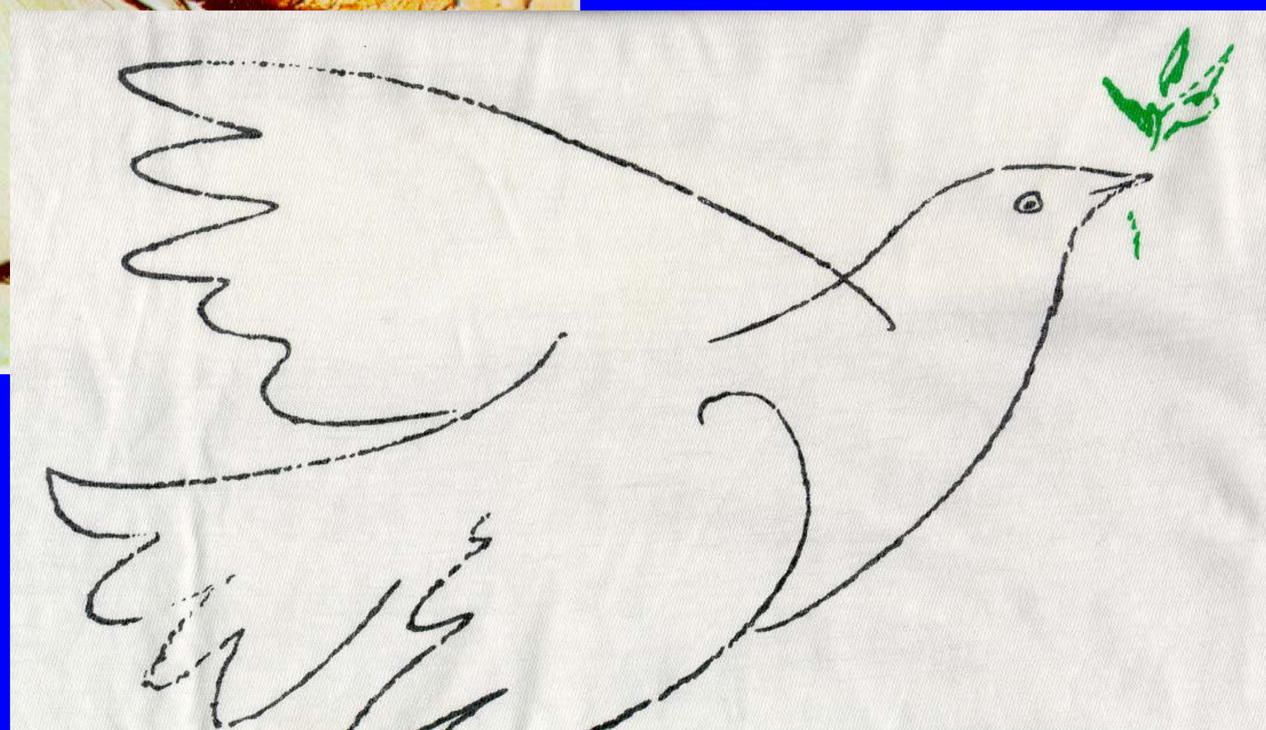
Objetivo: mejorar el comportamiento del sistema

Metodología de la Matemática Aplicada



Modelización.

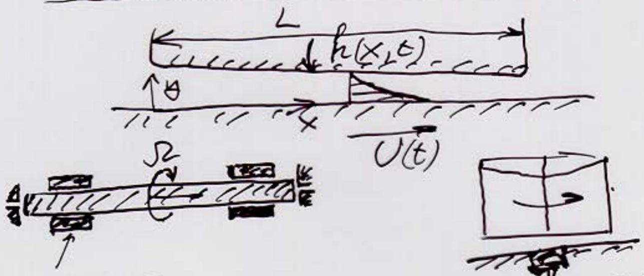
Proceso similar
en el arte



El arte de la modelización

TEORIA DE LA LUBRICACIÓN FLUIDODINÁMICA (REYNOLDS)

LUBRICACIÓN HIDRODINÁMICA



COJINETE CILÍNDRICO

COJINETE DE EMPUJE

ZAPATA BIDIMENSIONAL

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}=0$$

$$U_c/L = V_c/h_o$$

$$\rho\left\{\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}\right\}=-\frac{\partial p}{\partial x}+\mu\left(\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}+\cancel{\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}}\right)$$

$$\rho U_c/t_o \quad \rho U_c^2/L \quad \delta_x P/L \quad \mu U_c/h_o^2 \quad \mu U_c/L^2$$

$$\rho\left\{\frac{\partial v}{\partial t}+u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}\right\}=-\frac{\partial p}{\partial y}+\mu\left(\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}+\cancel{\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}}\right)$$

$$\rho V_c/t_o \quad \rho U_c V_c/L \quad \delta_y P/h_o \quad \mu\frac{V_c}{h_o^2} \quad \mu\frac{V_c}{L^2}$$

$$y=0:\ u=U(t),\ v=0$$

$$y=h(x,t):\ u=0,\ v=\frac{\partial h}{\partial t}$$

$$\boxed{\frac{\delta_y P}{\delta_x P}\sim\left(\frac{h_o}{L}\right)^2}$$

$$U(t)\ \begin{cases} U_c \\ t_o \end{cases} \quad : h(x,t) \rightarrow h_o,\ t_o,\ L$$

$$h_o/L\ll 1,\quad h_o^2/\nu t_o \ll 1;\quad h_o^2/\nu\frac{L}{U_c}\ll 1$$

HIPOTÉSIS DE LA TEORIA DE LA LUBRICACIÓN

$h_o/L \ll 1$ (CAPAS DELGADAS)

$h_o^2/\nu t_o \ll 1$ (ACELERACION LOCAL DESPREC.)

$\frac{U h_o}{\nu}\frac{h_o}{L}\ll 1$ (ACELERACIÓN CONVECTIVA DESPRECIABLE)

ECUACIONES (DE STOKES) SIMPLIFICADAS

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}=0$$

$$0=-\frac{\partial p}{\partial x}+\mu\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$$

$$0=\frac{\partial p}{\partial y} \rightarrow p=p(x,t)\ ?$$

$$y=0:\ u=U(t),\ v=0$$

$$y=h(x,t):\ u=0,\ v=\partial h/\partial t$$

$$u=\underbrace{U\left(1-\frac{y}{h}\right)}_{\text{Coutte}}+\underbrace{\frac{1}{2\mu}\frac{\partial p}{\partial x}y(y-h)}_{\text{Poiseuille}}$$

$$v=-\int_0^y\frac{\partial u}{\partial x}dy \rightarrow \frac{\partial h}{\partial t}=-\int_0^h\frac{\partial u}{\partial x}dy$$

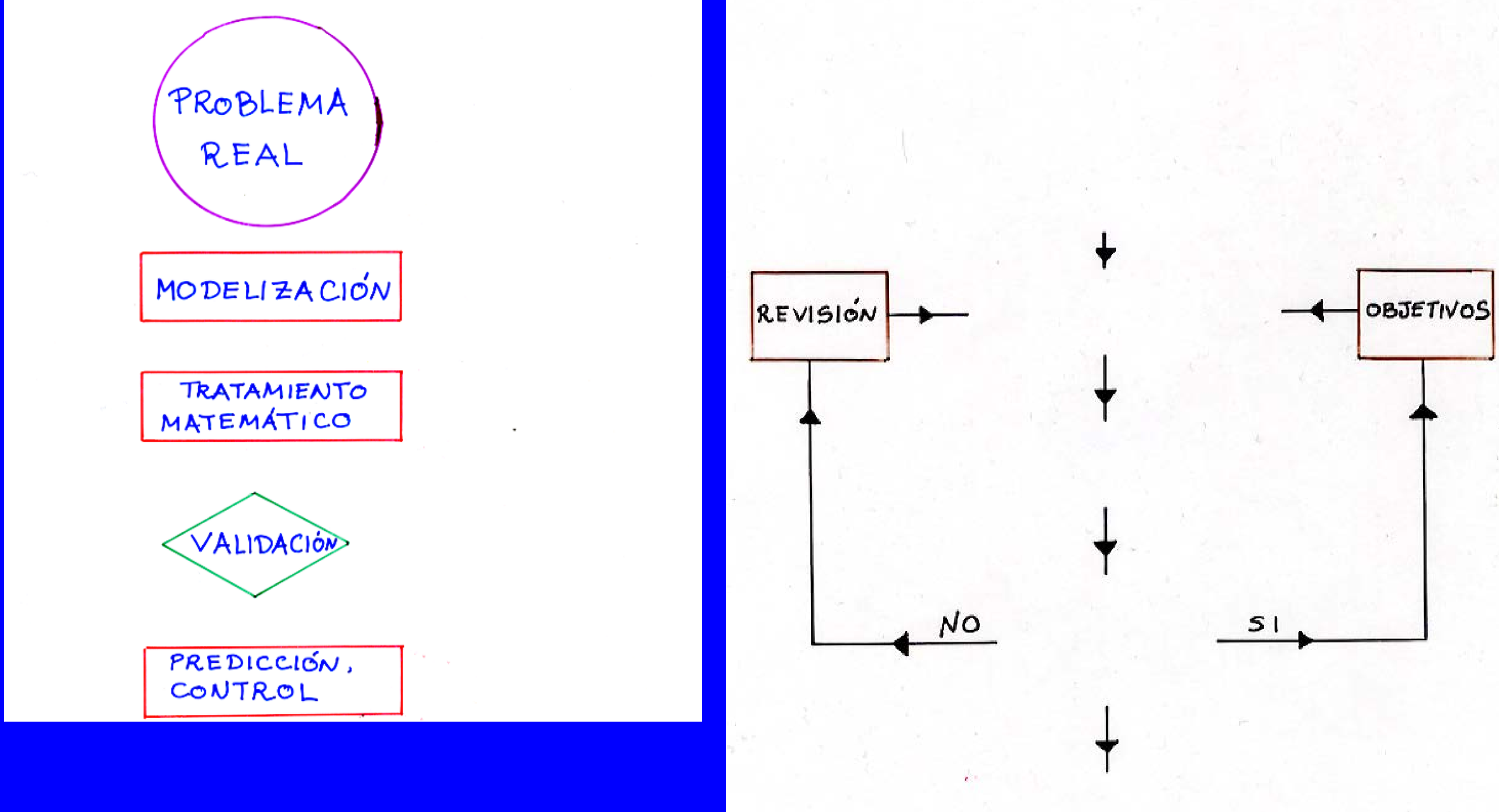
$$\boxed{\frac{\partial h}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}\int_0^h u\,dy=0} \qquad q_x=\int_0^h u\,dy$$

$$q_x=\frac{Uh}{2}-\frac{h^3}{12\mu}\frac{\partial p}{\partial x}$$

$$\frac{\partial h}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{Uh}{2}-\frac{h^3}{12\mu}\frac{\partial p}{\partial x}\right)=0$$

(ECUACIÓN DE REYNOLDS DE LA LUBRICACIÓN)

METODOLOGIA DE LA MATEMATICA APLICADA



PROBLEMAS "REALES".

Una posible clasificación: Programa Marco I+D de la Unión Europea

ENERGIA
- Energias no nucleares (Petroleo, Carbón, Solar)
- Seguridad en fisión nuclear
- Fusión termonuclear

TECNOLOGIA DE LA INFORMACIÓN y COMUNICAC
- Tecnologia de la Información,
- Tecnologia de las Comunicaciones, Aeronaut
- Sistemas Telemáticos, Electrónica, Ordenadores

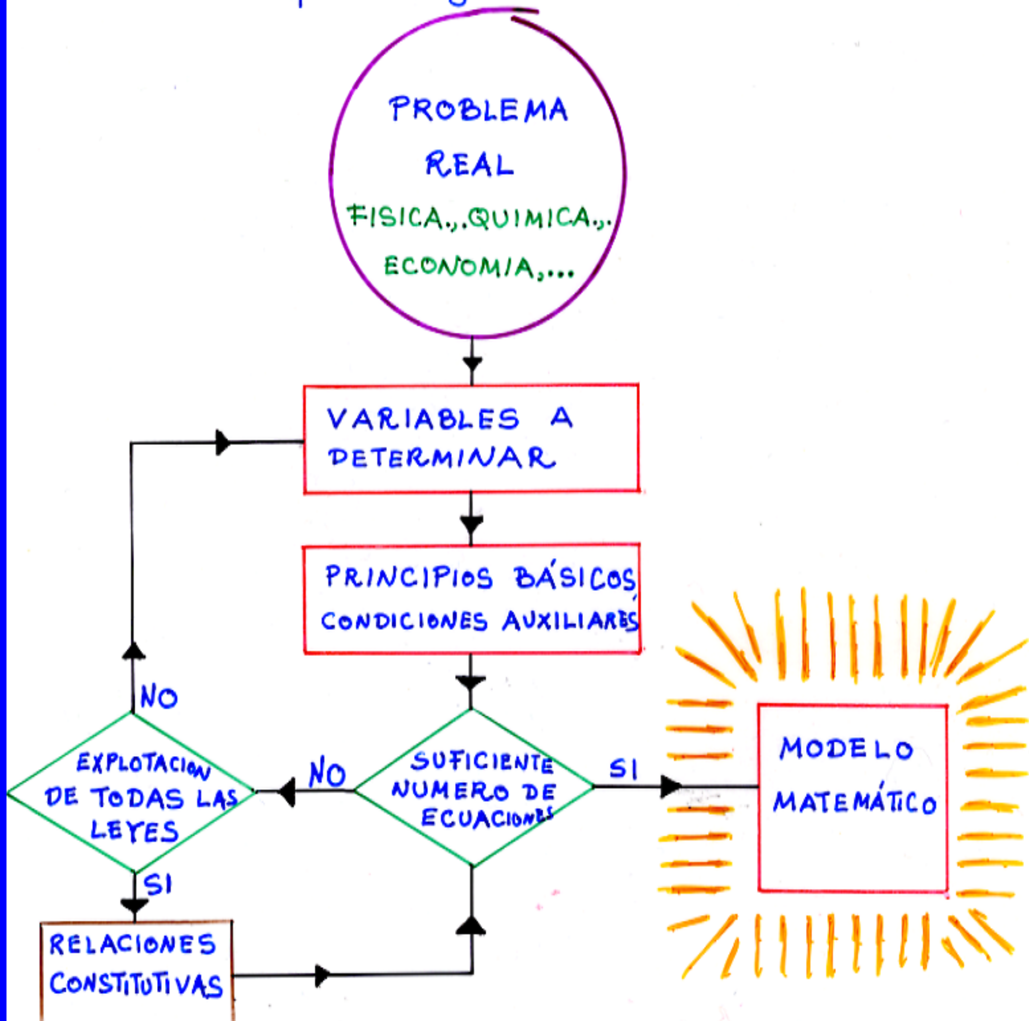
TECNOLOGIAS INDUSTRIALES Y DE LOS MATERIALES
- Nuevos materiales
- Procesos tecnológicos en Quimica, Farmacia,....
- Metalurgia, Tecnologia minera,....

MEDIO AMBIENTE
- Climatologia, Meteorologia, oceanografia....
- Polución, planificación urbana

CIENCIAS Y TECNOLOGIA DEL SER VIVO
- Biotecnologia
- Alimentación, Ciencias Agrarias
- Investigaciones biomédicas y ciencias sociales

MODELIZACIÓN.

- Modelo ≡ prototipo . Simplificación.
- Modelos análógicos // Simulación numérica.
- Un esquema general:



- El modelo depende enormemente de los objetivos a lograr.

- Grandes alternativas:

  modelos directos / modelos inversos
  modelos deterministas / modelos estocásticos
  modelos "continuos" / modelos discretos
  modelos transitorios / modelos estacionarios
  modelos "microscópicos" / modelos "macroscópicos"

- Necesidad de la simplificación:

  - Técnicas de Analisis Dimensional (variables adimensionales, parámetros distinguidos, ...)

  - Fenómenos relevantes de cada caso

    conveccion / difusion
    difusión pura
    conveccion pura
    difusión/absorción, conveccion/absorción
    absorción pura, ...

- Acoplamiento y/o utilización de modelos previos.

TRATAMIENTO MATEMÁTICO.

- Existencia de soluciones
  - Técnicas de Análisis Funcional y Teoría de Ecuaciones Diferenciales Ordinarias y en Derivadas Parciales.
  - Distintos tipos de soluciones (clásicas, fuertes, débiles [en el "espacio de energía" / fuera del espacio de energía: L^1], soluciones "de entropía", soluciones de "viscosidad".
  - En problemas transitorios:
    - existencia local en el tiempo.
    - existencia global: prolongabilidad / blow up
  - En problemas estacionarios: existencia o no existencia segun parámetros
- Unicidad de soluciones. Multiplicidad. Bifurcación respecto de los valores de parámetros.
- Dependencia continua de las soluciones respecto de los datos y parámetros.
- Estabilidad. Comportamiento asintótico
  - caso de $t \longmapsto +\infty$ (problemas de evolución)
  - caso de $|x| \longrightarrow +\infty$ (dominios no acotados)

- Otras propiedades cualitativas:
  - regularidad de la solución.
  - Formación de "interfases" o "fronteras libres" separando regiones de distinto comportamiento.
  - Comparación con soluciones de otros modelos
- Aproximación:
  - Discretizacion del dominio de definición.
  - Algoritmos. Estudio de los problemas discretos
  - Convergencia.
  - Implementación en el ordenador.
  - Visualización de resultados ("realidad virtual").

VALIDACIÓN.

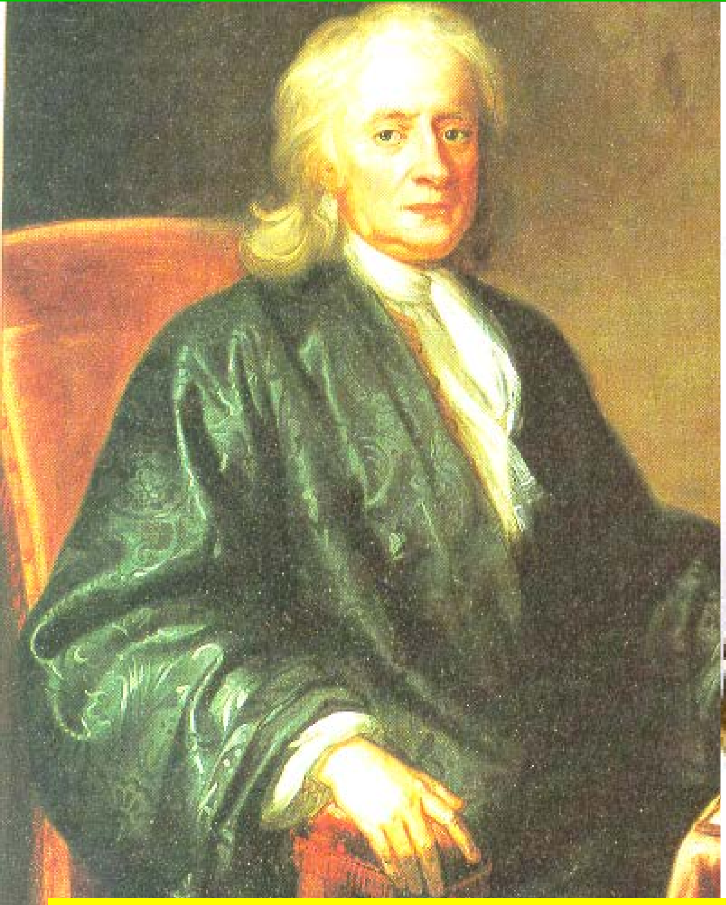
- De gran importancia.
- Depende de los objetivos propuestos.
- Confrontación
  - con soluciones exactas de casos sencillos.
  - con datos experimentales.
- "Robustez" respecto pequeñas modificaciones.
- Apelación a modelos "mas complejos" en la jerarquia.

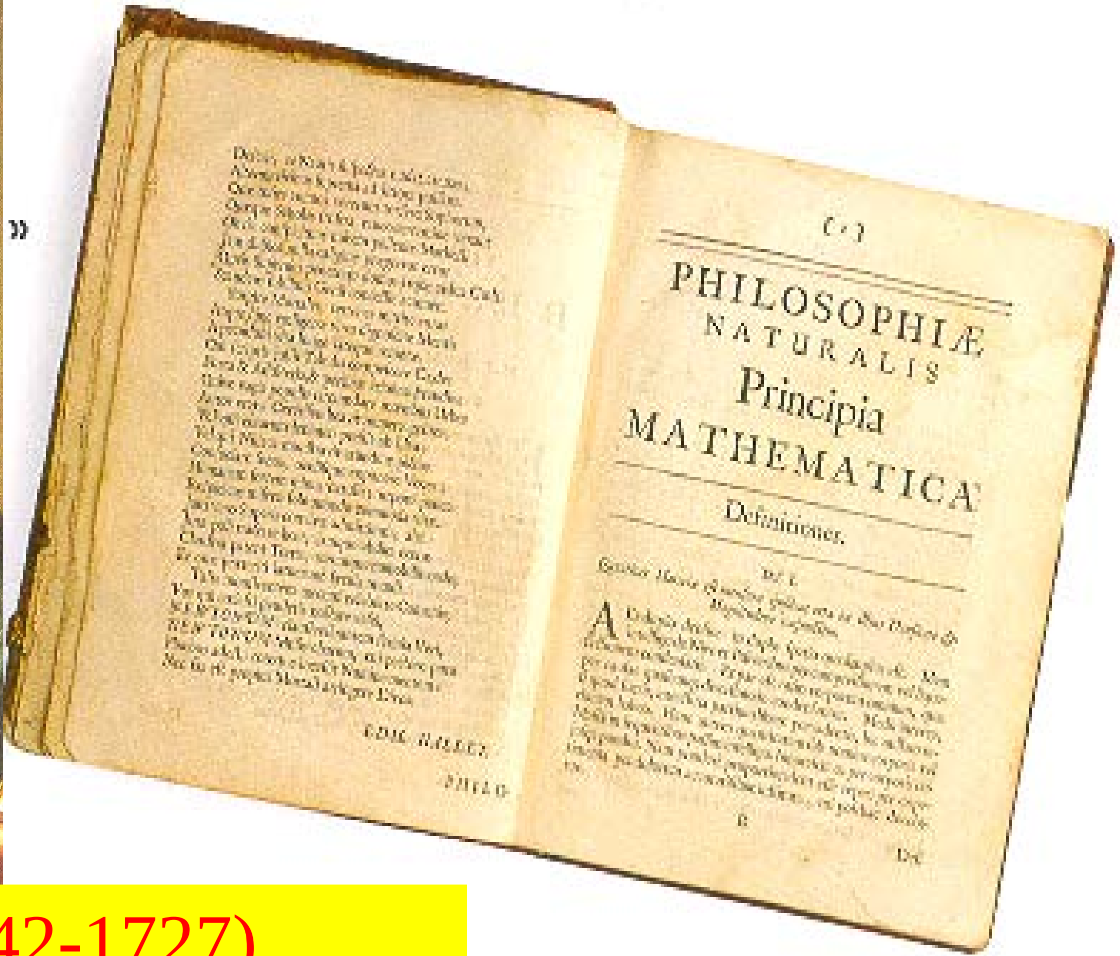
PREDICCIÓN, CONTROL.

- Simulación ("realidad virtual") en casos de difícil experimentación (Medio Ambiente, Economia, Astrofísica....) o experimentación muy costosa (petroleo, energia nuclear, diseño de coches y aviones, ...)
- Ahorro económico.
- Dificultades
  - Toma de datos. Complejidad. Asimilación.
  - Datos incompletos.
- Optimización / Control: ¿como actuar sobre los sistemas para alcanzar estrategias (minimización, maximización)...?
- Problemas multi-criterio.
- Irreversibilidad de los cambios introducidos.
- Prevención de riesgos.

1.1. Hitos históricos en Sistemas Dinámicos: caos

1.1. En Mecánica Clásica

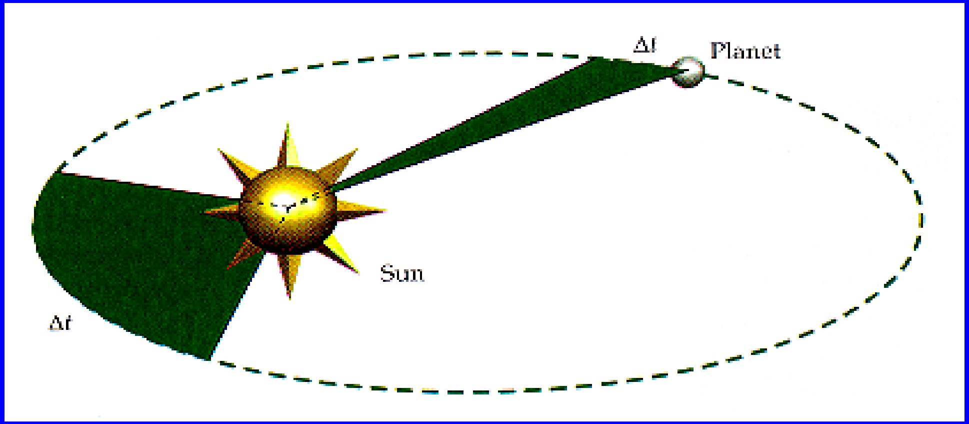


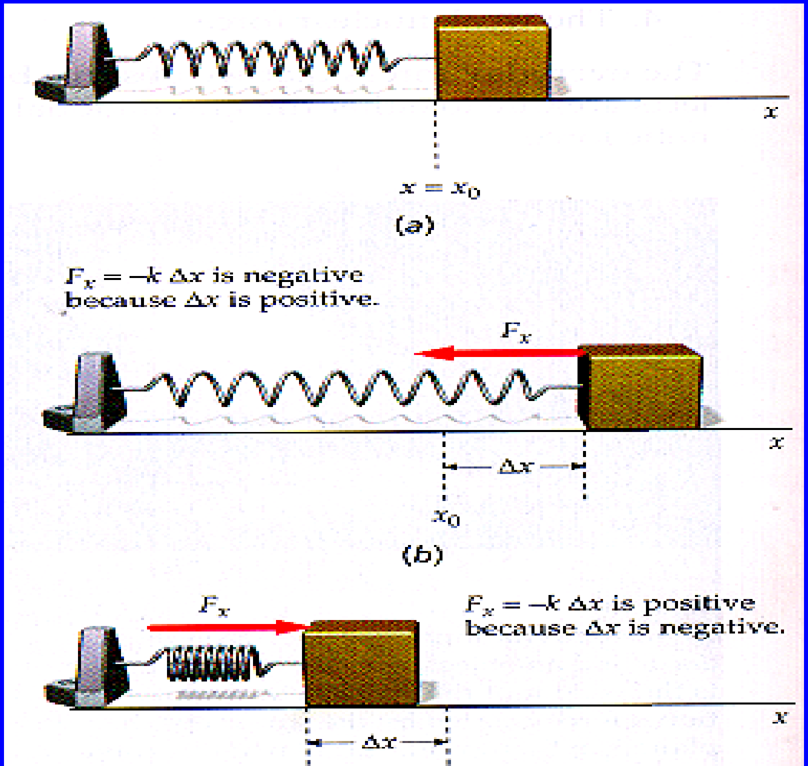


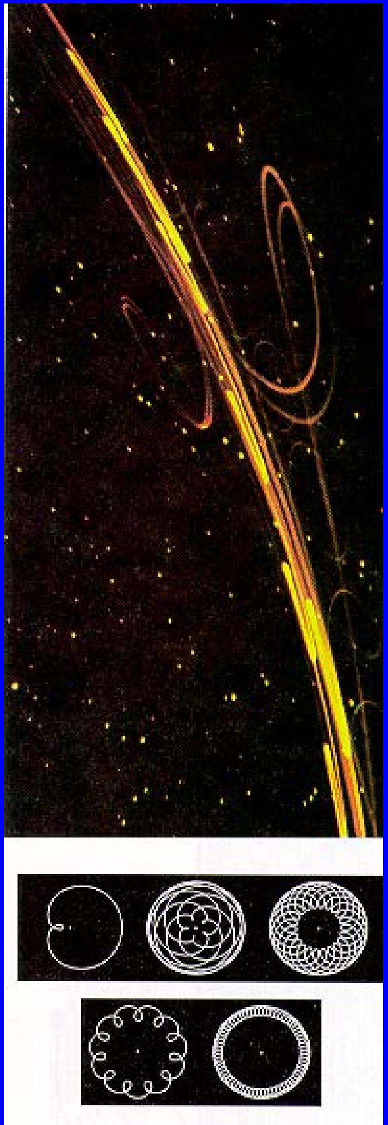
Sir Isaac Newton (1642-1727)

1687

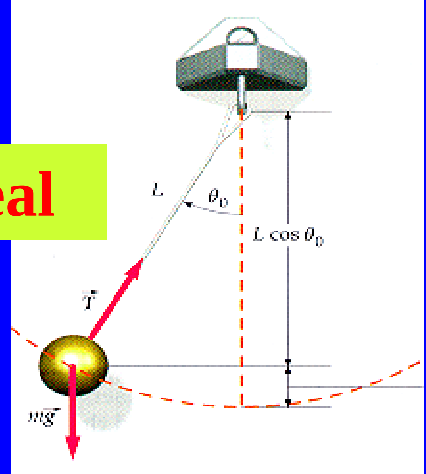
Tipos de problemas

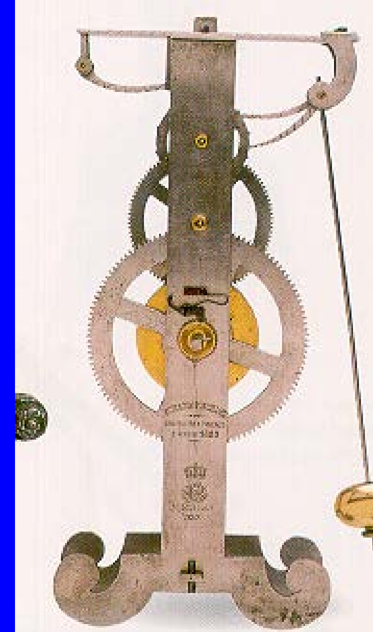





The apparent motion of the planets.

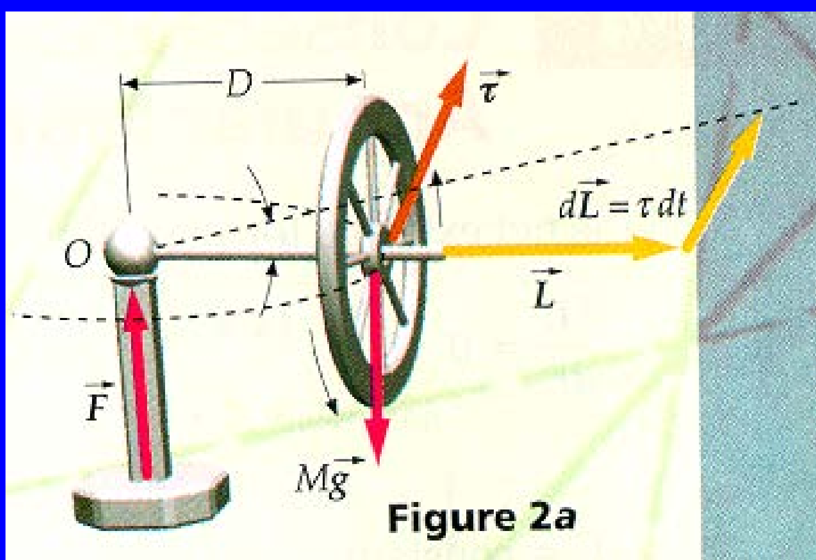
Péndulo no lineal

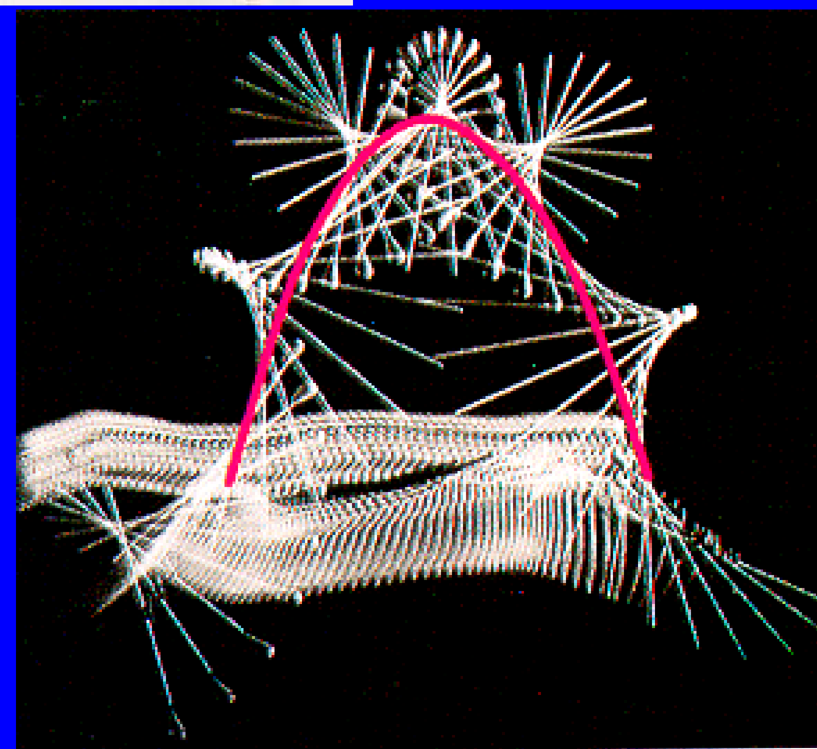




S.D.
Discreto

Sólidos Rígidos



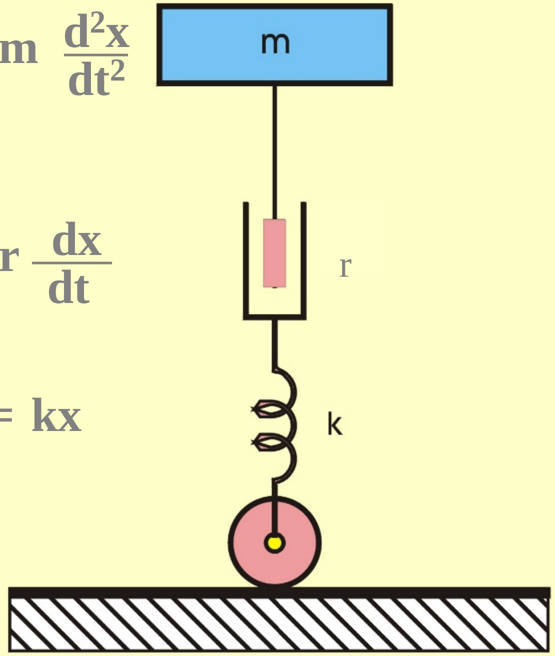


SISTEMAS DINÁMICOS LINEALES [7]

$$f_1 = m\,\frac{d^2x}{dt^2}$$

$$f_2 = r\,\frac{dx}{dt}$$

$$f_3 = kx$$



MODELO MATEMÁTICO DE UN AMORTIGUADOR

$$f_1+f_2+f_3 = \boxed{m\,\frac{d^2x}{dt^2} + r\,\frac{dx}{dt} + kx = 0}$$

Example 2.1 Particle dynamics

Consider a particle with mass m modelled as a mass point, which moves along a straight line with velocity u subject to a force proportional to u^α, $\alpha \in \mathbb{R}$, starting at $t = 0$ with velocity u_0.

The mathematical model is then

$$\begin{cases} \dfrac{du}{dt} = \beta u^\alpha \\ u(0) = u_0 \,. \end{cases} \tag{2.4.7}$$

Observe that the function u^α has the following properties:

- If $\alpha < 0$, it blows up to infinity when $u = 0$;
- If $\alpha = 0$, it satisfies the Lipschitz condition with $L = 0$;
- If $0 < \alpha < 1$, it is continuous but not Lipschitz (it is Lipschitz away from 0);
- If $\alpha = 1$, it satisfies the Lipschitz condition with $L = 1$;
- If $\alpha > 1$, it is continuous but not Lipschitz (it is locally Lipschitz).

Hence according to Theorems 2.4.1 and 2.4.2, existence is assured only for $\alpha \geq 0$ and uniqueness only for $\alpha = 0, 1$.

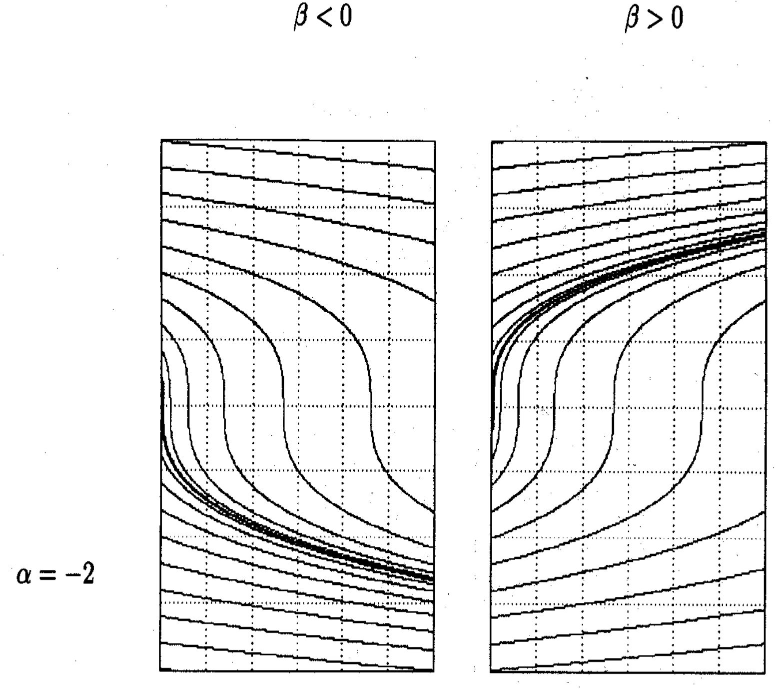
A second aspect to remember is that, in the above theorems, existence and uniqueness are proved for any initial condition u_0.

If $u_0 \neq 0$, the solution to (2.4.7) can be easily obtained by separation of variables

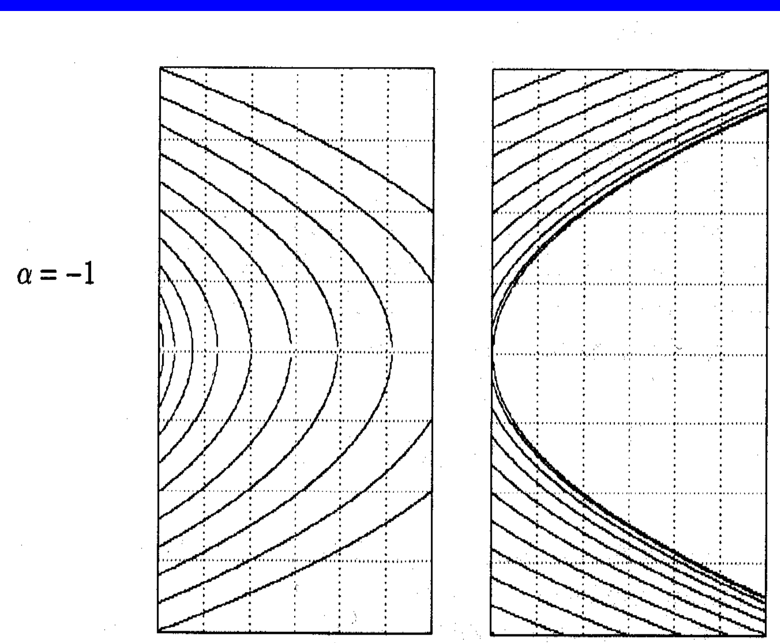
$$u(t) = \begin{cases} u_0 \left[1 + \dfrac{\beta(1-\alpha)}{u_0^{1-\alpha}} t \right]^{\frac{1}{1-\alpha}} & \text{if } \alpha \neq 1 \\ u_0 e^{\beta t} & \text{if } \alpha = 1 \,. \end{cases} \qquad (2.4.8)$$

	Theoretical prediction	$u_0 \neq 0$	$u_0 = 0$
$\alpha = -2$		$1,\ [+\infty]$	$1,\ [+\infty]$
$\alpha = -1$		$\dfrac{(\beta > 0)\ 1, [+\infty]}{(\beta < 0)\ 1, \left[\frac{u_0^2}{2}\right]}$	$\dfrac{(\beta > 0)\ 2, [+\infty]}{(\beta < 0)\ 0}$
$\alpha = 0$	uniqueness	$1,\ [+\infty]$	$1,\ [+\infty]$
$\alpha = \frac{2}{3}$	existence	$\dfrac{(\beta u_0 > 0)\ 1, [+\infty]}{(\beta u_0 < 0)\ \infty, [+\infty]}$	$\infty,\ [+\infty]$
$\alpha = 1$	uniqueness	$1,\ [+\infty]$	$1,\ [+\infty]$
$\alpha = 2$	existence	$\dfrac{(\beta u_0 > 0)\ 1, \left[\frac{1}{u_0}\right]}{(\beta u_0 < 0)\ 1, [+\infty]}$	$1, [+\infty]$

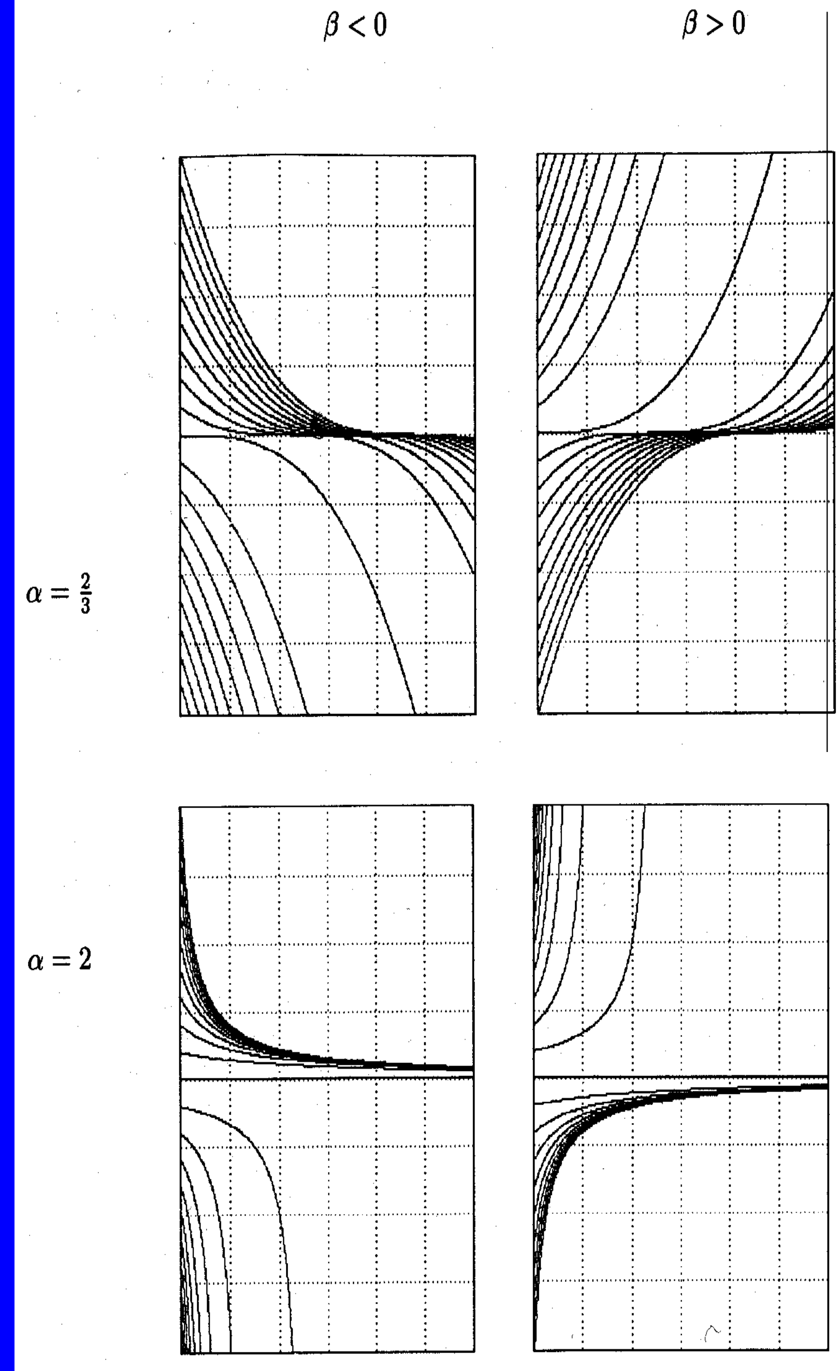
Table 2.4.1 — Theoretical existence and uniqueness results, number of solutions, and, in square brackets, maximal existence time for $|\beta| = 1$.



$\beta < 0$
$\beta > 0$
$\alpha = -2$



$\alpha = -1$



$\beta < 0$
$\beta > 0$
$\alpha = \frac{2}{3}$
$\alpha = 2$

Problema de los

3 cuerpos, ...

Henri Poincaré (1854-1941)

En 1908, H. Poincaré (1854-1912),

“puede ocurrir que pequeñas diferencias en las condiciones iniciales produzcan otras muy grandes en el fenómeno final. Un pequeño error en las primeras producirá otro enorme en las últimas. La predicción resulta imposible"

[24]

Características del Caos

Proceso determinista

Sistemas dinámicos no lineales

Trayectoria errática

Atractor

Hipersensible a las condiciones iniciales

Objeto fractal

S. IX – XX **HENRI POINCARÉ (1854-1912)**

ESCUELA RUSA

S. XX **KOLMOGOROV (1903 – 1987)**

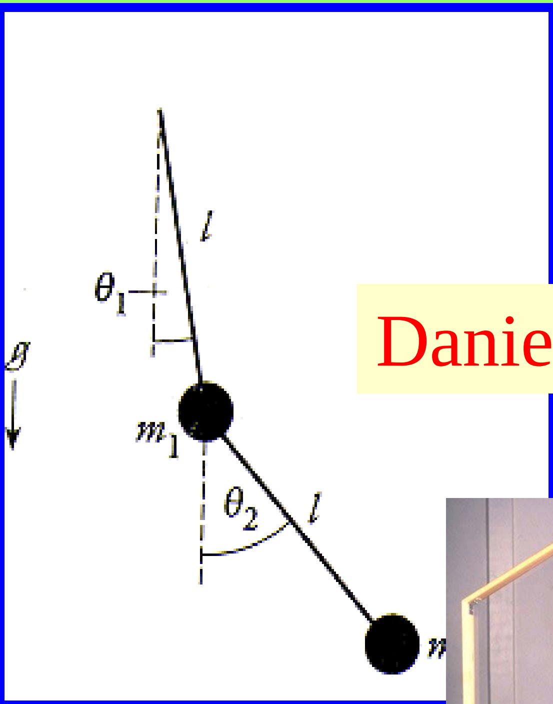
LORENZ (USA) 1961

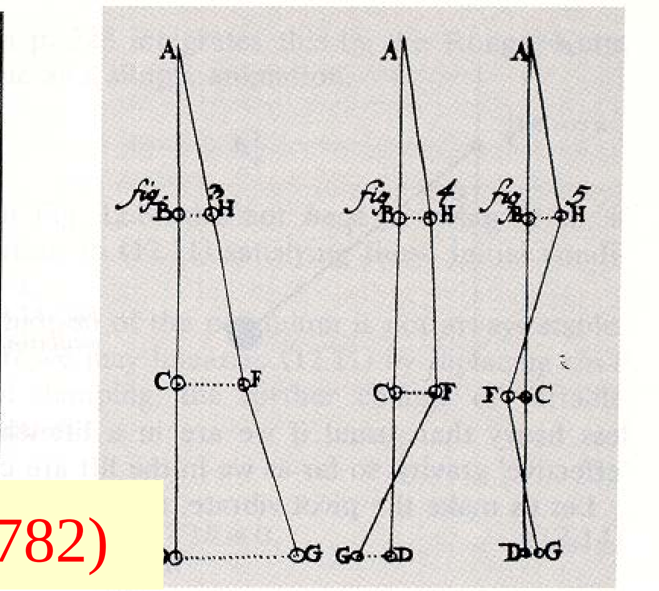
1961 – 75 **EXPLOSIÓN DE LA TEORÍA DEL CAOS**

1975 - 2000 **POPULARIZACIÓN**

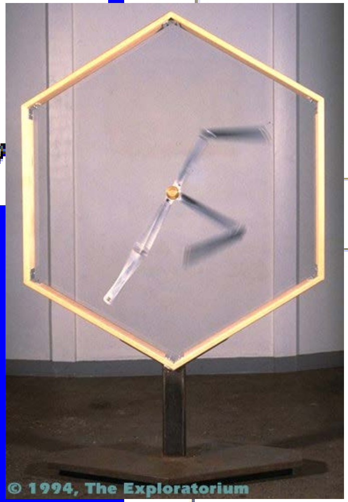
También en otros problemas:

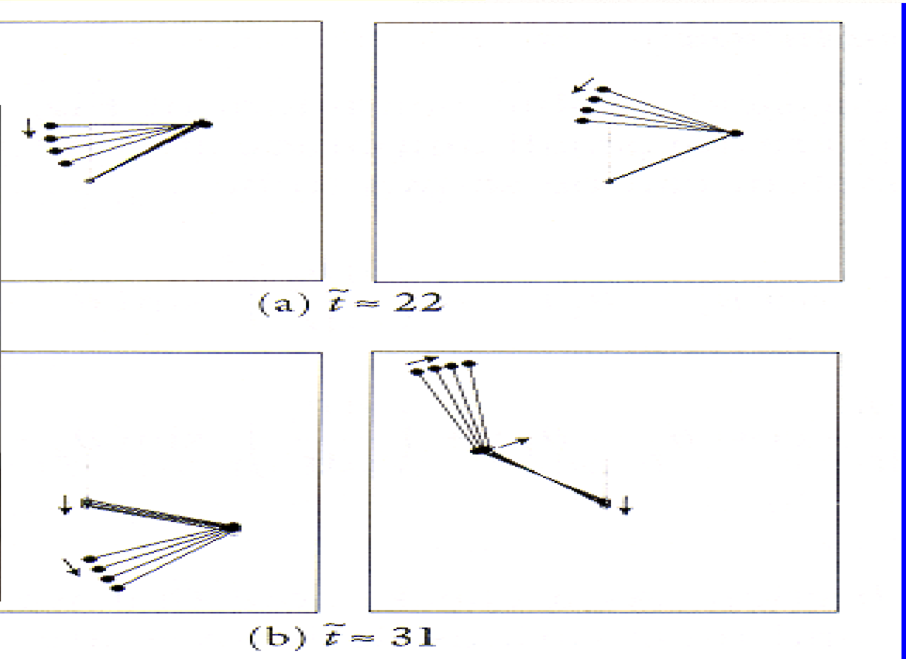
Caos: el péndulo múltiple





Daniel Bernoulli (1700-1782)

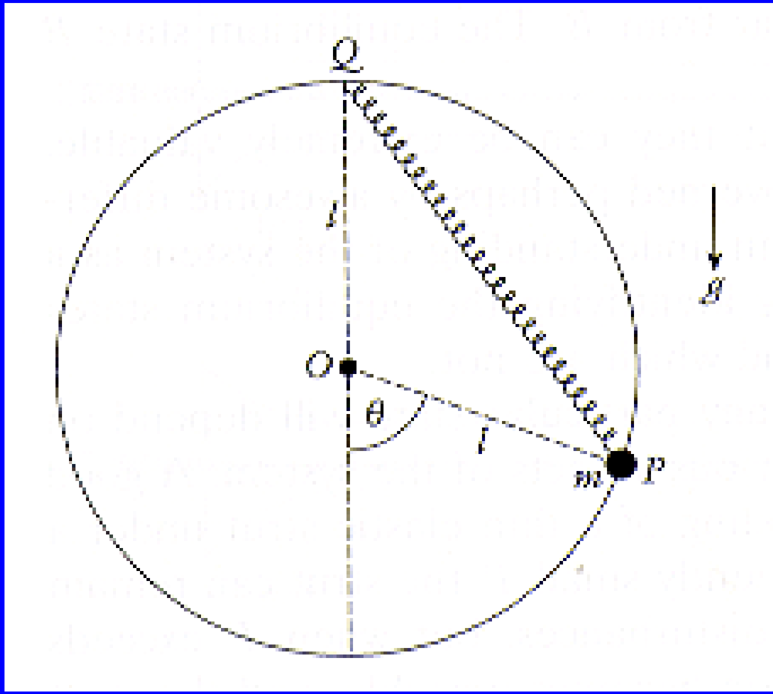


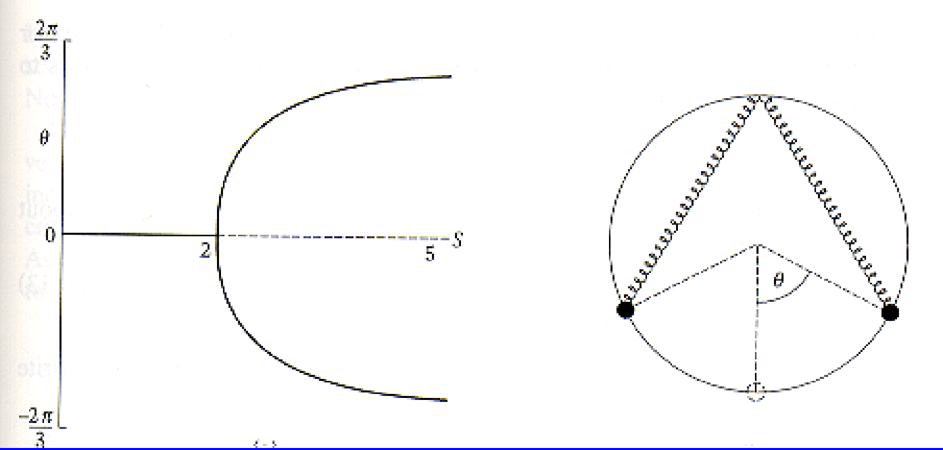


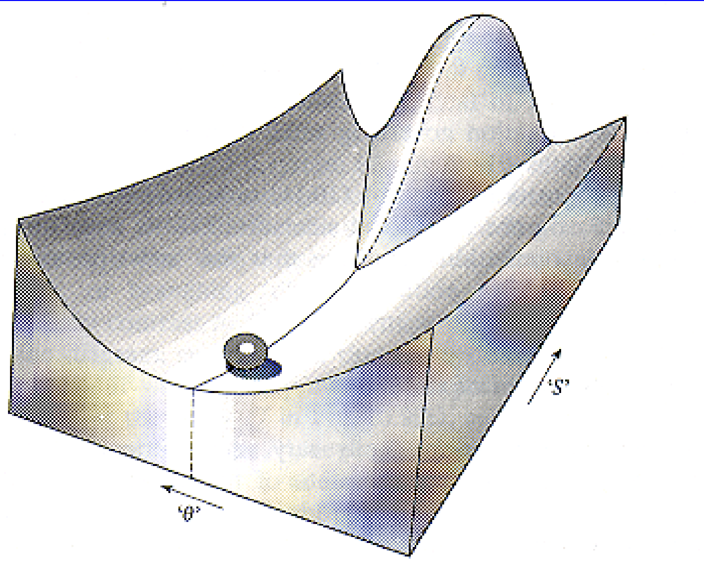
Caos en el
péndulo variable
(botafumeiro)

En Sistemas Dinámicos Continuos se necesitan al menos 3 grados de libertad para que ocurra el caos

Papel crucial de los parámetros: Bifurcación de equilibrios estacionarios



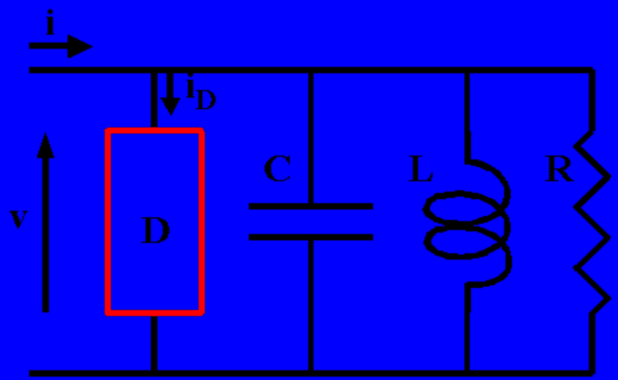


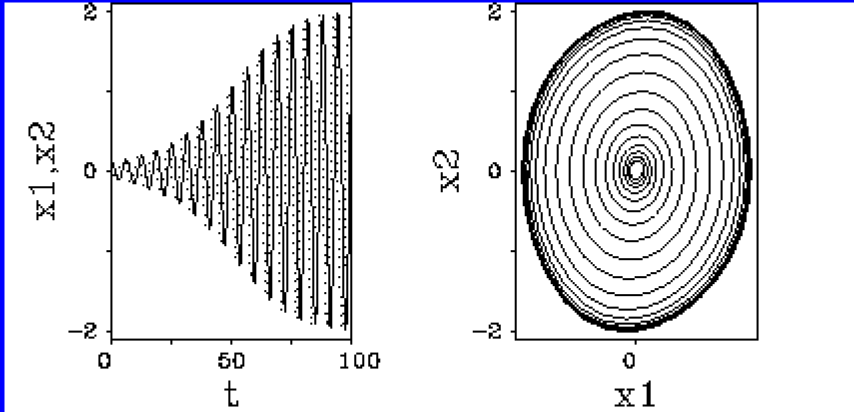


Otro ejemplo:
Péndulo en rotación

1.2. Motivación en **circuitos eléctricos**: van der Pol (1926): Teoría cualitativa de EDO,

Andronov(1930),Kolmogorov (1903 – 1987), …





$$\ddot{x} - \epsilon\left(1 - x^2\right)\dot{x} + x = 0$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= -x_1 + \epsilon\left(1 - x_1^2\right)x_2 \end{aligned}$$

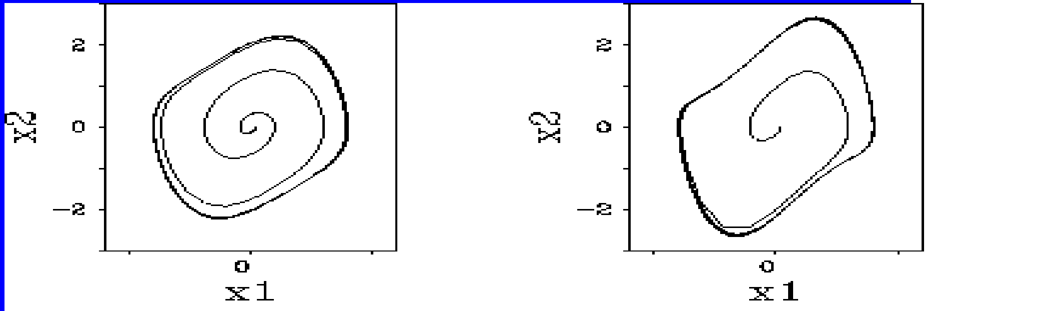


Abbildung 1.2: Phasenraumportrait für den van der Pol-Oszillator mit $\epsilon = 0.5$ (links) und $\epsilon = 1.0$ (rechts)

Criterios de soluciones periódicas: Teorema de Poincaré-Bendixon,..

THEOREM 2.7.1 *(Poincaré–Bendixson Theorem)*
Consider the autonomous system

$$\frac{d\mathbf{u}}{dt} = \mathbf{f}(\mathbf{u}), \qquad \mathbf{u} \in \mathbb{R}^2, \tag{2.7.14}$$

and a domain $\mathcal{D}$ in the (u_1, u_2)-plane.

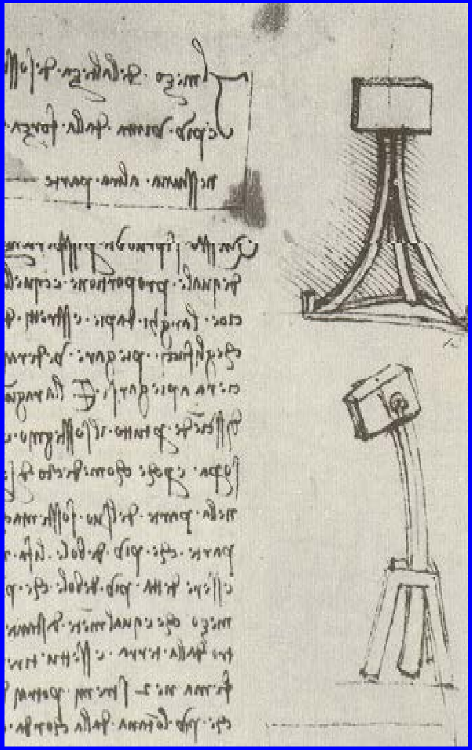
- *If $\mathcal{D}$ does not contain any stationary point and if no trajectory departs from $\mathcal{D}$, then $\mathcal{D}$ contains a limit cycle.*
- *If*

$$\nabla \cdot \mathbf{f} = \frac{\partial f_1}{\partial u_1} + \frac{\partial f_2}{\partial u_2}$$

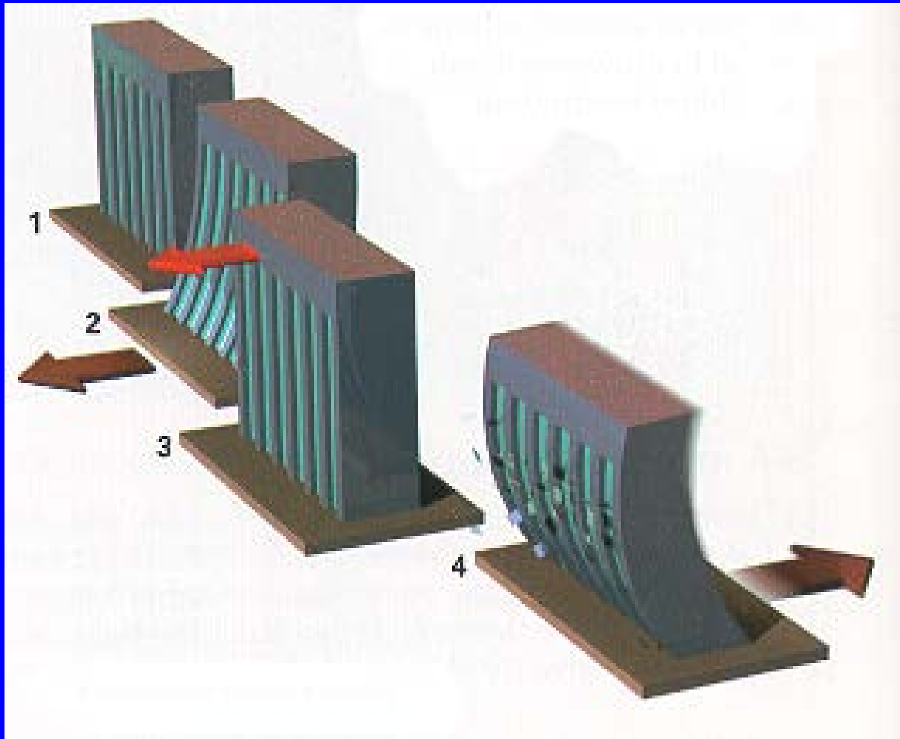
is continuous and does not change sign in $\mathcal{D}$, then no limit cycle can exist in $\mathcal{D}$. ■

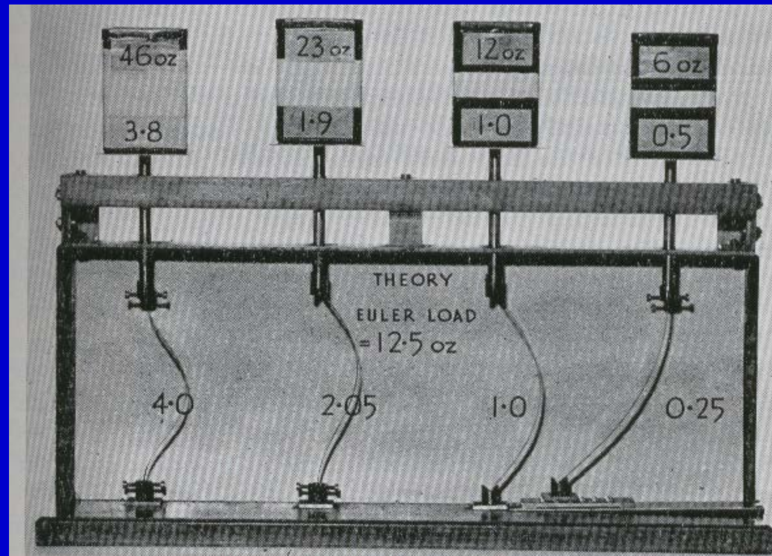
1.3. Una variante en Mecánica de Medios Continuos

Mecánica de Fluidos



Elasticidad



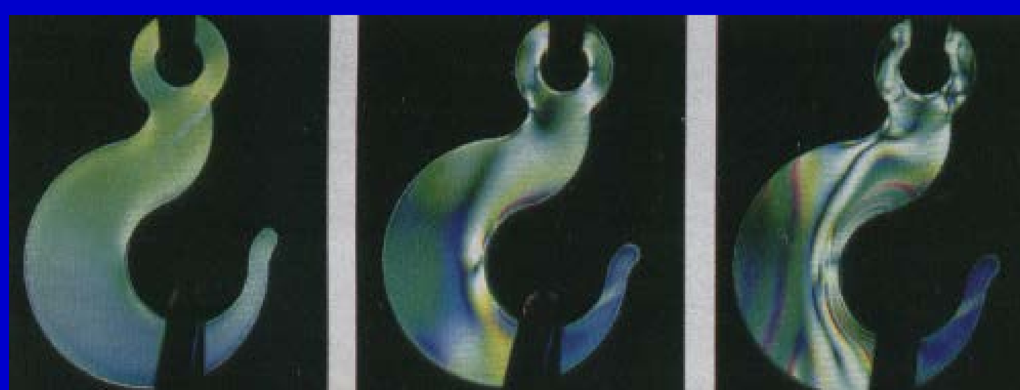


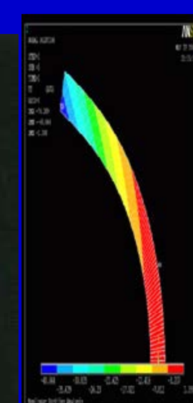
Diferentes perfiles de una columna

Validación (regreso a la modelización): Sección no despreciable (y no homogénea)

Teoría de la Elasticidad tridimensional

Navier, St. Venant,…





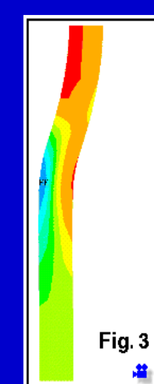
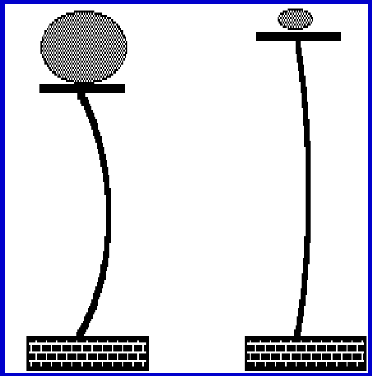
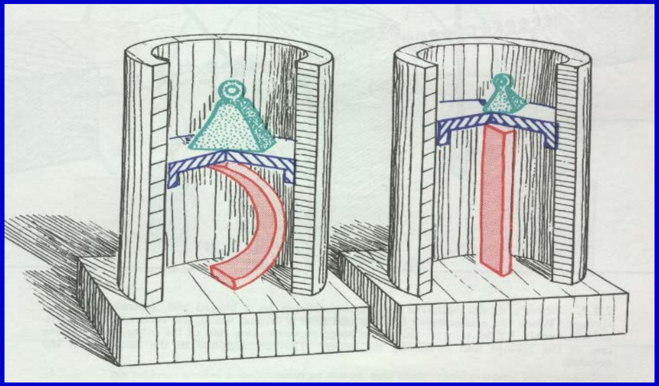
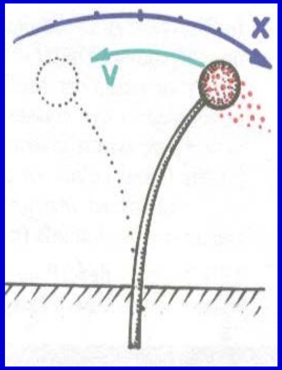


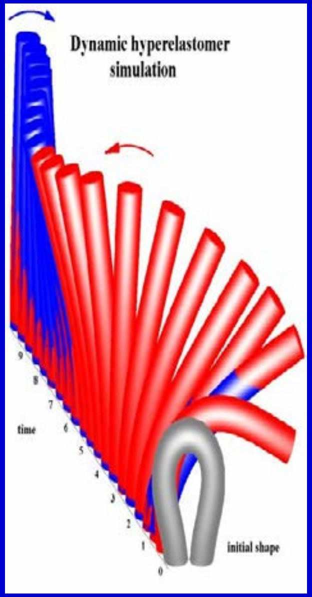
Fig. 3

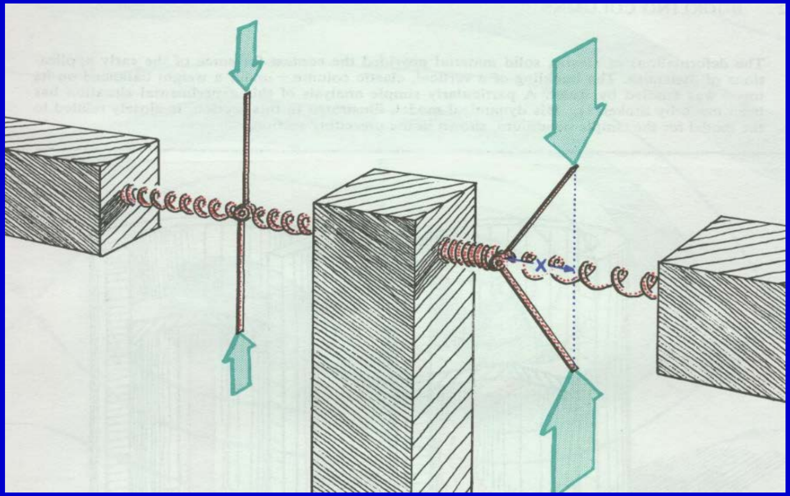
Observaciones sobre la dinámica (J.J. Stoker 1950)

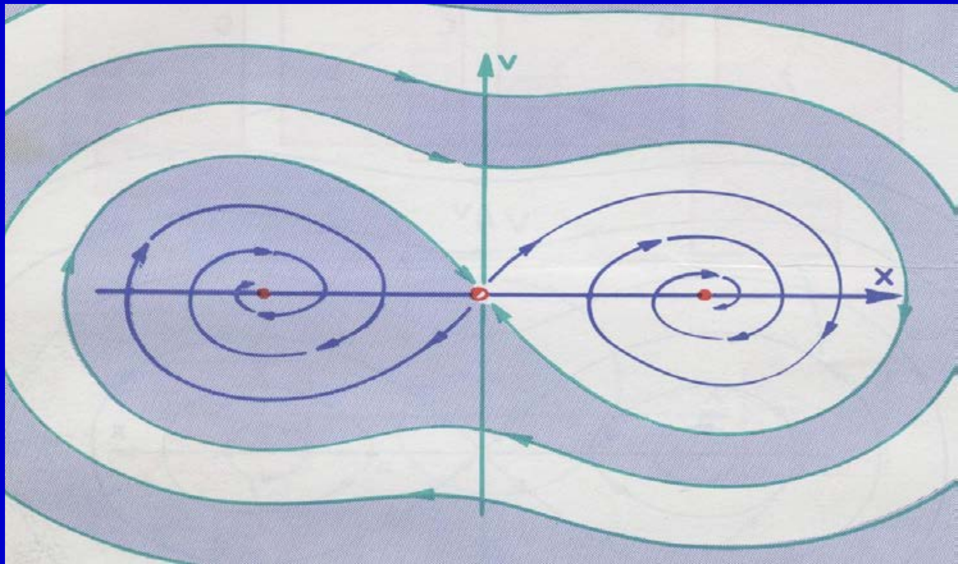








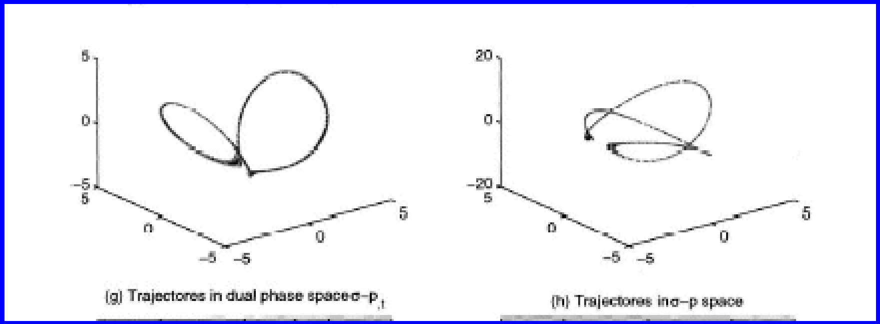


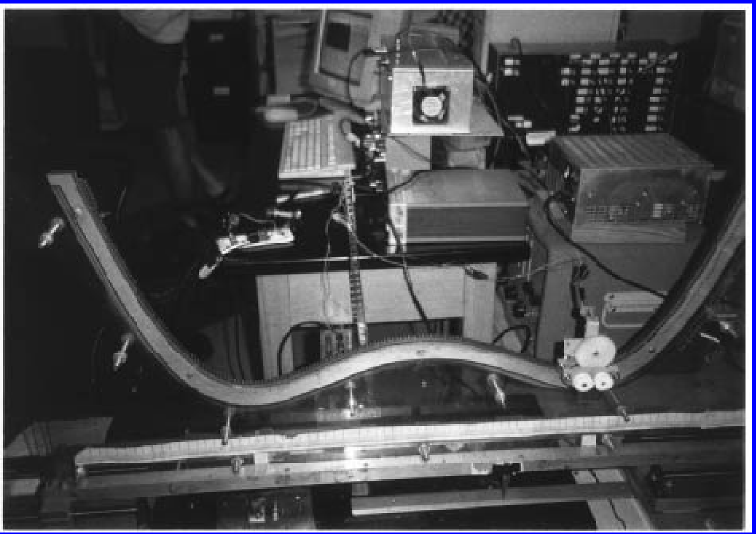


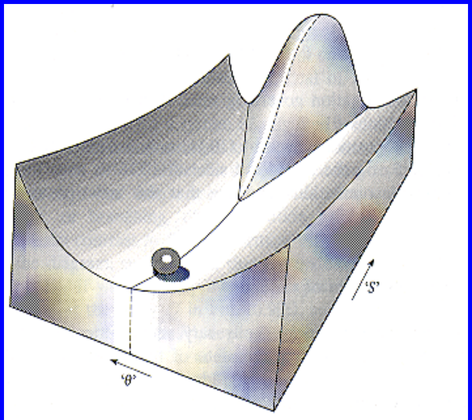
$$\frac{d^2x}{dt^2}+b\frac{dx}{dt}-x+x^3=F\cos(\omega t)$$

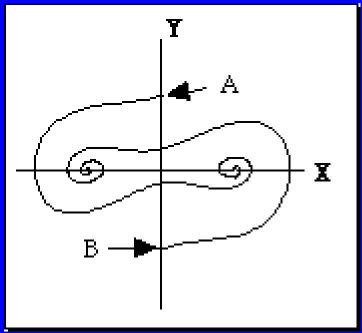
Ecuación de Duffing

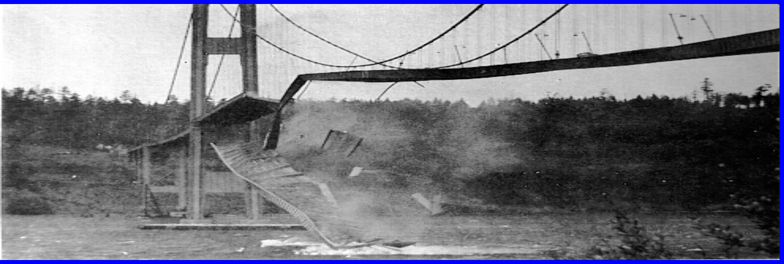
Con peso: dos equilibrios







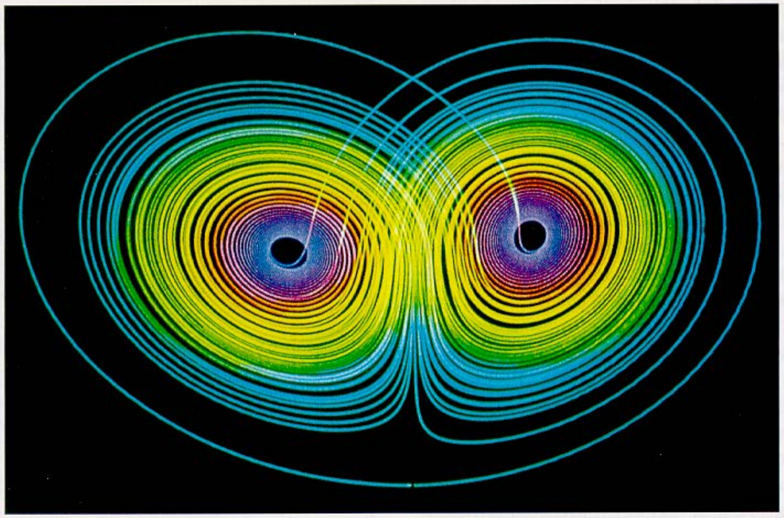




S.D. en espacios de dimensión infinita

Takoma Narrows (Washington, 1940)

1.4. Caos en Meteorolgía



El atractor de Lorenz. Ilustración de Chaos and Fractals. New Frontiers of Science. Edit. Springer-Verlag.

$$\frac{dx}{dt} + \sigma(x - y) = 0$$

$$\frac{dy}{dt} + y - rx + xz = 0$$

$$\frac{dz}{dt} + bz - xy = 0$$

Modelos atmosféricos (barotrópicos)

Claude **Navier** (1785-1836), Sir George Gabriel **Stokes** (1819-1903)

$$\frac{\partial v_i}{\partial t} + \sum_{j=1}^{3} v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x_i} - g\delta_{i3} + f_{ri}, \qquad i = 1, 2, 3,$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \sum_{j=1}^{3} v_j \frac{\partial \rho}{\partial x_j} = -\rho\,\mathrm{div}(\vec{v}).$$

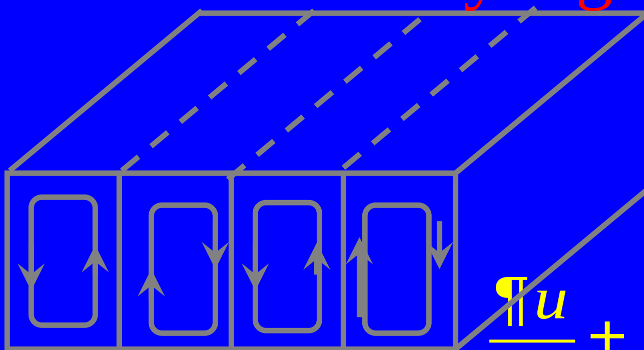
$$p = \rho R T\,.$$

$$C_p\left(\frac{\partial T}{\partial t} + \sum_{j=1}^{3} v_j \frac{\partial T}{\partial x_j}\right) = \frac{RT}{p}\left(\frac{\partial p}{\partial t} + \sum_{j=1}^{3} v_j \frac{\partial p}{\partial x_j}\right) + Q\,,$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \sum_{j=1}^{3} v_j \frac{\partial q}{\partial x_j} = Q',$$

Otros temas de Mecánica de Fluidos conduciendo al caos:

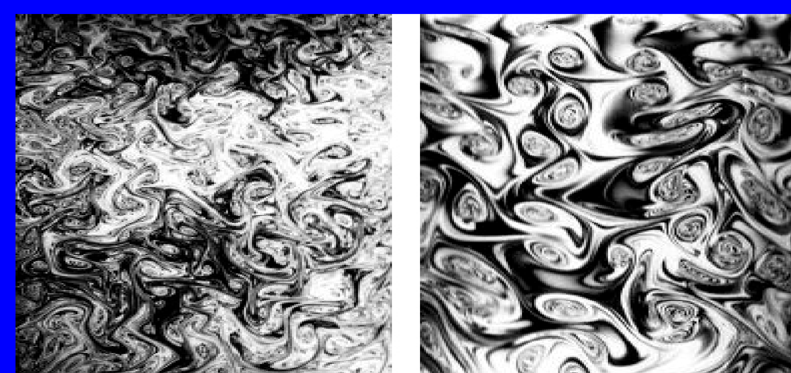
Células de Rayleigh-Benard



Boussinesq

$$\frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla) u = - \nabla p + \frac{1}{R_e} \Delta u + (T - T_0) g$$

Turbulencia (Kolmogorov)



1.5. El papel del ordenador: sistemas dinámicos discretos

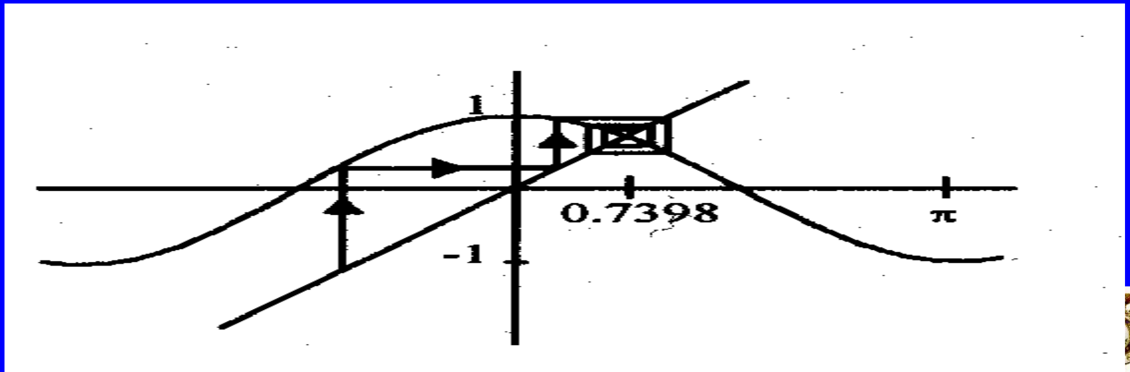
En su forma más general, un sistema dinámico discreto definido en un conjunto X no vacío es una aplicación Φ de $N \times X$ en X que verifica:

1.– $\Phi(0\ ,x) = x$, para todo x de X.

2.–$\Phi(n\ ,\Phi(m\ ,x)) = \Phi\ (n{+}m, x)$ para todos n,m de N,

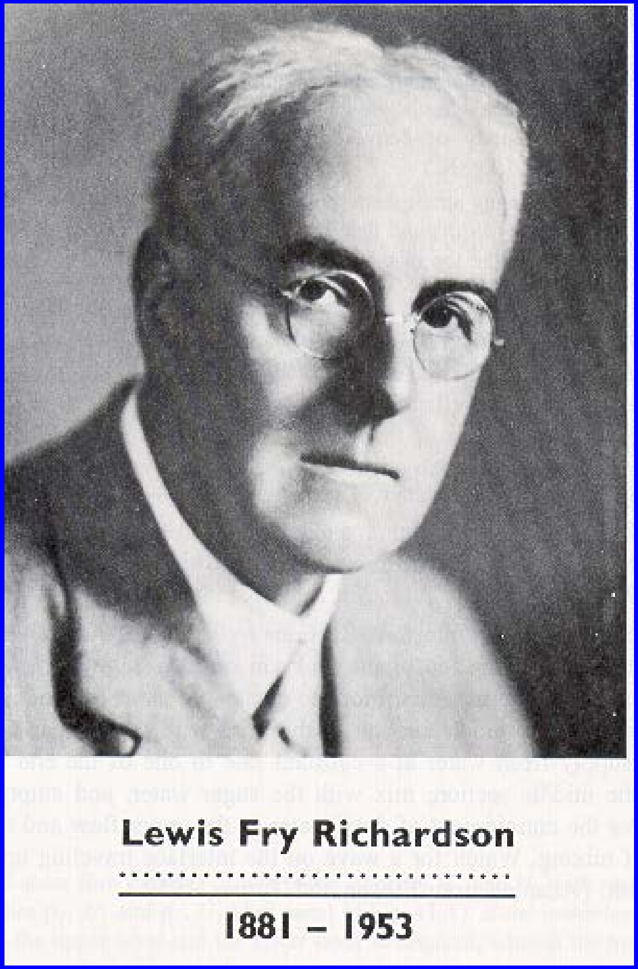
y para todo x de X.

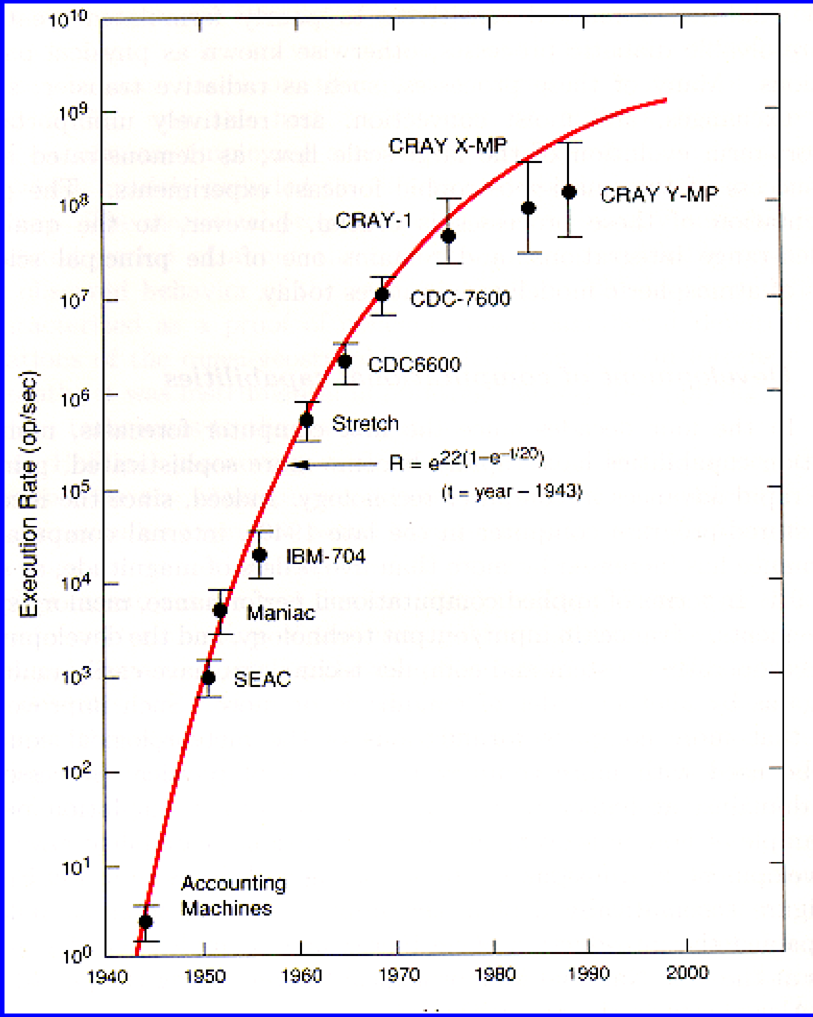
También suele usarse la notación $\Phi\ (n\ ,x) = \Phi_n\ (x)$



Richardson. Super-odenadores: Cálculo paralelo.

Las 64.000 máquinas de Richardson





Ley de G.E. Moore (1965) : "La potencia de computación se duplica cada año"

El ejemplo más simple de sistema dinámico discreto definido en un conjunto X es el obtenido iterando una aplicación de X en sí mismo:

Si $f : X \longrightarrow X$ y se define

$$\Phi(0, x) = x$$
$$\Phi(1, x) = f(x)$$
$$\Phi(n, x) = f(\Phi(n-1, x))$$

obtenemos un sistema dinámico sobre X.

Nótese que $\Phi(n, x) = f(f(f(\ldots(f(x))\ldots)) = f^{n}(x)$, si se conviene en que f^{0} es la aplicación identidad.

Dado un punto x_0 el conjunto de sus imágenes por f ,

$$O(x_0) = \{x_0 , f(x_0) , f^2(x_0) ,\ldots.\}$$

se denomina la <u>*órbita*</u> de x_0.

Si $f(x_0) = x_0$, el punto x_0 se llama punto fijo de f.

Si para algún natural $k > 1$ se verifica que $f^k(x_0) = x_0$,

el punto x_0 se dice <u>*periódico*</u> , y la órbita correspondiente órbita periódica. El menor k que verifica la relación anterior se llama *período* de la órbita.

Un punto x_0 se llama eventualmente periódico si existe un natural s tal que el punto $f^s(x_0)$ es periódico.

Sistemas dinámicos discretos en diversos contextos.

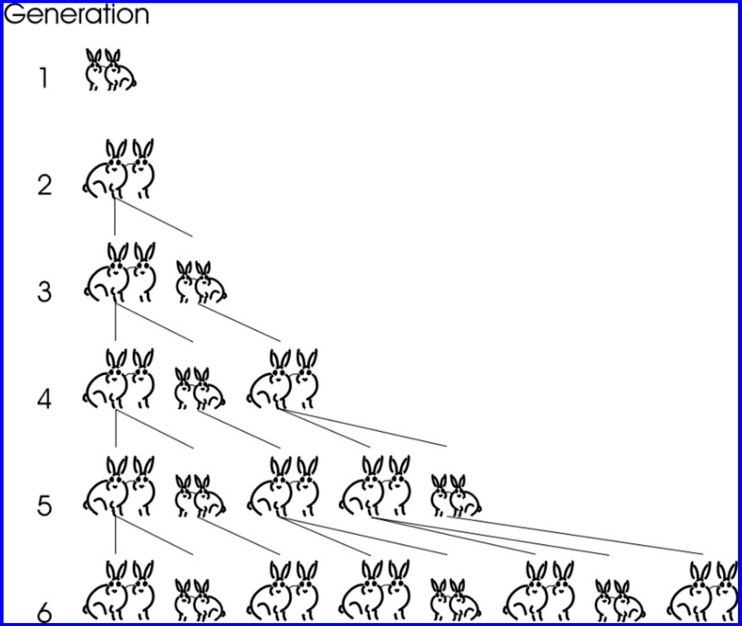
Un ejemplo de sistema dinámico discreto (no caótico) en un contexto inesperado: **los números de Leonardo Fibonacci** (sigloXII).

Modelo de crecimiento de esa población basado en las siguientes reglas:

(a) Un par de conejos se reproducen por parejas

(b) Una pareja da lugar a otra nueva)

(c) No se mueren



Sea F_n el número de Fibonacci de parejas en la generación n

$\{F_n\}= \{1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, 89, 144, \ldots\}$

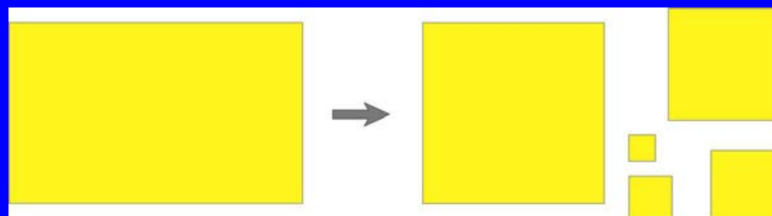
$$F_n = F_{n-1} + F_{n-2} \qquad n>2$$

También se aplica al crecimiento de las hojas (y frutos) de ciertas plantas

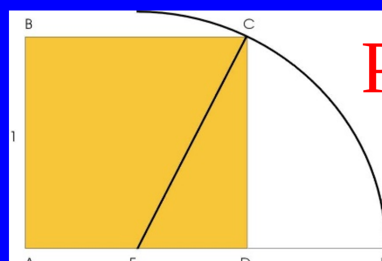
Por ejemplo, los lirios y los diafragmas tienen 3 pétalos, las primaveras y los ranúnculos tienen 5 pétalos, las flores del maíz tienen 13 pétalos, y las margaritas pueden tener 34, 55 y 89 pétalos.

Se tiene que $\phi = \frac{(1+\sqrt{5})}{2}$

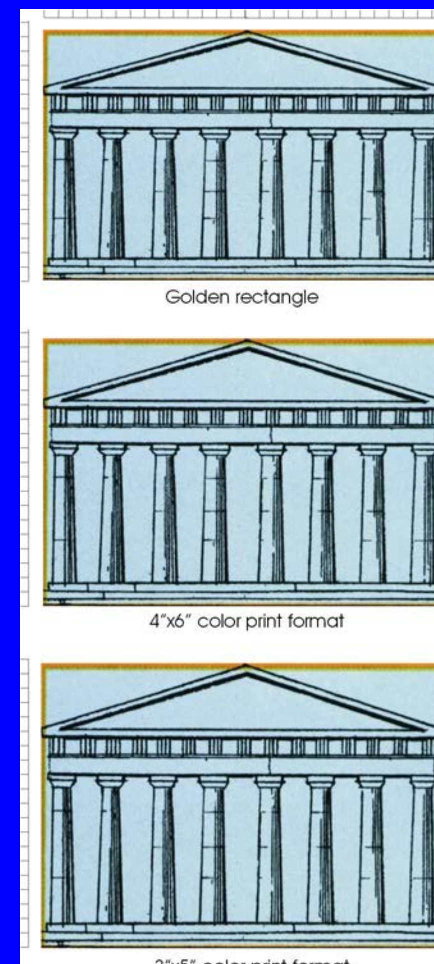
F_n / F_{n-1} ® f =1.61803398…

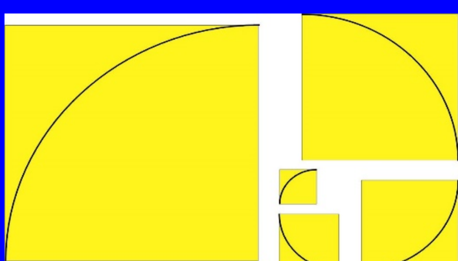


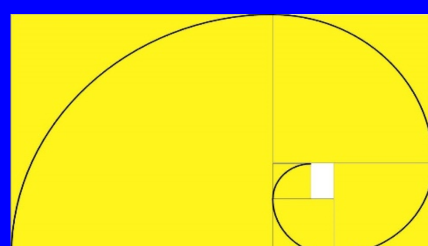
$\phi = 1 + \frac{1}{\phi}$



Partenon (Grecia)







Otra conexión inesperada con sistemas dinámicos discretos:

$$f(x) = 1 + \tfrac{1}{x}$$

$$f(f(x)) = 1 + \frac{1}{\underset{\substack{\Uparrow \\ 1+\frac{1}{x}}}{x}} = 1 + \frac{1}{1+\frac{1}{x}}$$

$$f(f(f(x))) = 1 + \frac{1}{1+\frac{1}{\underset{\substack{\Uparrow \\ 1+\frac{1}{x}}}{x}}} = 1 + \frac{1}{1+\frac{1}{1+\frac{1}{x}}}$$

$$f(f(f(f(x)))) = 1 + \frac{1}{1+\frac{1}{1+\frac{1}{\underset{\substack{\Uparrow \\ 1+\frac{1}{x}}}{x}}}} = 1 + \frac{1}{1+\frac{1}{1+\frac{1}{1+\frac{1}{x}}}}$$

$$f(\ldots f(x)) = 1 + \cfrac{1}{1+\cfrac{1}{1+\cfrac{1}{1+\cfrac{1}{1+\cfrac{1}{1+\cfrac{1}{1+\cfrac{1}{1+\cfrac{1}{1+\frac{1}{x}}}}}}}}}$$

Si estudiamos la órbita de x=infinito basta con despreciar los términos en $\frac{1}{x}$

$$f(\infty)=1$$

$$f(f(\infty))= 1+\tfrac{1}{1}=2$$

$$f(f(f(\infty)))=1+\frac{1}{1+\frac{1}{1}}=\frac{3}{2}$$

$$f(f(f(f(\infty))))= 1+\frac{1}{1+\frac{1}{1+\frac{1}{1}}}=\frac{5}{3}$$

No. de iteraciones	Valores de la órbita
0	1
1	2
2	3/2=1.5
3	5/3=1.66666…
4	
5	
6	
7	
8	
9	89/55=1.61818 …

Sensibilidad a las condiciones iniciales

El sistema dinámico obtenido por iteración de la aplicación f de X en X es sensible a las condiciones iniciales si existe una distancia $r > 0$ tal que para cualquier punto x_0 de X y cualquier entorno U de x_0 existen un punto y de U y un entero positivo k tales que

$$d(f^k(x_0), f^k(y)) > r$$

Transitividad

El sistema dinámico obtenido por iteración de la aplicación *f* de *X* en *X* es transitivo - o tiene la propiedad de *mezcla* - si para cualesquiera abiertos no vacíos *U* y *V* de *X* existe un natural *k* tal que

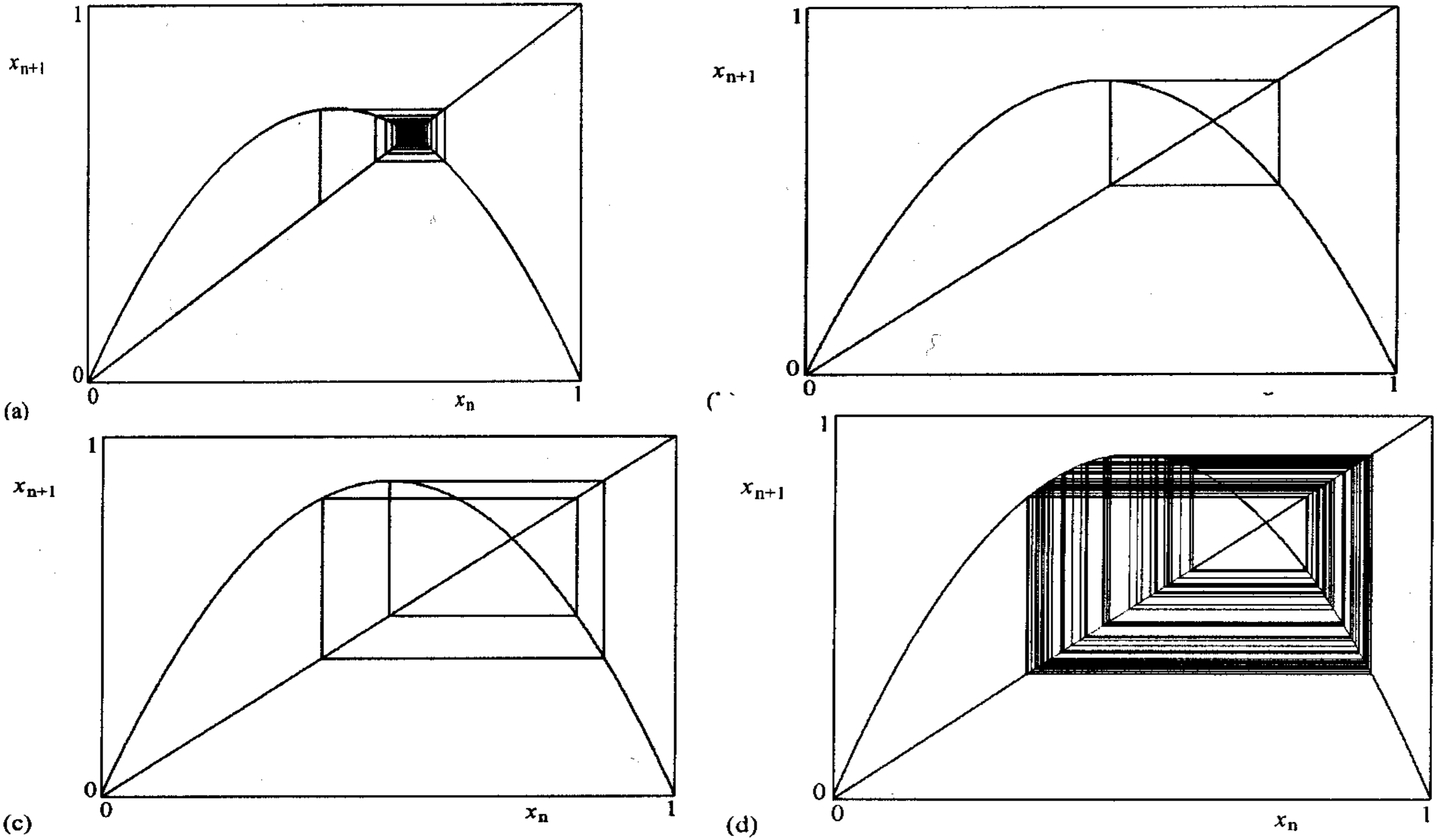
$$f^k(U) \cap V \neq \phi$$

Este hecho significa, hablando informalmente, que en cualquier entorno de cualquier punto hay puntos cuyas órbitas visitan en su recorrido a casi todo el espacio.

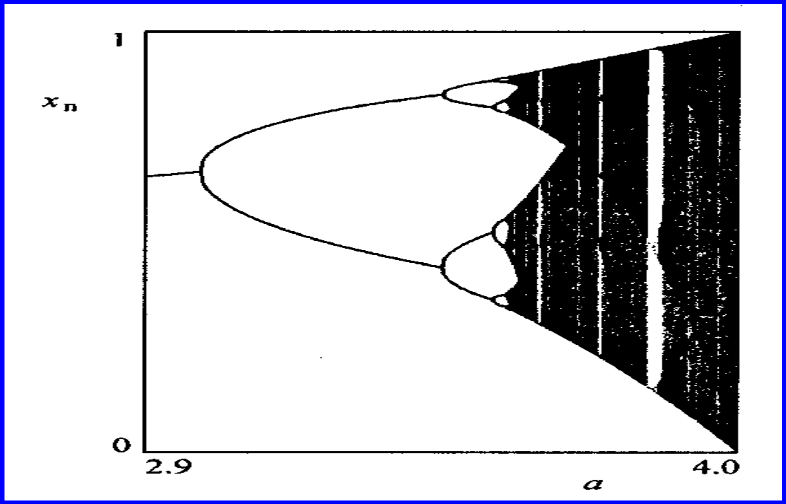
Sistemas caóticos

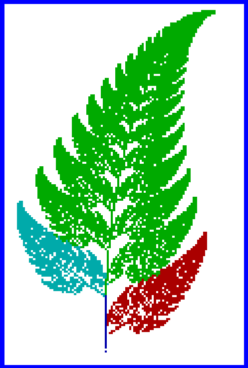
Un sistema dinámico discreto es caótico si:

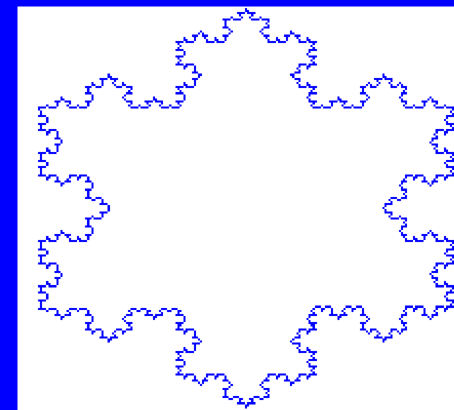
- Es sensible a las condiciones iniciales
- Es transitivo
- Las órbitas periódicas son densas en el espacio

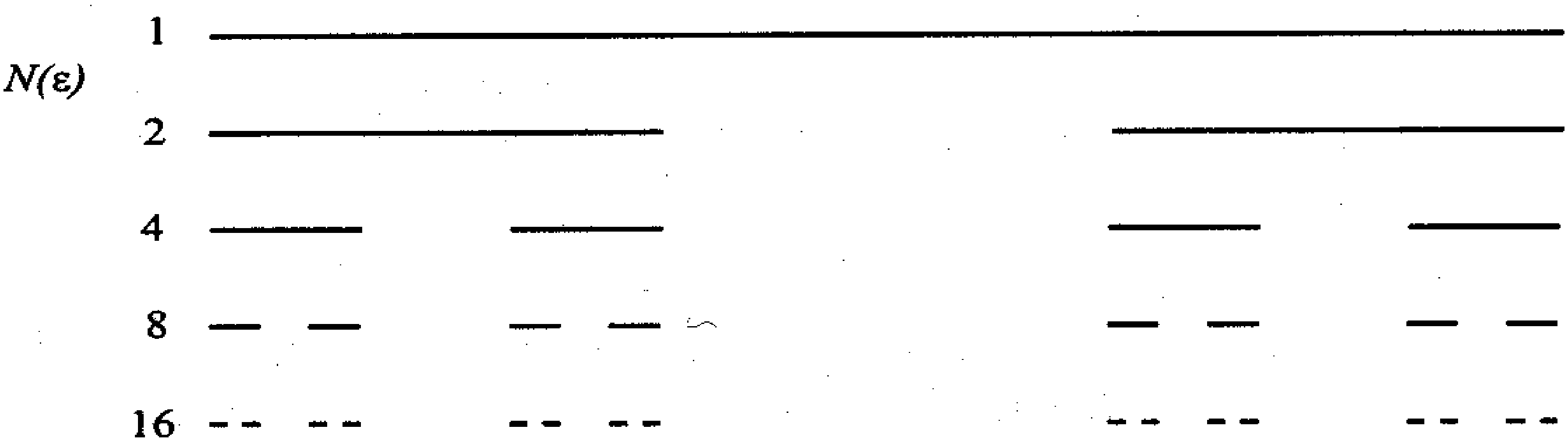


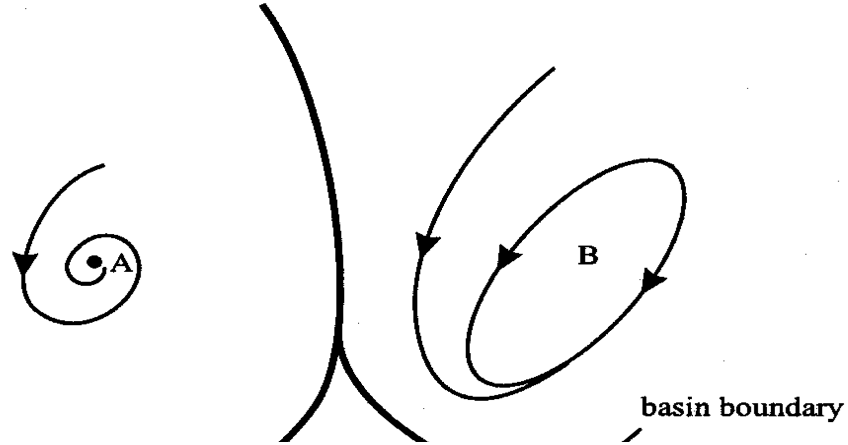
$1+\sqrt{6} > a > 3$. As a increases beyond this, successive bifurcations give rise to a cascade of period doublings, producing cycles of periods 4 (Fig. 3.5c), and then 8, 16, ..., 2^n. With further increase of a we observe a chaotic regime, in which trajectories look like the sample functions of random processes (Fig. 3.5d).

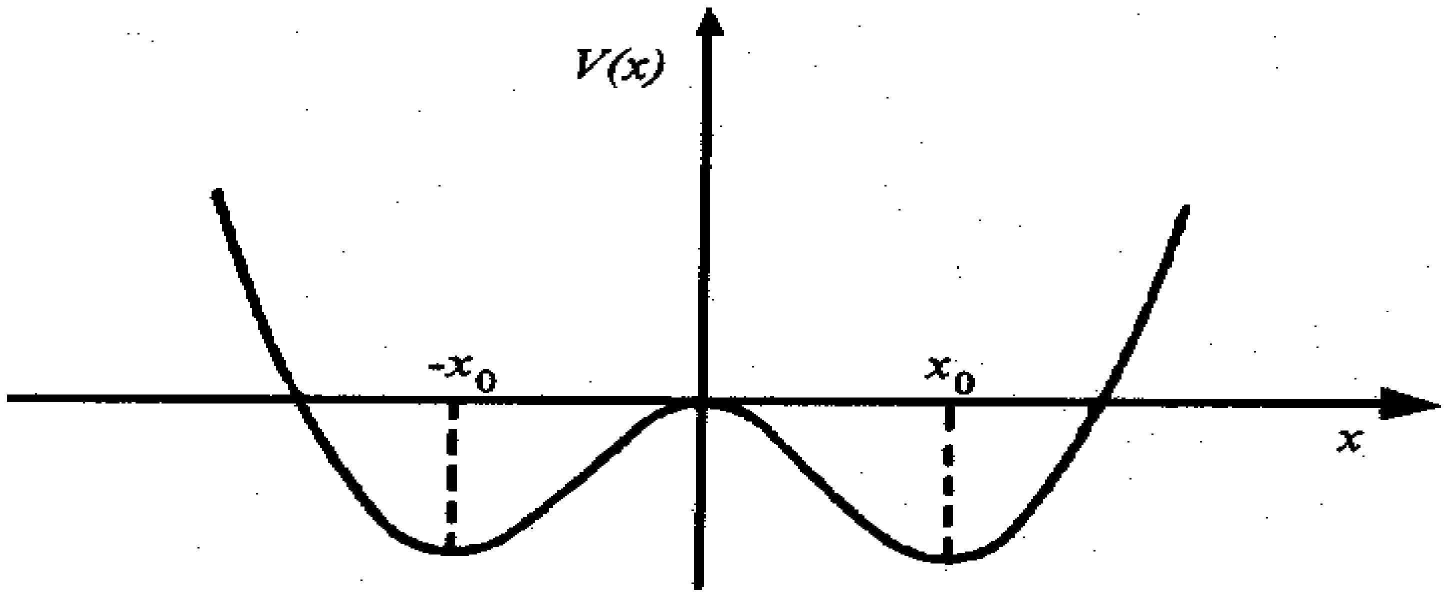

1
x_n
0
2.9
4.0
a



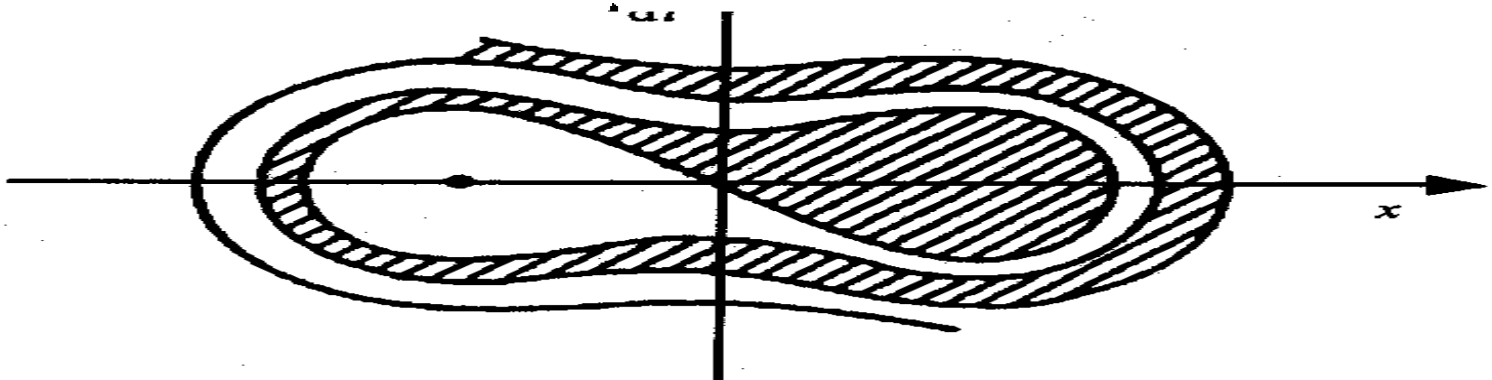



N(ε)
1
2
4
8
16





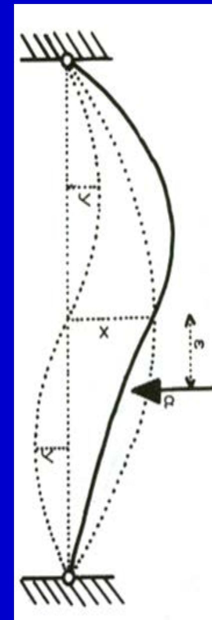
(a)

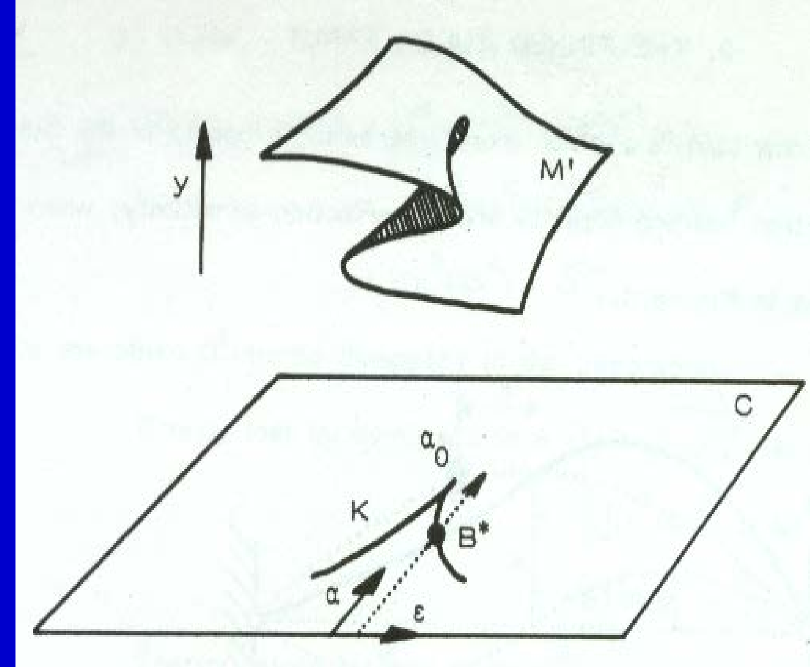


(b)

Muchos otros contextos:

Catastrophe Theory, E. C. Zeeman:
Selected papers 1972-1977

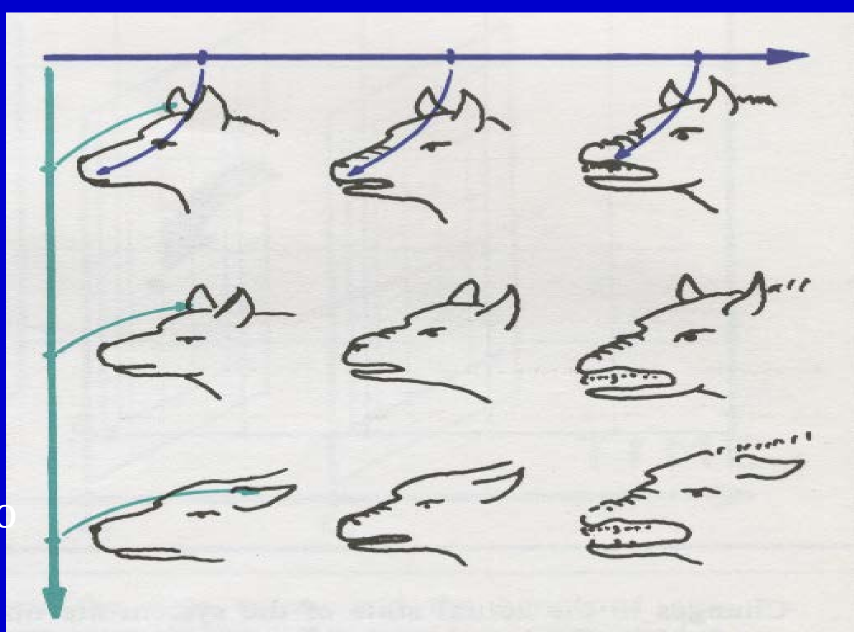


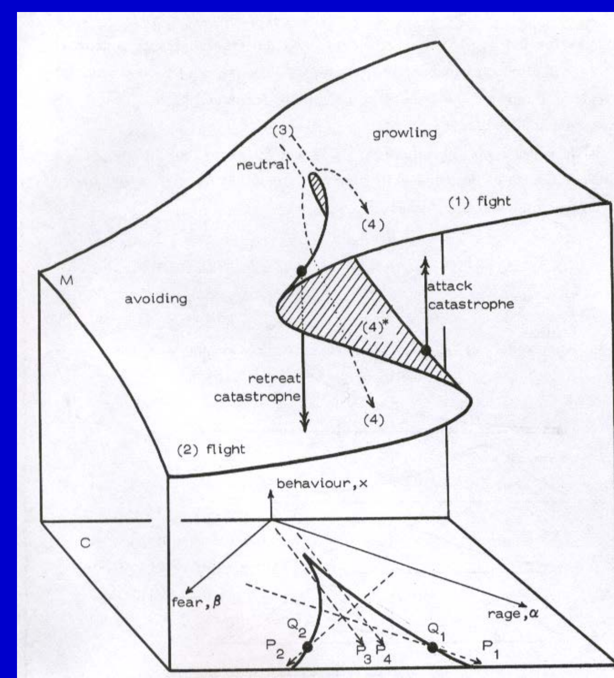


Psicología: mecanismo de agresión

rabia

miedo





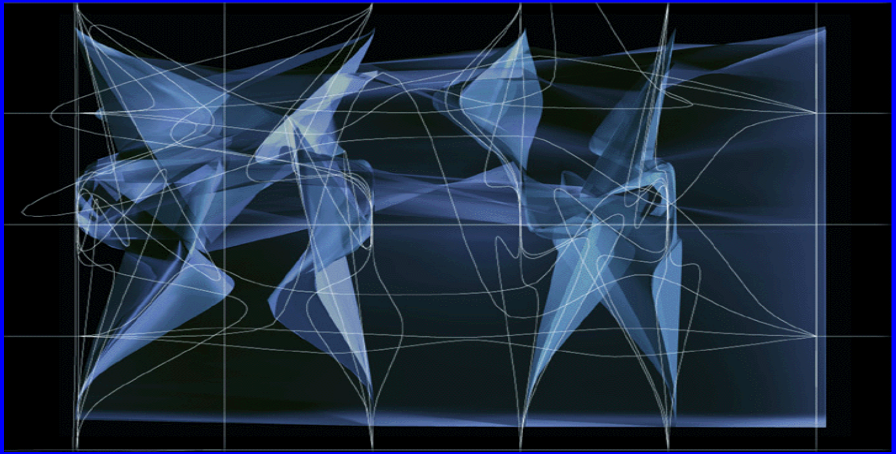
EL PAIS, 17 de enero de 2005 Suplemento, Exposición en el Centro Conde Duque

Pedro Colón de Carvajal, Abelardo Gil-Fournier, Mauro Gil-Fournier y Miguel Jaenicke, La ciudad: un sistema dinámico de vivencias, 2003. Proyecto de investigación transdisciplinar. **La ciudad es un sistema dinámico en el que la cualidad del tiempo se corresponde con la calidad de la comunicación. Y más en Dakar, donde el tiempo se mide con distancias largas y recorridos lentos. En un sistema que integra sus interferencias debidas al azar, la sorpresa, la aleatoriedad o lo imprevisto, la comunicación se transforma en tiempo, experiencia, vida.**

Peter David Eisenman *1932

Premio Bienale de Venezia, 2004

Complejidad creciente

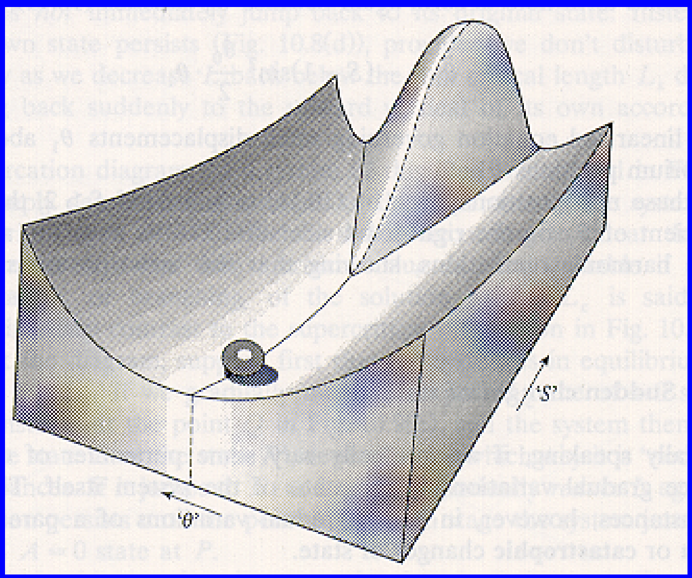


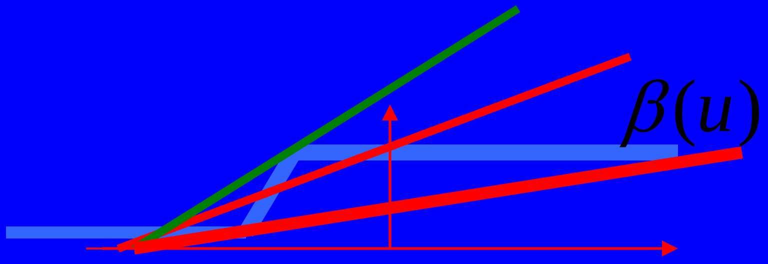
Competition for a Virtual House. 1997,

Ciudad de la Cultura, Santiago

Staten Island Institute of Arts and Sciences. 1997

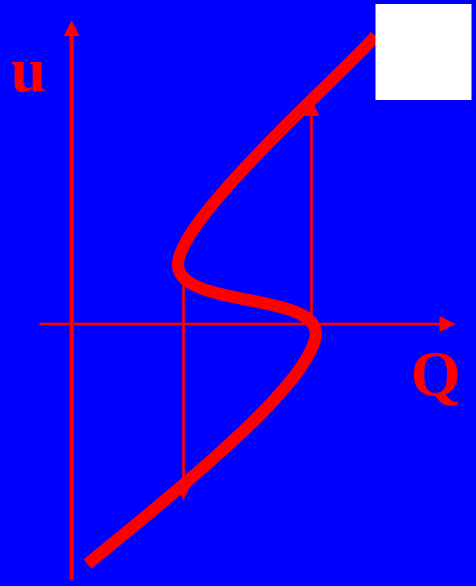
Bifurcación e Histéresis





Equilibrios del Modelo 0-dimensional

$$A + Bu = Q\beta(u)$$



Principio de causalidad

"Nada surge sin un plan"

Leucipo y (su discípulo)

Demócrito de Mileto
(425 a de C)

Matemáticas / Tecnología

Quehacer científico: convivencia del deseo de comprensión racional del mundo con la intención de actuar o controlar para conseguir fines difícilmente accesibles.

Euclides / Arquímedes: legendarias invenciones, transporte de líquidos, espejos parabólicos (hace 2.200 años) …

Recreación:
David Wallace
MIT
(4/10/2005)

Historia de la Tecnología en España, Dirigida por F. J. Ayala-Carcedo, Valatenea, Barcelona, 2001

PERÍODOS HISTÓRICO-TECNOLÓGICOS

ERA DE LA TÉCNICA

ERA	PERÍODO/FASE		CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES: TECNOECONÓMICAS	CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES: SOCIOHISTÓRICAS
CAZADORA-RECOLECTORA	**Cultura del Guijarro y Paleolítico**		Piedra tallada, hueso, madera Fuego desde hace 400.000 años Períodos glaciales cada 110.000 años	Sociedades nómadas Mutaciones humanas biológicas (Del *Homo habilis* al *Sapiens sapiens*)
	Mesolítico (1ª Transición Tecnológica) 10000-7000 a.C.		Calentamiento del clima y migración de la megafauna al norte	Crisis alimentaria
AGRARIA	**Neolítico** (1ª Revolución Tecnológica) 7000-5000 a.C.		Agricultura y ganadería. Piedra pulimentada, cerámica, tejidos (1os materiales artificiales). Energía animal	Aparece el excedente económico: artesanos, comercio y explosión demográfica Sociedades sedentarias gentilicias
	Calcolítico (2ª Transición Tecnológica) 5000-3000 a.C.		Cobre, oro, plata Escritura	Primeras ciudades y estados territoriales Primeras civilizaciones e imperios hidráulicos (Mesopotamia, Egipto, India, China). Esclavitud
	I Edad de los Metales y Edad Media (2ª Revolución Tecnológica)	Bronce 3000-1400 a.C.	Comienzos de la Ciencia Máquinas simples	
		Hierro d. 1400 a.C.	1as Redes de transporte internacionales 1er Período de la manufactura 2ª Revolución Agrícola, ss. XIII-XIV d.C. 1ª Revolución Científica (Grecia)	Civilizaciones e imperios clásicos marítimos (Grecia, Roma). Esclavitud Sociedad feudal medieval y servidumbre Gremios
	Protoindustrialización (3ª Transición Tecnológica) (1500-1765)		Uso intensivo de las energías naturales: hidráulica y eólica. Apogeo de la manufactura. 2ª Revolución Científica (s. XVII) Imprenta (1455) 3ª Revolución Agrícola (ss. XVII-XVIII)	d. 1400: Período de descubrimientos e imperios marítimos (Portugal y España principalmente). Renacimiento 2ª Revolución Comercial 2ª Revolución Urbana

ERA DE LA INGENIERÍA

INDUSTRIAL	**Revolución Industrial** (3ª Revolución Tecnológica) (1765-1960)	Primera Revolución Industrial (1765-1885)	Energías artificiales (máquinas de vapor) y no renovables (carbón) Auge del uso de metales Telégrafo electromagnético Nuevas ciencias: Química, Electromagnetismo, Geología Fábricas y producción en serie	Explosión demográfica y urbana en Europa (d. 1700). Caída continua de la poblacion agraria relativa y aumento de la obrera asalariada Revoluciones democráticas en Europa Apogeo del liberalismo económico Liderazgo inglés. Paz internacional
		Segunda Revolución Industrial (1885-1960)	Petróleo e hidroelectricidad. Plásticos Electrificación Cine, radio, televisión, teléfono Aviación, automóviles Nuevas ciencias: Relatividad, Mecánica Cuántica, Física Nuclear. Ciencias frontera simples. Apogeo de la fábrica y la producción en cadena	Proteccionismo e intervención del Estado en la economía. Estado del bienestar y sociedad de consumo. Capitalismo de Estado (URSS, etc.) Guerras mundiales Estados emergentes en las antiguas colonias Liderazgo norteamericano (alemán hasta 1944; ruso d. 1944 hasta 1990) Apogeo de los imperialismos Completada la sustitución del trabajo manual por la máquina
	Transición a la Era de la Inteligencia Artificial (4ª Transición Tecnológica) (1960-?)		Ordenadores y Telemática Energía nuclear. Biotecnología Era Espacial Ciencias frontera complejas Era de la Producción Automatizada Era de la Información y de los Sistemas Complejos	Apogeo de los servicios. Liberalización económica y capitalismo oligopólico y multinacional Crisis del Estado del bienestar Sociedad global mediática Integración político-económica y declive de los estados nacionales Ascenso de Japón y China Liderazgo norteamericano hacia un mundo multipolar Lenguas globales (inglés, español) Sustitución del trabajo intelectual por el computerizado