

Introducción a la solución numérica de ODE's

Guía computacional 1 - Mecánica Clásica 2016 - Clase G. Mindlin

Ignacio Poggi - L.U: 567/07 - ignaciop.3@gmail.com

9 de abril de 2016

1. Enunciado

En la sección de materiales adicionales de la cátedra se encuentra un programa principal y un integrador Runge-Kutta de orden 4 (rk4) en lenguaje C. En el programa principal se encuentra escrita una ecuación diferencial a integrar, los parámetros y las condiciones iniciales. Sobre este código van a trabajar en las siguientes actividades realizando las modificaciones pertinentes para su problema en particular.

En ubuntu es posible compilar y ejecutar el código directamente desde una terminal abierta en una carpeta que contenga tanto el programa principal como el integrador rk4:

```
gcc ODE.ejX.c -o ode_ejX -lm rk4.c
```

```
./ode_ejX
```

Se obtendrá como salida un archivo llamado *ejX.dat*, donde *X* es el número del ejercicio, que contiene el resultado de la integración. Los resultados pueden ser analizados gráficamente mediante un graficador, en nuestro caso utilizaremos **gnuplot** que se controla mediante comandos en terminal.

Actividad 1

Editar el código de ODE.c para analizar los siguientes puntos:

- Cómo varía el resultado según el paso de integración. Programe una integración con el método de Euler y compare.
- Analizar cómo evoluciona el sistema dadas distintas condiciones iniciales.

Qué tipo de conclusiones puede obtener a partir de los análisis anteriormente realizados.

Actividad 2 - Oscilador armónico amortiguado

El oscilador armónico amortiguado es un problema del cual se conoce la solución analítica cuya ecuación diferencial que rige el movimiento es:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\gamma \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = 0 \quad (1)$$

Estudie numéricamente las soluciones del sistema según la relación de los parámetros, para ello: escriba la ecuación de segundo orden como dos ecuaciones de primer orden, varíe γ y ω e integre. También analice distintas condiciones iniciales. Compare con lo conocido de la solución analítica, para ello grafique como evoluciona la posición en el tiempo, la velocidad y cuál es la trayectoria en el espacio de fases $x\dot{x}$.

Actividad 3 - Oscilador de Van der Pol

Es un tipo de oscilador con un amortiguamiento no lineal descrito a principio de siglo por Van der Pol quien estudió circuitos eléctricos con componentes no lineales obteniendo la ecuación:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \mu(x^2 - 1)\frac{dx}{dt} + x = 0 \quad (2)$$

Este sistema presenta soluciones oscilatorias para ciertos valores del parámetro μ que son conocidas como oscilaciones de relajación. Esta ecuación tiene una importancia en la ciencia ya que fue usada en distintos campos para describir por ejemplo, el comportamiento de una falla tectónica o el potencial de acción de una neurona. Esto se debe a que el sistema según los valores de x presenta un amortiguamiento positivo (como el de la actividad 2 donde el sistema pierde energía), y para otros presenta un amortiguamiento "negativo" donde el sistema gana energía. Esto produce que eventualmente la energía perdida en un ciclo sea igual a la ganada generando oscilaciones autosostenidas. Este sistema se verá con más detalle avanzado el curso, en esta práctica se propone realizar un acercamiento de forma numérica para tener cierta comprensión de cómo se comporta el mismo.

- Escriba el sistema como dos ecuaciones de primer orden.
- Inspeccione numéricamente las soluciones posibles del sistema, estudie como varían según la variación del parámetro μ . Para ello grafique la trayectoria x en función del tiempo, la velocidad \dot{x} en función del tiempo y también el espacio de fases $x\dot{x}$.
- Modifique también las condiciones iniciales y estudie numéricamente las respuestas del sistema. Para ello grafique la trayectoria x en función del tiempo, la velocidad \dot{x} en función del tiempo y también el espacio de fases $x\dot{x}$.

A entregar

Se deberá entregar un trabajo de la actividad 2 y 3, con los códigos, los gráficos obtenidos para las integraciones numéricas propuestas y el correspondiente análisis para cada caso.

2. Análisis de datos y conclusiones

2.1. Oscilador armónico amortiguado

El oscilador armónico amortiguado es el caso generalizado de los osciladores armónicos libres ya que su comportamiento contempla la disipación de energía pero no la presencia de fuerzas externas. Su comportamiento está dado por (1). Para obtener las soluciones de dicha ecuación, se propone una con la forma $x(t) = e^{zt}$, con $z \in \mathbb{C}$ (luego $\dot{x}(t) = ze^{zt}$ y $\ddot{x}(t) = z^2e^{zt}$).

Reemplazando el $x(t)$ y sus derivadas en (1), se obtiene la siguiente ecuación cuadrática para z :

$$(z^2 + 2\gamma z + \omega_0^2)e^{zt} = 0$$

Esta ecuación es igual a 0 si y solo si $(z^2 + 2\gamma z + \omega_0^2) = 0$. Las raíces de este polinomio son:

$$z_{1,2} = \frac{-2\gamma \pm \sqrt{4\gamma^2 - 4\omega_0^2}}{2} = -\gamma \pm \sqrt{\gamma^2 - \omega_0^2}$$

Podemos distinguir tres casos que, a continuación, analizamos por separado.

- Si $\omega_0^2 > \gamma^2$, tenemos dos raíces complejas

$$z_1 = -\gamma + i\sqrt{\omega_0^2 - \gamma^2}$$

$$z_2 = -\gamma - i\sqrt{\omega_0^2 - \gamma^2}$$

Sea $\omega_1 = \sqrt{\omega_0^2 - \gamma^2}$. Reemplazando esta nueva frecuencia en la solución propuesta y tomando su parte real, tenemos que:

$$x(t) = e^{-\gamma t}(a\cos(\omega_1 t) + b\sin(\omega_1 t)) \quad (3)$$

$$\dot{x}(t) = e^{-\gamma t}((\omega_1 b - \gamma a)\cos(\omega_1 t) + (\omega_1 a - \gamma b)\sin(\omega_1 t))$$

donde a y b se determinan con las condiciones iniciales

$$x(0) = a, \dot{x}(0) = \omega_1 b - \gamma a$$

Luego, la ecuación (3) nos queda:

$$x(t) = e^{-\gamma t}(x(0)\cos(\omega_1 t) + \frac{\dot{x}(0) + \gamma x(0)}{\omega_1}\sin(\omega_1 t)) \quad (4)$$

Este movimiento corresponde a una oscilación armónica de frecuencia ω_1 , diferente de la frecuencia natural ω_0 ; y se denomina *movimiento oscilatorio subamortiguado*.

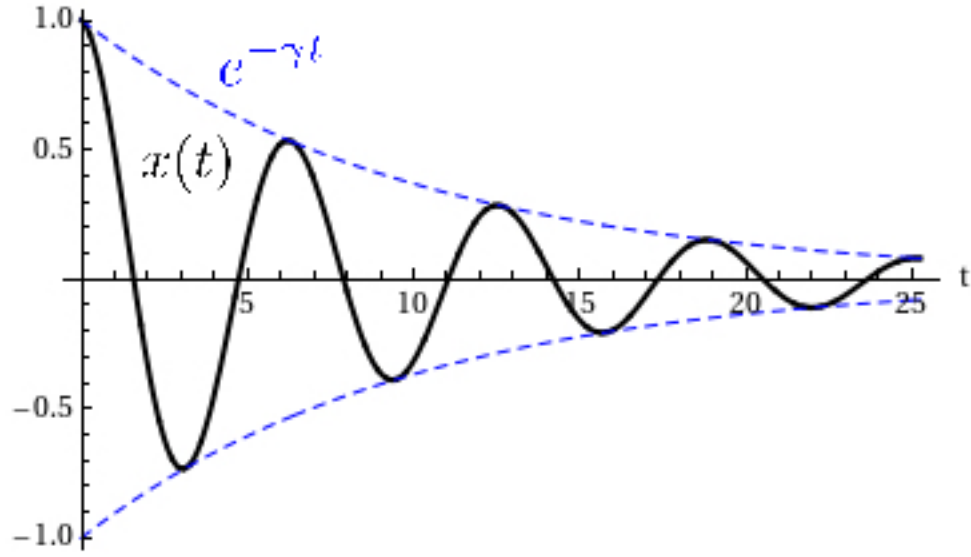


Figura 1: Movimiento oscilatorio subamortiguado.

Se observa como la curva esta modulada por un termino exponencial relacionado con la constante de amortiguamiento γ .

- Si $\omega_0^2 < \gamma^2$, tenemos dos raices reales

$$z_1 = -\gamma + \sqrt{\gamma^2 - \omega_0^2}$$

$$z_2 = -\gamma - \sqrt{\gamma^2 - \omega_0^2}$$

En este caso, la ecuación $x(t)$ nos quedará expresada en términos de cosenos y senos hiperbólicos. Para las condiciones iniciales procedemos como en el caso del oscilador subamortiguado, por lo tanto la ecuación de movimiento nos queda:

$$x(t) = x(0)e^{-\gamma t} \cosh(\sqrt{\gamma^2 - \omega_0^2}t) + \frac{\dot{x}(0) + \gamma x(0)}{\sqrt{\gamma^2 - \omega_0^2}} e^{-\gamma t} \sinh(\sqrt{\gamma^2 - \omega_0^2}t) \quad (5)$$

Este movimiento se denomina *oscilatorio sobreamortiguado*.

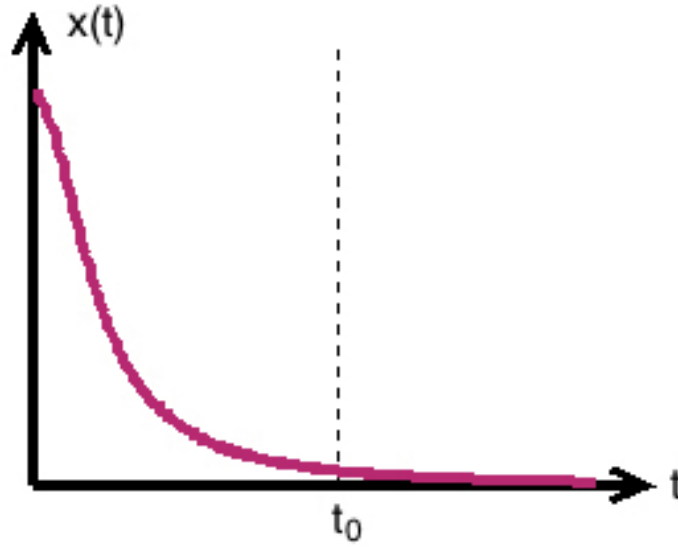


Figura 2: Esquema del movimiento oscilatorio sobreamortiguado. En t_0 el sistema decae a 0 sin llegar a completar un periodo de oscilación.

- Si $\omega_0^2 = \gamma^2$, tenemos una raíz real doble

$$z_{1,2} = -\gamma$$

Al tener una única raíz doble, debemos considerar soluciones del siguiente tipo:

$$x(t) = (a + bt)e^{-\gamma t}$$

Al imponer las condiciones iniciales sobre $x(t)$, la solución nos queda:

$$x(t) = [x(0) + (\dot{x}(0) + \gamma x(0))t]e^{-\gamma t} \quad (6)$$

Este movimiento se denomina *oscilatorio con amortiguamiento crítico*.

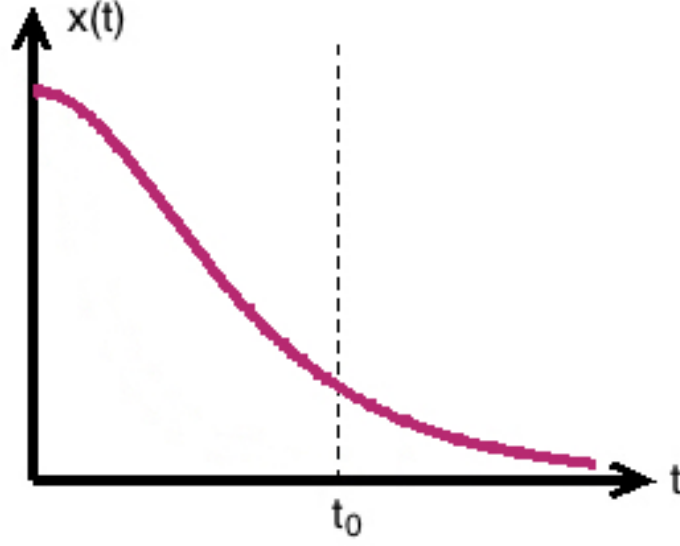


Figura 3: Esquema del movimiento oscilatorio con amortiguamiento crítico.

Para el análisis numérico, se reescribió la ecuación de segundo orden (1) como dos ecuaciones de primer orden de la siguiente manera:

$$\begin{cases} \dot{x} = y \\ \dot{y} = -2\gamma y - \omega_0^2 x \end{cases}$$

Este sistema se implementó en el código fuente *ODE_ej2.c* (ver sección Apéndice). Se utilizó una variable j dentro del bucle *for* para ir iterando los distintos valores de γ y ω_0 , así como también las condiciones iniciales $x(0)$ y $\dot{x}(0)$; desde $j = 1$ hasta $j = 10$. El tiempo máximo de muestreo fue de 2 segundos.

Para destacar los casos sobre, sub y amortiguado crítico, es necesario aclarar que se utilizaron incrementos de dicha variable con un valor igual a 4, por lo tanto j solo toma 3 valores durante la ejecución del programa: $j = 1$, $j = 5$ y $j = 9$; obteniendo una representación numérica y gráfica de los 3 casos mencionados anteriormente.

En el siguiente cuadro se pueden ver los valores numéricos para los parámetros y condiciones iniciales correspondientes a cada iteración:

j	γ	ω_0	$x(0)$	$\dot{x}(0)$
1	9	1	0.5	4.5
5	5	5	2.5	2.5
9	1	9	4.5	0.5

Cuadro 1: Valores de los parámetros γ , ω_0 y las condiciones iniciales en cada iteración. La primera fila corresponde al caso sobreamortiguado ($\gamma^2 > \omega_0^2$), la segunda al caso de amortiguamiento crítico ($\gamma^2 = \omega_0^2$) y la tercera al caso subamortiguado ($\gamma^2 < \omega_0^2$).

Los gráficos correspondientes a estos resultados son los siguientes:

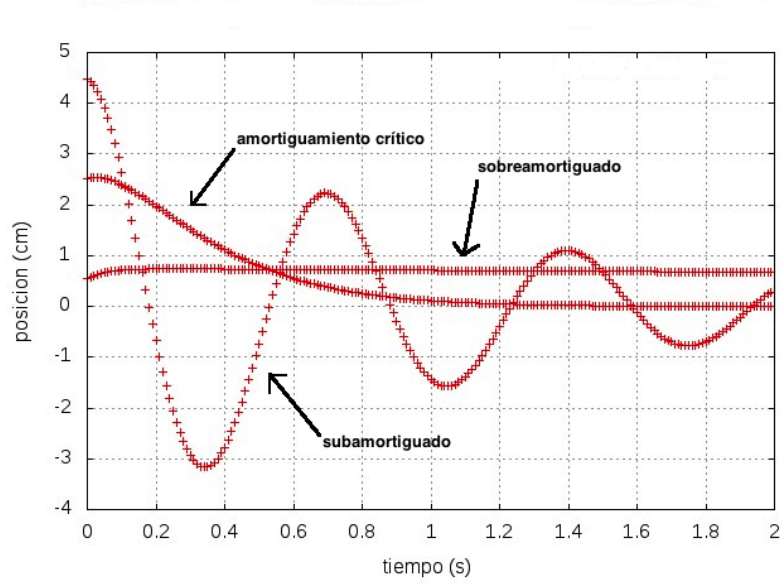


Figura 4: Posición en función del tiempo para los 3 casos estudiados del oscilador armónico amortiguado.

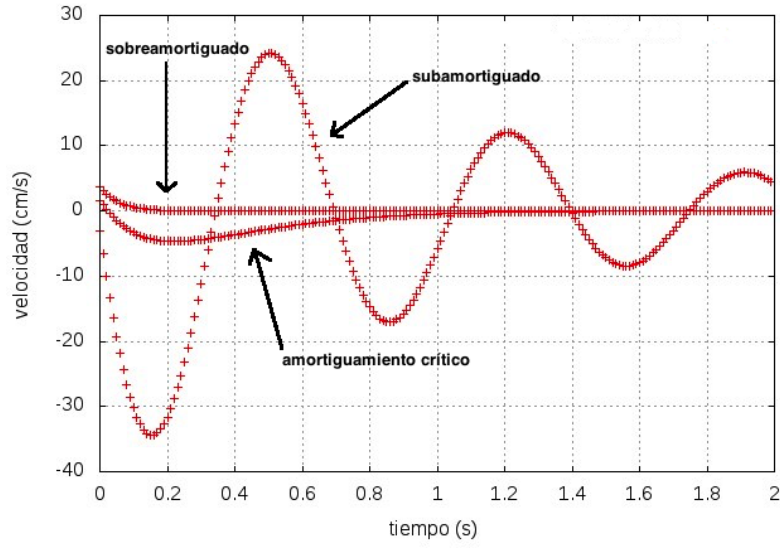


Figura 5: Velocidad en función del tiempo para los 3 casos estudiados del oscilador armónico amortiguado.

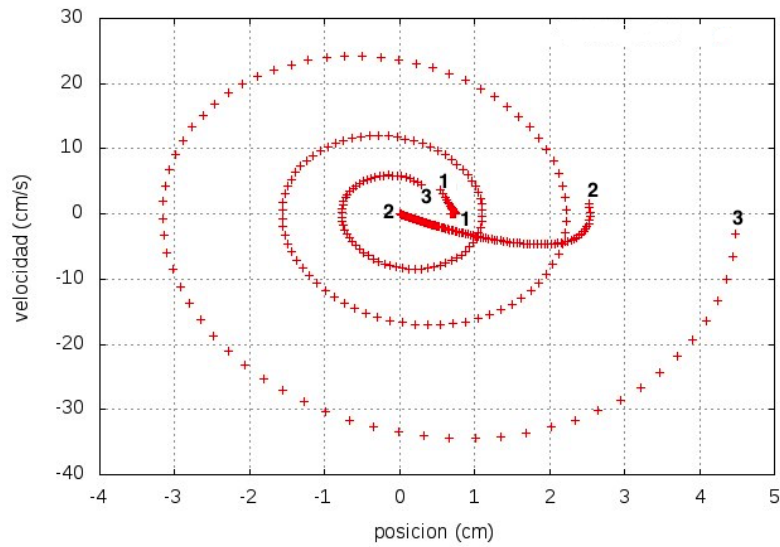


Figura 6: Espacio de fases para los 3 casos estudiados del oscilador armónico amortiguado.

Se observa en los gráficos que el integrador de Runge-Kutta de orden 4 provisto por la cátedra, y los valores escogidos para destacar los 3 casos, aproximan satisfactoriamente a las soluciones analíticas del oscilador armónico amortiguado detalladas en la introducción teórica del mismo.

También podemos ver que, en el caso sobreamortiguado, como $\gamma^2 = 81$ y $\omega_0^2 = 1$, el amortiguamiento es excesivo frente a la oscilación natural del sistema, por lo tanto la posición y velocidad decaen muy rápidamente, sin llegar a 0. Esta situación en el espacio de fases esta representada por una línea muy corta, señalada al principio y al final con el número 2.

Para el caso de amortiguamiento crítico, $\gamma^2 = \omega_0^2 = 25$, la función $x(t)$ presenta un decaimiento exponencial, similar al caso sobreamortiguado. En un oscilador de estas características, el retorno a la posición de equilibrio se da rápidamente. En el espacio de fases se puede ver como la línea gruesa marcada con el número 1 al principio y al final de la misma.

En el caso subamortiguado, $\gamma^2 = 1$ y $\omega_0^2 = 81$. Esto se ve reflejado en una gráfica cosenoidal con una envolvente exponencial que decae mas lentamente que en los otros dos casos, y se hace 0 en un tiempo mas largo que el tiempo de muestreo de 2 segundos.

Se observa además la gran amplitud y frecuencia inicial de esta función con respecto a los casos sobreamortiguado y amortiguado crítico, debido a los valores de $x(0)$ y ω_0^2 asignados a este caso. En el espacio de fases se puede ver como la curva marcada al principio y al final con el número 3.

2.2. Oscilador de Van der Pol

Para realizar el análisis numérico de este oscilador no-lineal, se reescribió la ecuación de segundo orden (2) como dos ecuaciones de primer orden utilizando las ecuaciones de Liénard:

$$\begin{cases} \dot{x} = \mu(y - (x^3 - x)) \\ \dot{y} = -\frac{1}{\mu}x \end{cases}$$

Podemos destacar dos regímenes interesantes para este oscilador, dependientes del parámetro μ :

- Si $\mu = 0$, no hay amortiguamiento y la ecuación (2) queda:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + x = 0$$

Es la fórmula del oscilador armónico simple sin pérdida de energía.

- Si $\mu > 0$, el sistema alcanzará un ciclo límite, en el que se conservará la energía. Cerca del origen $x = \frac{dx}{dt} = 0$, el sistema es inestable; y lejos del origen hay amortiguamiento.

Este último caso es el más interesante y para el cual se analizaron numéricamente dos posibilidades: amortiguamiento muy pequeño ($\mu \ll 1$) y amortiguamiento muy grande ($\mu \gg 1$)

Este sistema se implemento en el código fuente *ODE_ej3.c* (ver sección Apéndice). Se aumento el tiempo de muestreo a 20 segundos con respecto al ejercicio anterior, para poder ver detalladamente el espacio de fases de este oscilador. Se decidió graficar con líneas continuas para facilitar la visualización de la posición, velocidad y espacio de fases de este oscilador.

- $\mu \ll 1$:

En primera instancia, se dejaron las condiciones iniciales fijas ($x(0) = -0.01$ y $\dot{x}(0) = 0.05$). El parámetro μ toma los valores $\mu_1 = 0.05$ y $\mu_2 = 0.005$ en cada ejecución.

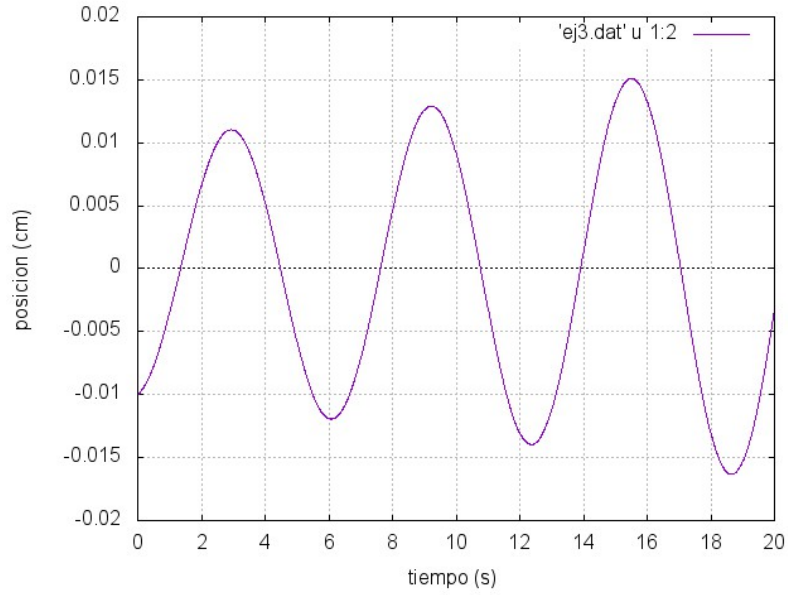


Figura 7: Posición en función del tiempo para $\mu_1 = 0.05$ y condiciones iniciales fijas.

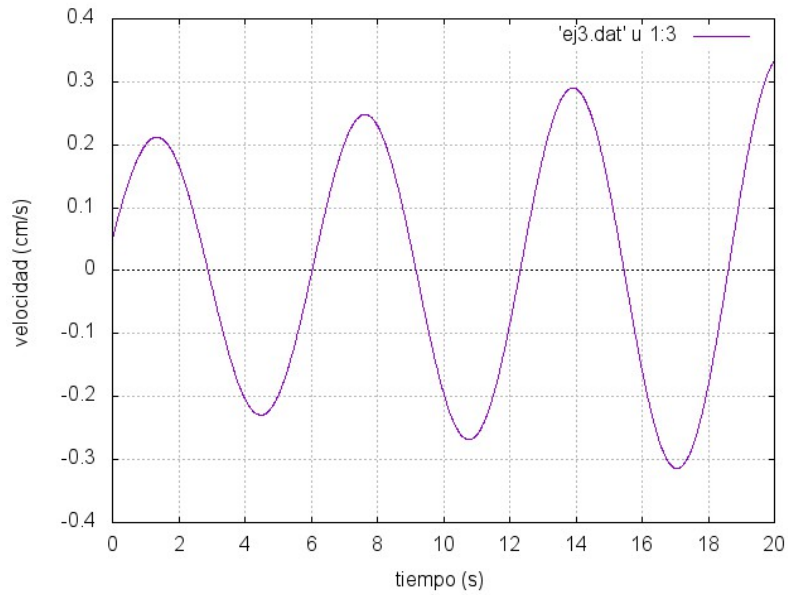


Figura 8: Velocidad en función del tiempo para $\mu_1 = 0.05$ y condiciones iniciales fijas.

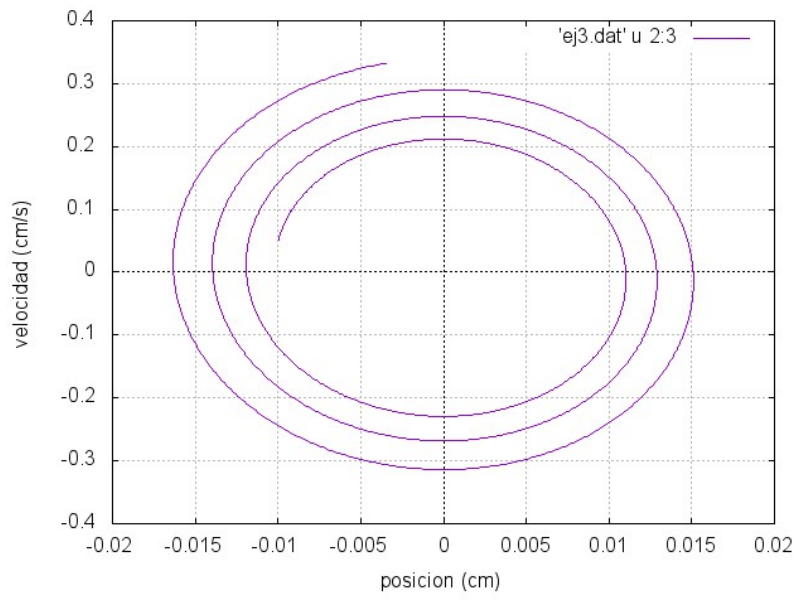


Figura 9: Espacio de fases para $\mu_1 = 0.05$ y condiciones iniciales fijas.

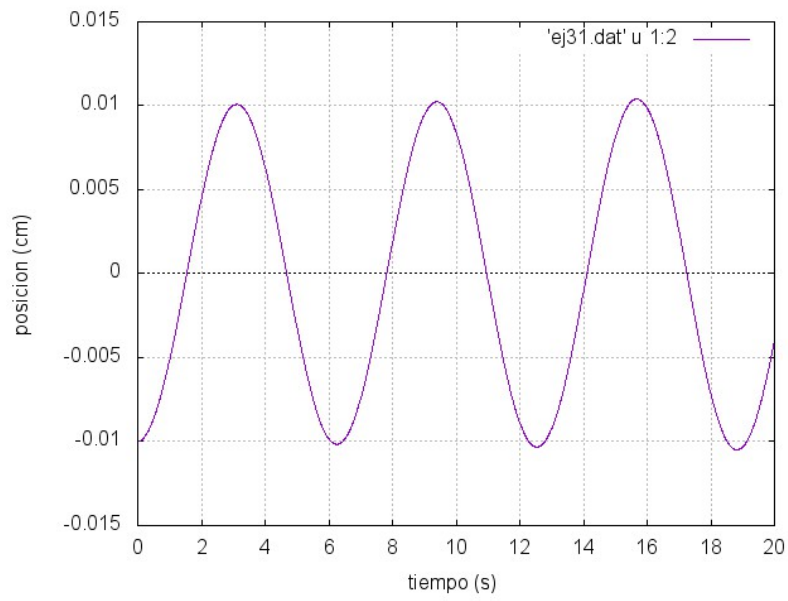


Figura 10: Posición en función del tiempo para $\mu_2 = 0.005$ y condiciones iniciales fijas.

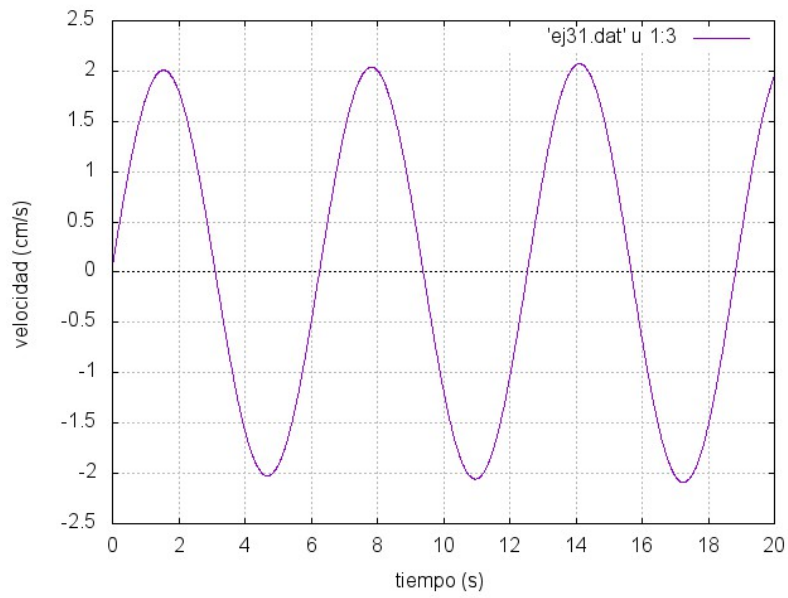


Figura 11: Velocidad en función del tiempo para $\mu_2 = 0.005$ y condiciones iniciales fijas.

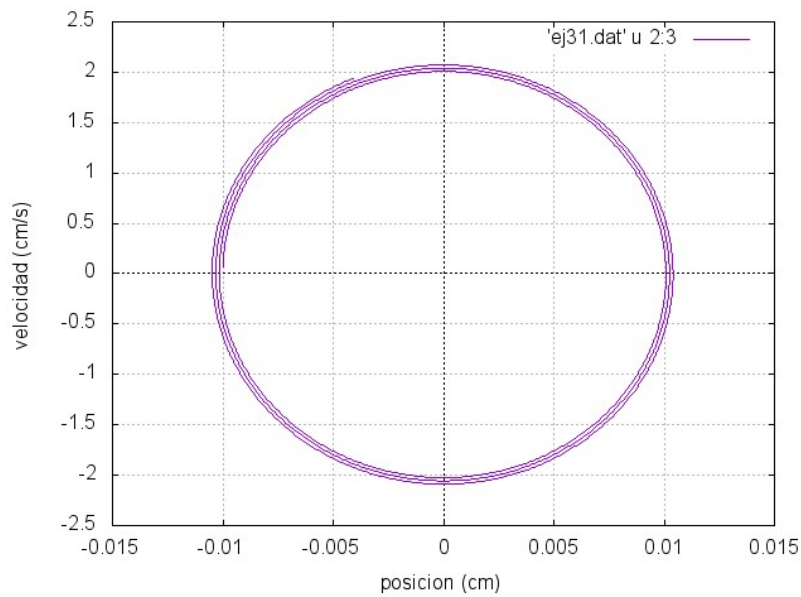


Figura 12: Espacio de fases para $\mu_2 = 0.005$ y condiciones iniciales fijas.

Podemos observar que, con estos valores de μ , el sistema se comporta como un oscilador armónico; sobre todo en el caso $\mu_2 = 0.005$.

MAS ANALISIS...

En una segunda instancia, las condiciones iniciales se variaron dentro de un bucle *for*, esta

j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$x(0)$	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.4	1.6	1.8	2
$\dot{x}(0)$	-0.2	-0.4	-0.6	-0.8	-1	-1.2	-1.4	-1.6	-1.8	-2

Cuadro 2: Condiciones iniciales en cada iteración para valores de $\mu_1 = 0.05$ y $\mu_2 = 0.005$.

vez con un iterador j incrementado de a 1, con los mismos valores de μ_1 y μ_2 . La siguiente tabla muestra los valores correspondientes a este caso:

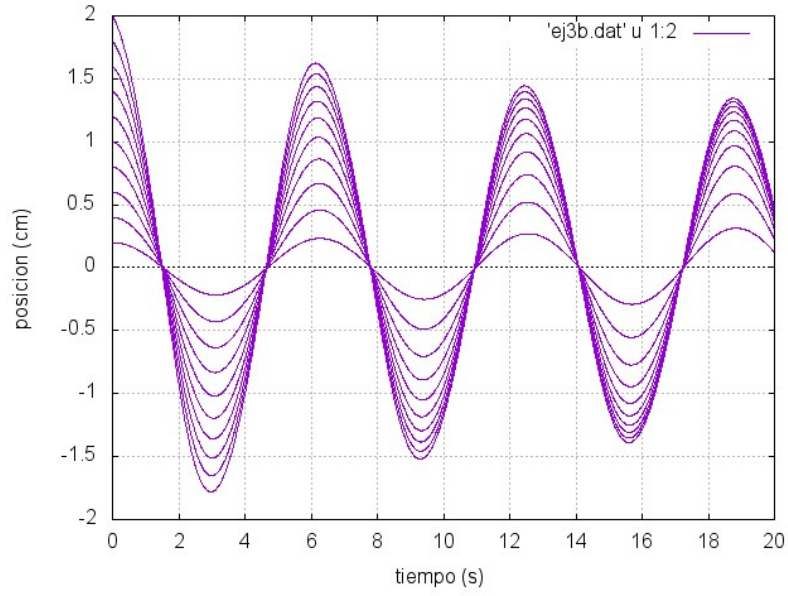


Figura 13: Posición en función del tiempo para $\mu_1 = 0.05$ y condiciones iniciales variables.

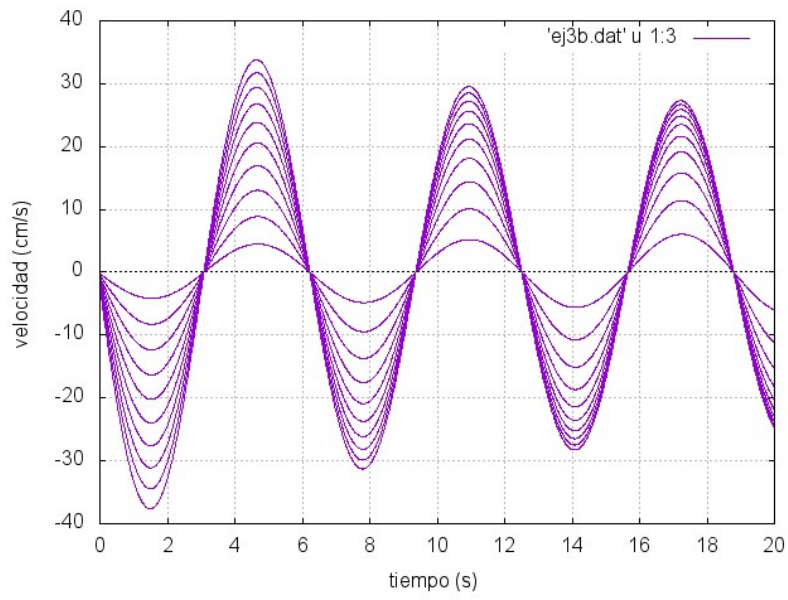


Figura 14: Velocidad en función del tiempo para $\mu_1 = 0.05$ y condiciones iniciales variables.

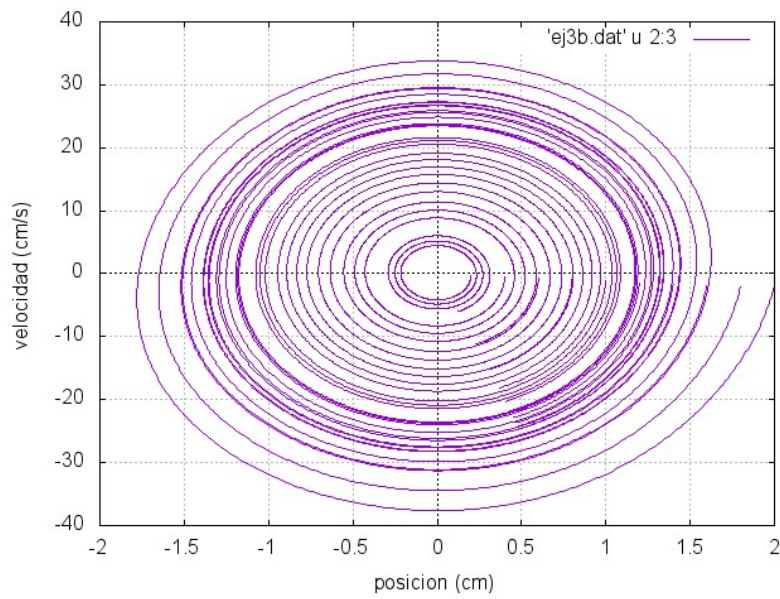


Figura 15: Espacio de fases para $\mu_1 = 0.05$ y condiciones iniciales variables.

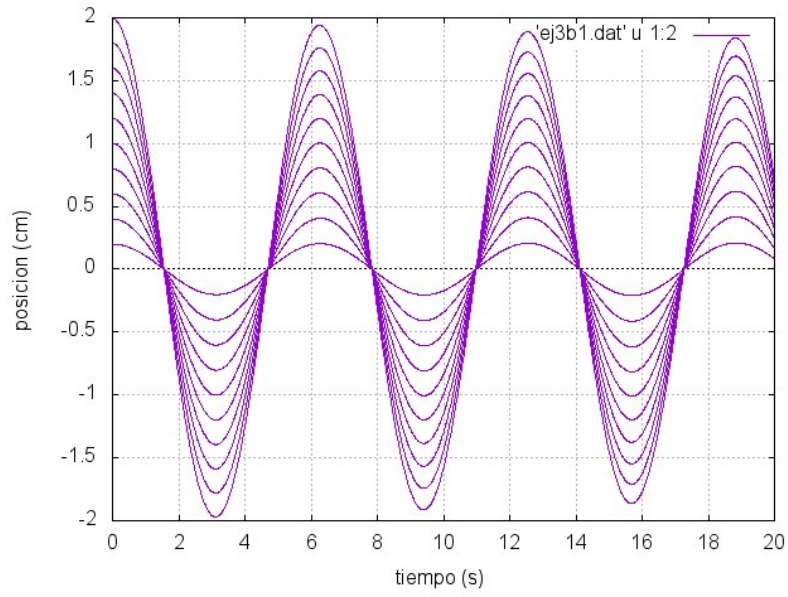


Figura 16: Posición en función del tiempo para $\mu_2 = 0.005$ y condiciones iniciales variables.

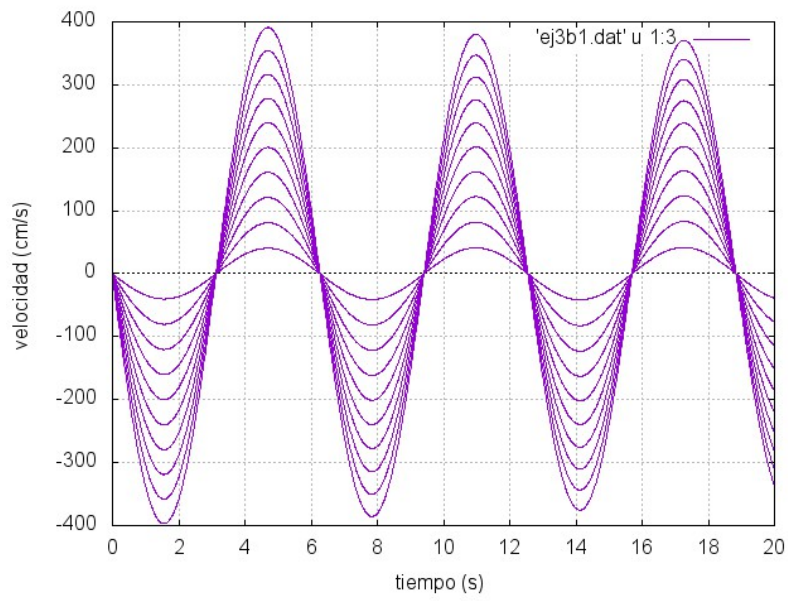


Figura 17: Velocidad en función del tiempo para $\mu_2 = 0.005$ y condiciones iniciales variables.

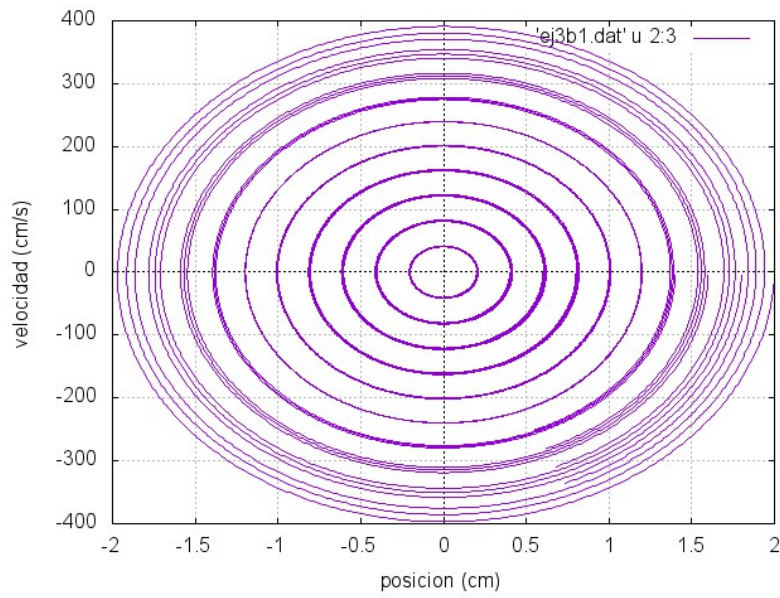


Figura 18: Espacio de fases para $\mu_2 = 0.005$ y condiciones iniciales variables.

MAS ANALISIS....

■ $\mu \gg 1$:

Como en el caso anterior, primero se dejaron las condiciones iniciales fijas ($x(0) = -0.01$ y $\dot{x}(0) = 0.05$), variando el parámetro μ en cada ejecución por separado. ($\mu_1 = 5$ y $\mu_2 = 10$). Los graficos de posición, velocidad y espacio de fases para dichos μ son los siguientes:

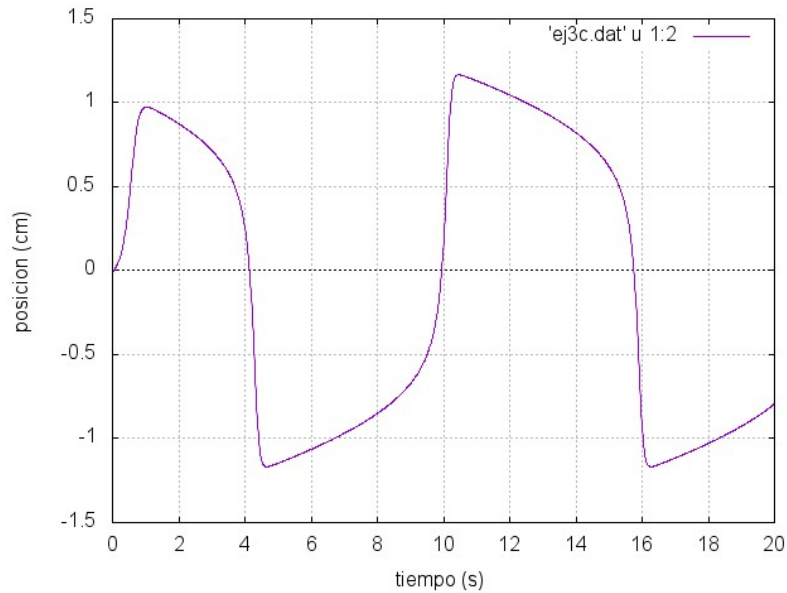


Figura 19: Posición en función del tiempo para $\mu_1 = 5$ y condiciones iniciales fijas.

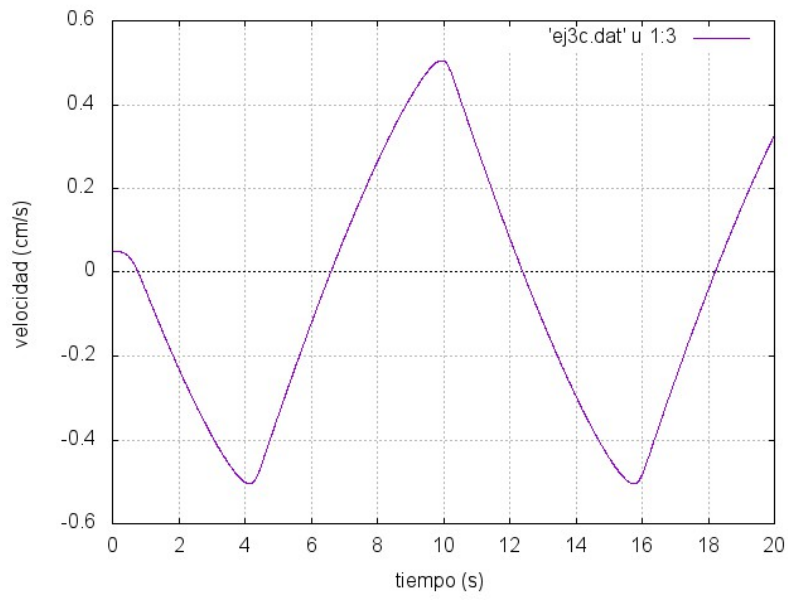


Figura 20: Velocidad en función del tiempo para $\mu_1 = 5$ y condiciones iniciales fijas.

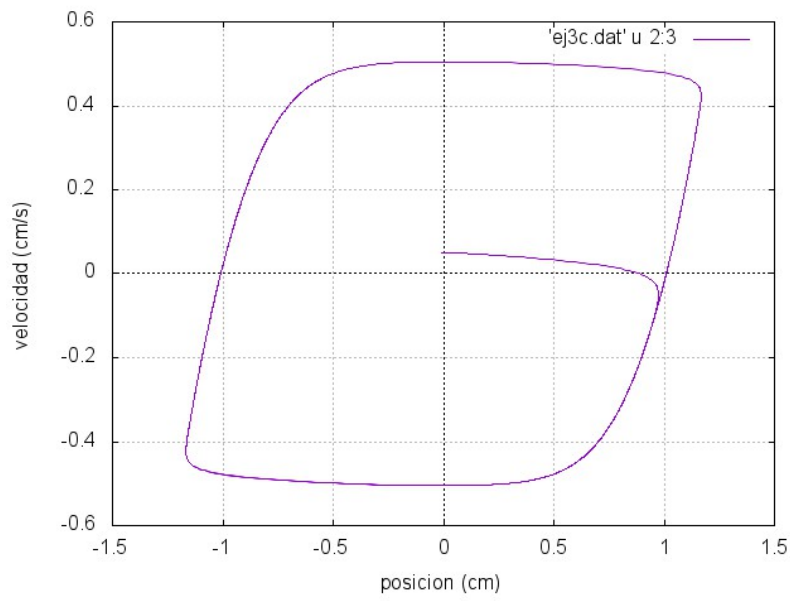


Figura 21: Espacio de fases para $\mu_1 = 5$ y condiciones iniciales fijas.

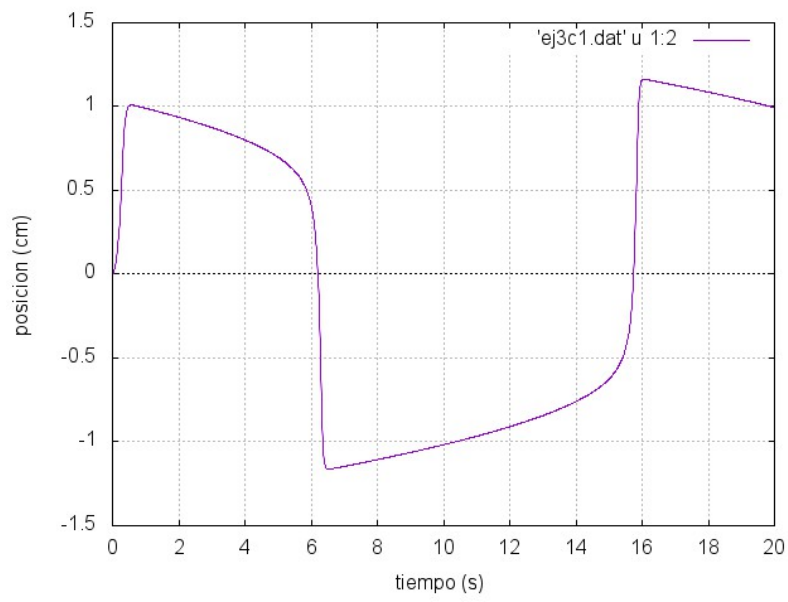


Figura 22: Posición en función del tiempo para $\mu_2 = 10$ y condiciones iniciales fijas.

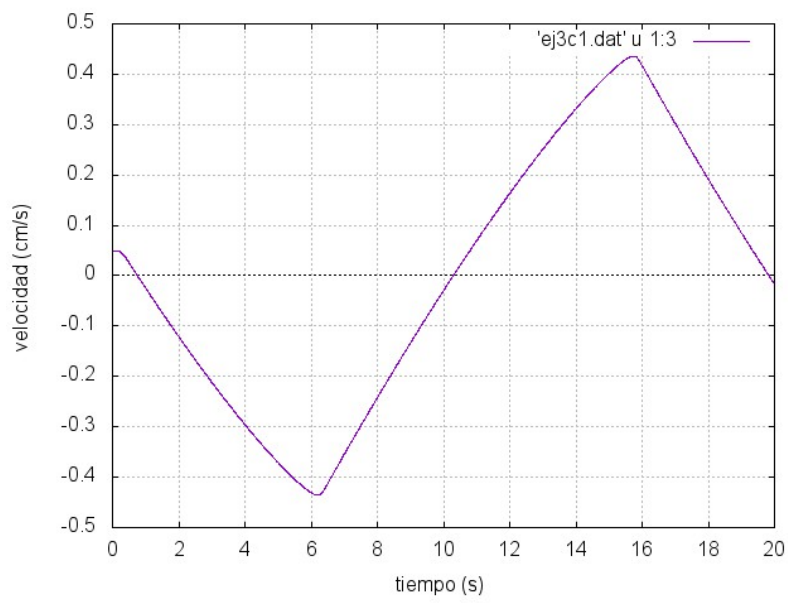


Figura 23: Velocidad en función del tiempo para $\mu_2 = 10$ y condiciones iniciales fijas.

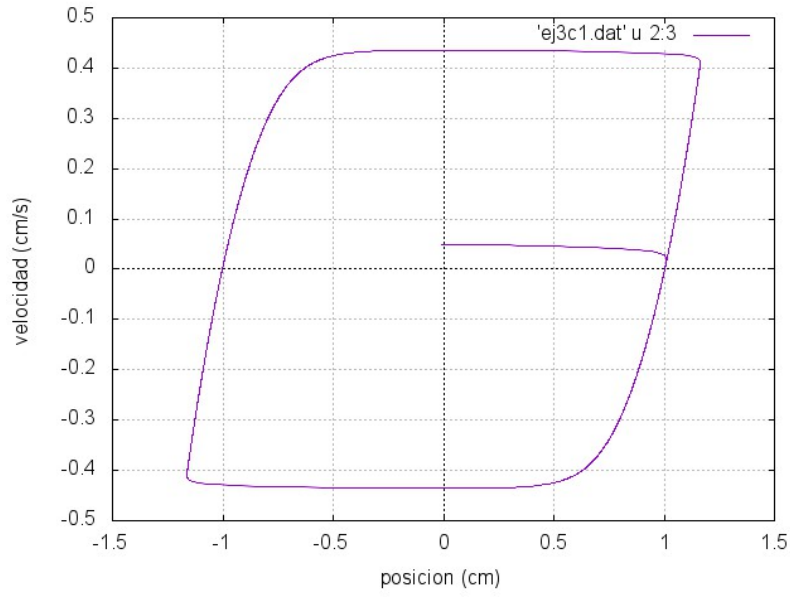


Figura 24: Espacio de fases para $\mu_2 = 10$ y condiciones iniciales fijas.

Finalmente, las condiciones iniciales también se variaron dentro bucle for, con los mismos valores que muestra el cuadro (2). Los gráficos para este caso son los siguientes:

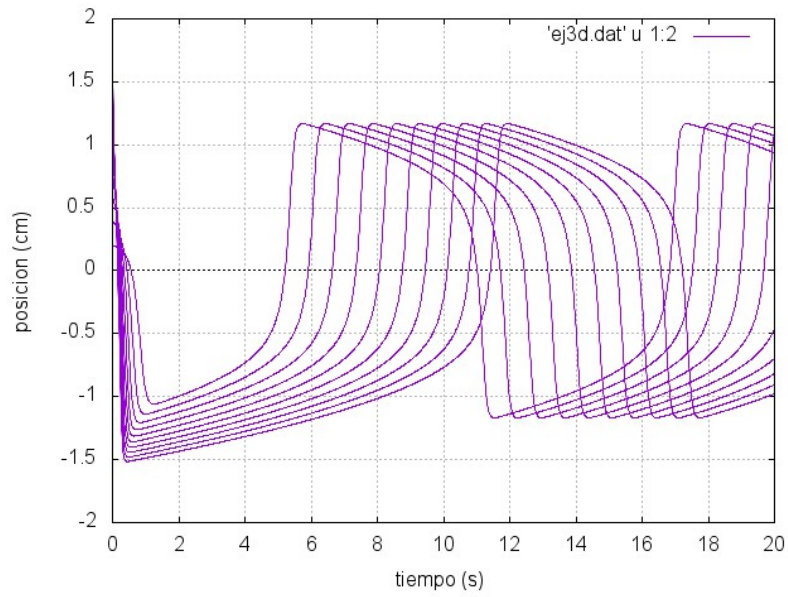


Figura 25: Posición en función del tiempo para $\mu_1 = 5$ y condiciones iniciales variables.

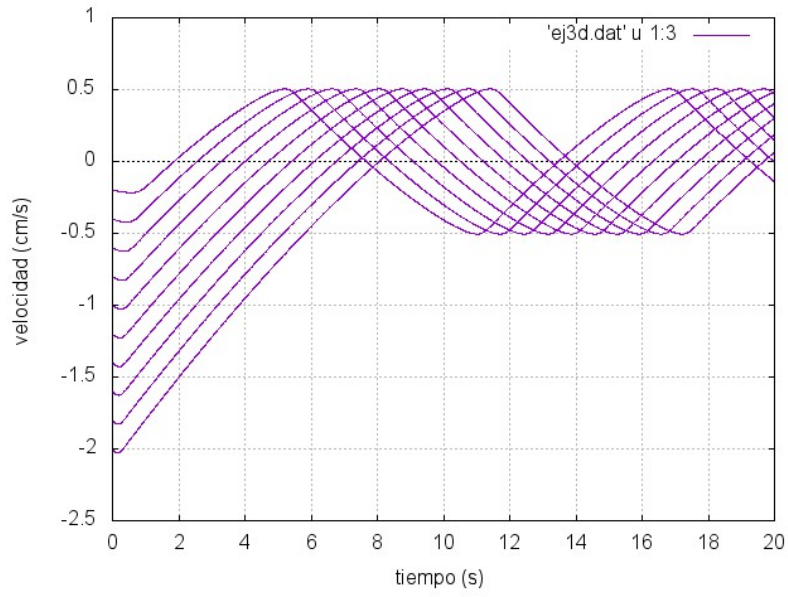


Figura 26: Velocidad en función del tiempo para $\mu_1 = 5$ y condiciones iniciales variables.

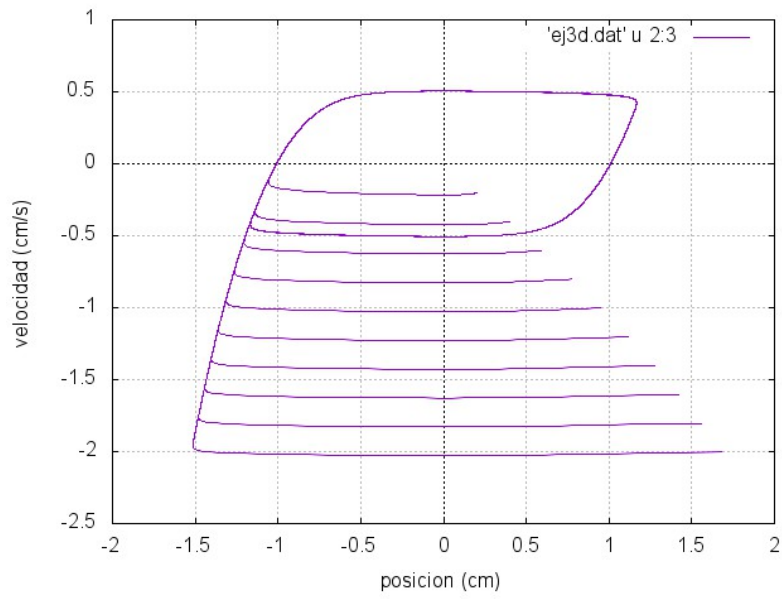


Figura 27: Espacio de fases para $\mu_1 = 5$ y condiciones iniciales variables.

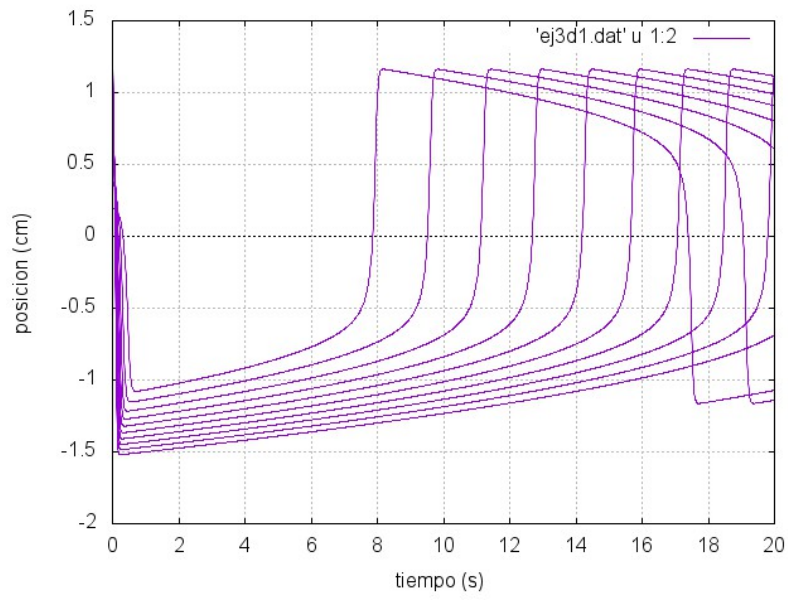


Figura 28: Posición en función del tiempo para $\mu_2 = 10$ y condiciones iniciales variables.

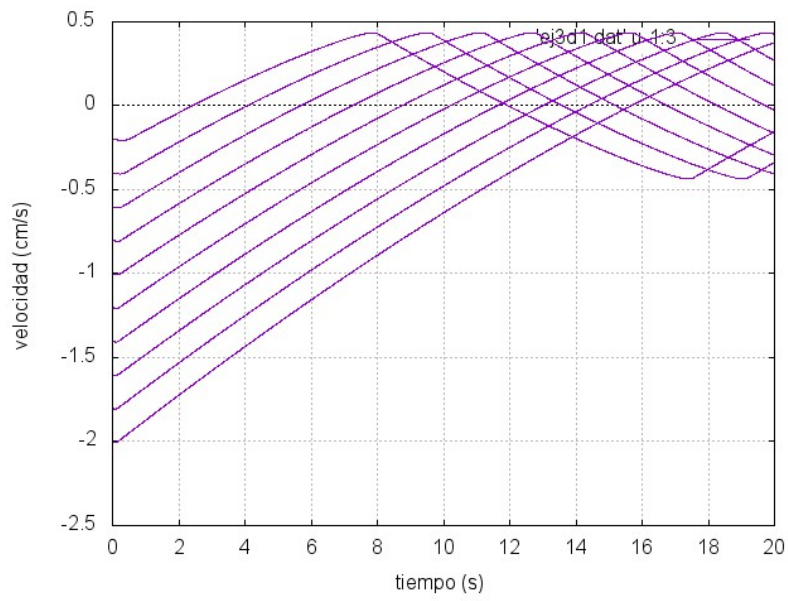


Figura 29: Velocidad en función del tiempo para $\mu_2 = 10$ y condiciones iniciales variables.

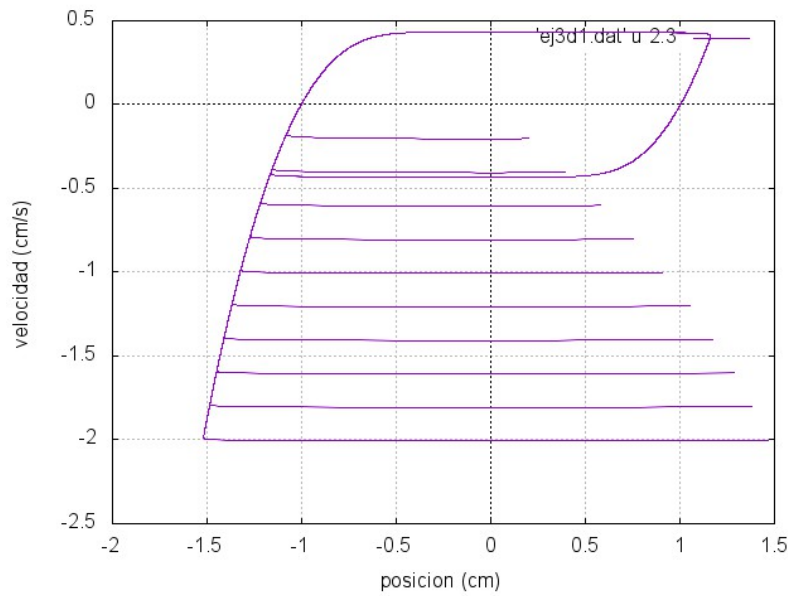


Figura 30: Espacio de fases para $\mu_2 = 10$ y condiciones iniciales variables.

MAS ANALISIS.—

3. Apéndice

Descargar el archivo *guia1_poggi.zip* y descomprimirlo en una carpeta a elección del usuario, abrir una terminal dentro de la carpeta $\sim \backslash \text{mecanica} - \text{clasica} \backslash \text{practica1}$; y seguir las instrucciones provistas en la sección Enunciado.

Los archivos que contienen los datos numéricos (*ej2.dat* y *ej3.dat*) no fueron transcriptos en este informe dada la extensión de los mismos.

3.1. Código fuente en C del oscilador armónico amortiguado (ODE_ej2.c)

```
#include <stdio.h>
#include <math.h>

#define a -1

// Define parametros para usar en el sistema en todo el codigo
struct Par{
    double gamma, omega;
} aa;
```

```

// Ecuaciones del sistema
void ecuaciones(int n, double v[], double dv[], double t){
    double x,y;
    x=v[0];
    y=v[1];

    // En este caso son 2 ecuaciones acopladas
    dv[0]= y;
    dv[1]= -2*aa.gamma*y-aa.omega*aa.omega*x;

    return;
}

// Programa principal
int main(){

    int i,j;
    FILE *ptr;
    double v[2],t,dt,t_pre,t_max;

    // Archivo de salida
    ptr=fopen("ej2.dat","w");

    dt=0.01;
    t_max=2;

    // Condiciones iniciales. Se analizaron 3 casos: sub, sobre y
    // amortiguamiento critico variando gamma y omega con valores
    // opuestos en el rango de 1 a 10, con pasos de 5
    for (j=1;j<=10;j=j+4) {
        v[0] = 0.5*j;
        v[1] = 0.5*(10-j);
        aa.gamma=(10-j);
        aa.omega=j;

        t=0.;

        while(t<t_max) {
            // Integra las ecuaciones utilizando el metodo de Runge
            // Kutta
            rk4(ecuaciones,v,2,t,dt);

            // Imprime la integracion

```

```

        fprintf(ptr, "%lg\t %lg\t %lg\n", t, v[0], v[1]);

        t+=dt;
    }

    fprintf(ptr, "\n");
}

fclose(ptr);
return(0);
}

```

3.2. Código fuente en C del oscilador de Van der Pol (ODE_ej3.c)

Se transcribió un solo caso de este código, las pequeñas modificaciones para los casos restantes están señalados en el análisis del oscilador.

```

#include <stdio.h>
#include <math.h>

#define a -1

// Define parametros para usar en el sistema en todo el codigo
struct Par{
    double mu;
} aa;

// Ecuaciones del sistema
void ecuaciones(int n, double v[], double dv[], double t){
    double x,y;
    x=v[0];
    y=v[1];

    // En este caso son 2 ecuaciones acopladas
    dv[0]= aa.mu*(y-(x*x*x-x));
    dv[1]= (-1/aa.mu)*x;

    return;
}

// Programa principal
int main(){

```



```

int i,j;
FILE *ptr;
double v[2],t,dt,t_pre,t_max;

// Archivo de salida
ptr=fopen("ej3.dat","w");

dt=0.01;
t_max=20;

// Condiciones iniciales fijas y mu=0.05
v[0] = -0.01;
v[1] = 0.05;
aa.mu= 0.05;

t=0.;

while(t<t_max) {
    // Integra las ecuaciones utilizando el metodo de Runge Kutta
    rk4(ecuaciones,v,2,t,dt);

    // Imprime la integracion
    fprintf(ptr,"%lg\t%lg\t%lg\n",t,v[0],v[1]);

    t+=dt;
}

fprintf(ptr,"\n");

fclose(ptr);
return(0);
}

```

3.3. Código fuente en C del método de Runge-Kutta de orden 4 provisto por la cátedra (rk4.c)

```

/* Runge Kutta integrator from numerical recipies plus improvements */
/* void *deri(int n,double h[],double D[],double t); */
/* function argument not tested yet */

void rk4(void deri(int , double [], double [], double ), \
double h[], int n, double t, double dt)
{

```

```
#define naux 26
```

```
int i;
double k1[naux], k2[naux], k3[naux], k4[naux], h0[naux];
double dt2, dt6;

dt2=dt/2.;
dt6=dt/6.;

for (i = 0 ; i<n; i++)
    h0[i] = h[i];

deri(n, h0, k1, t);
for (i = 0 ; i<n ; i++)
    h0[i]=h[i]+dt2*k1[i];

deri(n, h0, k2, t+dt2);
for (i = 0 ; i<n ; i++)
    h0[i]=h[i]+dt2*k2[i];

deri(n, h0, k3, t+dt2);
for (i = 0 ; i<n ; i++)
    h0[i]=h[i]+dt*k3[i];

deri(n, h0, k4, t+dt);
for (i = 0 ; i<n ; i++)
    {h0[i]=h[i]+dt*k4[i];};

for (i = 0; i<n ; i++)
    h[i]=h[i]+dt6*(2.*(k2[i]+k3[i])+k1[i]+k4[i]));

return;
}
```

4. Bibliografía