

Automatica (Laboratorio)

Silvio Simani

Dipartimento di Ingegneria

Università di Ferrara

Tel. 0532 293844

Fax. 0532 768602

E-mail: ssimani@ing.unife.it

URL: <http://www.ing.unife.it/simani>



Università di Ferrara, Dip. di Ingegneria
v. Saragat, 1, I-44100, Ferrara, Italia

Silvio Simani

Automatica (Laboratorio)



Schema delle lezioni

1. Informazioni generali sul corso
2. Introduzione a *Matlab*[®]
- ⇒ Simulazione di Sistemi Dinamici
3. Introduzione a *Simulink*[®]
4. Osservatori e retroazione uscita–stato–ingresso
5. Modelli approssimati di sistemi dinamici
6. L'Interprete di Funzioni di Trasferimento *TFI*
7. Progetto di Reti Correttrici
8. Progetto di Controllori PID
9. Progetto di Sistemi di Controllo Digitali



Università di Ferrara, Dip. di Ingegneria
v. Saragat, 1, I-44100, Ferrara, Italia

Silvio Simani

La funzione $P = \text{ctrb}(A,B)$: come da definizione

```
function P = ctrb(A,B)
%CTRB   Form the controllability matrix.
%
%   P = CTRB(A,B) returns the controllability matrix
%   P = [B A*B A^2*B ... A^(n-1)*B].
%   See also CTRBF.

n = size(A,1);
P = B;
for i=1:n-1,
    P = [P (A^i)*B];
end

return
% end ctrb
```



Università di Ferrara, Dip. di Ingegneria
v. Saragat, 1, I-44100, Ferrara, Italia

Silvio Simani

La funzione $P = \text{ctrb}(A,B)$: ottimizzata

```
function P = ctrb(A,B)
%CTRB   Form the controllability matrix.
%
%   P = CTRB(A,B) returns the controllability matrix
%   P = [B A*B A^2 * B ... A^(n-1) * B].
%   See also CTRBF.

n = size(A,1);
P = B;
for i=1:n-1,
    P = [B A*P];
end
return
% end ctrb
```



Università di Ferrara, Dip. di Ingegneria
v. Saragat, 1, I-44100, Ferrara, Italia

Silvio Simani

Simulazione di Sistemi Dinamici



Analisi di Sistemi Lineari

⇒ Possibile la risoluzione analitica delle equazioni



Analisi di sistemi non lineari

⇒ Possibile la risoluzione numerica delle equazioni

⇒ Analogie e Differenze



Analisi di un circuito non lineare



Metodi numerici per l'integrazione



Istruzioni di grafica in Matlab



Università di Ferrara, Dip. di Ingegneria
v. Saragat, 1, I-44100, Ferrara, Italia

Silvio Simani

Analisi di un circuito non lineare

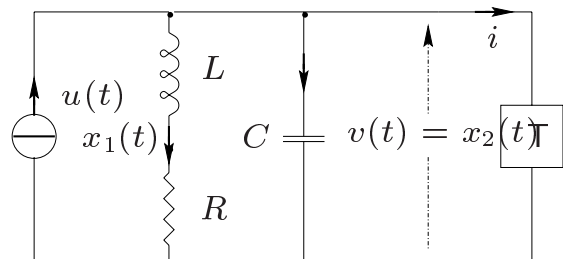
$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= -\frac{R}{L} x_1(t) + \frac{1}{L} x_2(t) \\ \dot{x}_2(t) &= -\frac{1}{C} x_1(t) + \\ &\quad + \frac{1}{C} (G_1 x_2(t) - G_2 x_2^3(t)) + \frac{1}{C} u(t) \end{aligned}$$

ove

$$i = -G_1 * v + G_2 * v^3$$

con i seguenti valori

$$G_1 = 0.8, G_2 = 0.05, R = 2, L = 1 \text{ e } C = 1.$$



Università di Ferrara, Dip. di Ingegneria
v. Saragat, 1, I-44100, Ferrara, Italia

Silvio Simani

Simulazione del circuito non lineare



La funzione tunnel1.m

```
function xd = tunnel1(t,x,flag,param)
% Funzione che implementa il circuito
% non lineare.
%
% d x1(t) / dt = - R/L x1(t) + 1/L x2(t)
% d x2(t) / dt = - 1/C x1(t) + 1/C ( G1 x2(t)
%               - G2 x2(t)^3 ) + 1/C u(t)
%
```

```
R = param(1);
L = param(2);
C = param(3);
G1 = param(4);
G2 = param(5);

x1d = - (R/L) * x(1) + (1.0/L) * x(2);
x2d = - (1.0/C) * x(1) + (1.0/C)*( G1 * x(2)
    - G2 * x(2)^3 );
```

```
xd = [x1d; x2d];
```

```
return
```



Università di Ferrara, Dip. di Ingegneria
v. Saragat, 1, I-44100, Ferrara, Italia

Silvio Simani

Integrazione di Equazioni Differenziali



La funzione ode45.m...

```
% Script-file che integra il sistema differenziale
% non lineare del diodo tunnel e grafica i risultati.
options = odeset('RelTol',1e-6); % Opzioni per
% la funzione
% di integrazione
```

```
% Parametri fisici del modello
R = 2; L = 1; C = 1; G1 = 0.8; G2 = 0.05;

param = [R,L,C,G1,G2]; % Parametri fisici del modello

ci = [2 2]; % Condizioni iniziali per l'integrazione

time = [0 40]; % Tempo di integrazione

[t,x] = ode45('tunnel1',time,ci,options,param);
```

```
% Funzione che effettua l'integrazione
```



Università di Ferrara, Dip. di Ingegneria
v. Saragat, 1, I-44100, Ferrara, Italia

Silvio Simani

Integrazione di Equazioni Differenziali



La funzione `ode45.m (... continua)`

```
% Grafico delle traiettorie dello stato
```

```
figure
```

```
plot(x(:,1),x(:,2),'-') % Disegna i vettori passati  
% come argomenti
```

```
title('Traiettorie dello stato') % Titolo del grafico  
xlabel('x1') % Etichetta dell'asse delle ascisse  
ylabel('x2') % Etichetta dell'asse delle ordinate
```

```
% Grafico del moto dello stato
```

```
figure
```

```
plot(t,x(:,1),'-',t,x(:,2),'--')
```

```
title('Andamento nel tempo')
```

```
xlabel('Tempo')
```

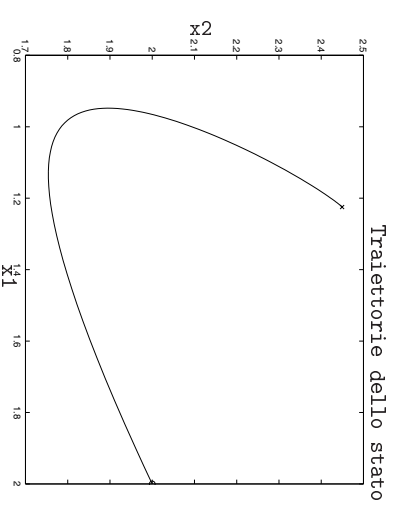
```
ylabel('x1(t) e x2(t)')
```



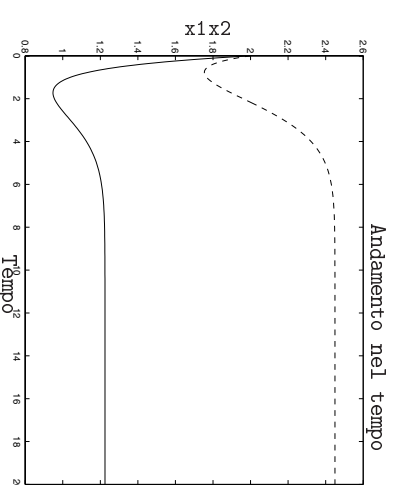
Università di Ferrara, Dip. di Ingegneria
v. Saragat, 1, I-44100, Ferrara, Italia

Silvio Simani

Grafici dei Risultati: tunnel1.m



Traiettorie dello stato.



Andamento nel tempo delle variabili di stato.



Università di Ferrara, Dip. di Ingegneria
v. Saragat, 1, I-44100, Ferrara, Italia

Silvio Simani

Elementi di Matlab: *Ode Suite*



File Ode e Ode Suite Solvers

⇒ Un *Ode file* è un file di tipo `.m` per definire un problema di equazioni differenziali che sono risolte dalle *Ode Suite Solvers*



`Y = odefile(T,Y0,FLAG,P1,P2,...)`

⇒ `T` e `Y0` sono variabili di integrazione

⇒ `FLAG` è una stringa che indica il tipo di informazione restituita dall' *Ode file*. `P1,P2,...` sono parametri aggiuntivi richiesti.



Università di Ferrara, Dip. di Ingegneria
v. Saragat, 1, I-44100, Ferrara, Italia

Silvio Simani

Elementi di Matlab: *Ode Suite*



File Ode e Ode Suite Solvers



Ode Suite Solvers: risolutori di equazioni differenziali (sono funzionali)



`[T,Y] = ode45('odefile',TSPAN,YCI,options,P1,P2,...)`

⇒ `ODE23`, `ODE113`, `ODE15S`, `ODE23S`, `ODE23T`, `ODE23TB`

⇒ `options = odeset('RelTol',1e-4,'AbsTol',1e-4,'Maxstep',1e-5);`

⇒ `[TSPAN,YCI,options] = odefile([],[],'init')`



Università di Ferrara, Dip. di Ingegneria
v. Saragat, 1, I-44100, Ferrara, Italia

Silvio Simani

Elementi di Matlab: *Ode Suite*



Integrazione *numerica* di equazioni differenziali ordinarie

⇒ `options = odeset('RelTol',1e-4,'AbsTol',1e-4,'MaxStep',10);`

⇒ `RelTol`, `AbsTol` : tolleranze relativa ed assoluta sull'errore ε per il controllo della convergenza

$$|\varepsilon| \leq \text{RelTol}|y| + \text{AbsTol}$$



Errore ε , soluzione y

⇒ `maxStep`: limite superiore al passo di integrazione



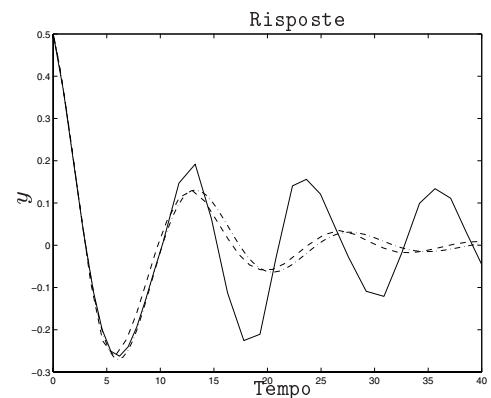
Università di Ferrara, Dip. di Ingegneria
v. Saragat, 1, I-44100, Ferrara, Italia

Silvio Simani

Integrazione di Equazioni Differenziali: Problemi

⇒ Esempio del circuito `tunnel1.m` e `ode45`:
tolleranze e passi di integrazione diversi.

- `'-'`: `RelTol = Abstol = 10e-1`
- `'--'`: `RelTol = Abstol = 10e-2`
- `'-.'`: `RelTol = Abstol = 10e-6`



Risposta del sistema con diversi passi di integrazione.



Università di Ferrara, Dip. di Ingegneria
v. Saragat, 1, I-44100, Ferrara, Italia

Silvio Simani

Simulazione del circuito non lineare



La funzione tunnel2.m

```
function xd = tunnel2(t,x,flag,param)
% Funzione che implementa il circuito di Eq.
% (2.1). E' presente anche una funzione del=
% =1'ingresso udt funzione del tempo.
%
% d x1(t) / dt = - R/L x1(t) + 1/L x2(t)
% d x2(t) / dt = - 1/C x1(t) + 1/C ( G1 x2(t)
%           - G2 x2(t)^3 ) + 1/C u(t)
%
R = param(1); % Parametri del circuito non
L = param(2); % lineare
C = param(3);
G1 = param(4);
G2 = param(5);
Tstart = param(6); % Istante di inizio del gradino
Tstop = param(7); % Istante finale del gradino
Value = param(8); % Ampiezza del gradino
```



Simulazione del circuito non lineare

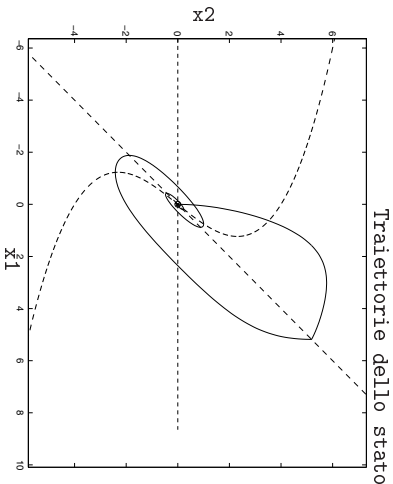


La funzione tunnel2.m (continua)

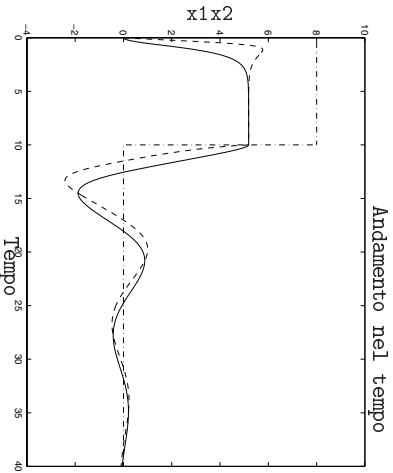
```
if((t>=Tstart)&(t<Tstop)), udt=Value; % Definizione
else udt=0.0; % del gradino
end;
x1d = - (R/L) * x(1) + (1.0/L) * x(2);
x2d = - (1.0/C) * x(1) + (1.0/C)*( G1 * x(2) -
           G2 * x(2)^3 );
xd = [x1d; x2d + (1.0/C)*udt];
return
```



Grafici dei Risultati: tunnel2.m



Traiettorie dello stato e punto di equilibrio.



Andamento nel tempo delle variabili di stato.



Elementi Grafici di Matlab



Funzioni di grafica plot (X, Y, S)

- ⇒ Grafica il vettore Y in funzione di X
- ⇒ X e Y sono vettori con lo stesso numero di elementi
- ⇒ S è una stringa formata da 3 caratteri:

y	yellow	.	point	-	solid
m	magenta	o	circle	:	dotted
c	cyan	x	x-mark	.-	dashdot
r	red	+	plus	--	dashed
g	green	*	star		
b	blue	s	square		
w	white	d	diamond		
k	black	v	triangle (down)		



Elementi Grafici di Matlab

figure

```
plot(x(:,1),x(:,2),'-')
title('Traiettorie dello stato')
xlabel('x1'), ylabel('x2')
```



Apertura finestra grafica: figure → figure(n)



Visualizzazione grafici: plot()



Titolo grafico: title()



Etichette assi: xlabel(), ylabel()



Università di Ferrara, Dip. di Ingegneria
v. Saragat, 1, I-44100, Ferrara, Italia

Silvio Simani

Linearizzazione di un sistema dinamico non lineare

⇒ Modello non lineare

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) &= f_1(x(t), u(t)) \\ \dot{x}_2(t) &= f_2(x(t), u(t)) \\ y(t) &= g(t) \end{cases}$$

⇒ Modello linearizzato

$$\begin{cases} \delta \dot{x}(t) &= A \delta x(t) + B \delta u(t) \\ \delta y(t) &= C \delta x(t) \end{cases}$$

⇒ $\delta x(t)$, $\delta u(t)$ e $\delta y(t)$ gli scostamenti dai valori di equilibrio



Università di Ferrara, Dip. di Ingegneria
v. Saragat, 1, I-44100, Ferrara, Italia

Silvio Simani

Linearizzazione di un sistema dinamico non lineare

⇒ Modello linearizzato

$$\begin{cases} \delta \dot{x}(t) &= A \delta x(t) + B \delta u(t) \\ \delta y(t) &= C \delta x(t) \end{cases}$$

⇒ Matrici calcolate nel punto di equilibrio

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial u} \\ \frac{\partial f_2}{\partial u} \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad C = \begin{bmatrix} \frac{\partial g}{\partial x_1} & \frac{\partial g}{\partial x_2} \end{bmatrix},$$

⇒ Linearizzazione del modello del circuito non lineare (tunnel1.m)



Università di Ferrara, Dip. di Ingegneria
v. Saragat, 1, I-44100, Ferrara, Italia

Silvio Simani

Linearizzazione del modello del circuito

```
% Modello non lineare
options = odeset('RelTol',1e-6);

R = 1; % Parametri del circuito non lineare.
L = 1;
C = 1;
G1 = 0.8;
G2 = 0.05;

param = [R,L,C,G1,G2]; % Parametri del
               % circuito non lineare.
ci = [0.5 0.5]; % Condizioni iniziali
ti = 0;
tf = 40;
time = [ti tf]; % Istante iniziale e
               % finale di integrazione

[t,x] = ode45('tunnel1',time,ci,options,param);
               % Integrazione del sistema
y = x(:,2); % Uscita del sistema
```



Università di Ferrara, Dip. di Ingegneria
v. Saragat, 1, I-44100, Ferrara, Italia

Silvio Simani

Linearizzazione del modello del circuito

% Modello lineare nello spazio degli stati

```
A = [-R/L      1.0/L;
      -1.0/C  G1/C ];
B = [1.0/C  0]';
C = [0  1];
D = 0;

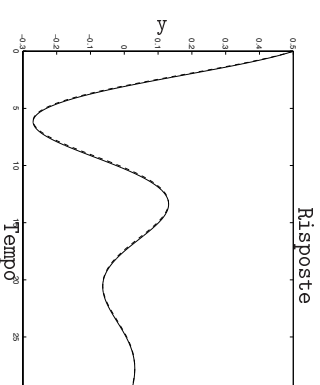
Sys = ss(A,B,C,D); % Crea il modello nello spazio
                    % degli stati
t1 = ti:0.01:tf;
U1 = zeros(size(t1));
[y1,t1,x1] = lsim(Sys,U1,t1,ci);

figure, plot(t1,y1,'-',t,y,'--')
title('Risposte'), xlabel('Tempo'), ylabel('y')

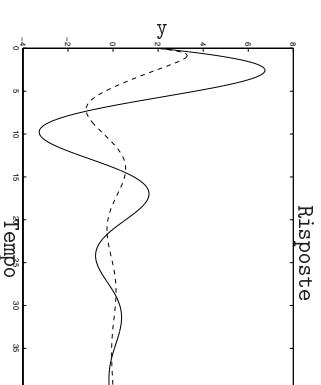
figure, plot(x(:,1),x(:,2),'-'), hold on
plot(x1(:,1),x1(:,2),':') , hold on
title('Traiettorie dello stato'), xlabel('x1')
ylabel('x2')
```



Linearizzazione del circuito: proprietà



Risposta del sistema lineare e del sistema non lineare.



Risposta dei sistemi per una condizione iniziale distante dall'origine.



Simulazione di sistemi dinamici



La funzione $[Y,T,X] = \text{lsim}(\text{SYS},U,T,X0)$

⇒ Simula la risposta nel tempo di un sistema LTI per ingressi arbitrari U

⇒ $\text{SYS} = \text{ss}(A,B,C,D)$

⇒ U vettore degli ingressi, T istanti di simulazione

⇒ $X0$ condizioni iniziali della simulazione

⇒ Y , uscite del sistema: $\text{length}(T)$ righe e m colonne

⇒ X : $\text{length}(T)$ righe, n colonne



Università di Ferrara, Dip. di Ingegneria
v. Saragat, 1, I-44100, Ferrara, Italia

Silvio Simani

Esercizi Proposti (1)



Modello matematico di Lotka-Volterra

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = a_1(1 - x_1(t)/k)x_1(t) - a_2x_1(t)x_2(t) + u(t) & \text{Prede} \\ \dot{x}_2(t) = -a_3x_2(t) + a_4x_1(t)x_2(t) & \text{Predatori} \end{cases}$$

⇒ $x_1(t)$ e $x_2(t)$ numero di prede di predatori

⇒ $u(t)$ cibo per le prede

⇒ k , numero massimo di prede in assenza di predatori e di cibo
($u(t) = 0$)



Università di Ferrara, Dip. di Ingegneria
v. Saragat, 1, I-44100, Ferrara, Italia

Silvio Simani

Esercizi Proposti (1)



Modello matematico di Lotka-Volterra

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = a_1(1 - x_1(t)/k)x_1(t) - a_2x_1(t)x_2(t) + u(t) & \text{Prede} \\ \dot{x}_2(t) = -a_3x_2(t) + a_4x_1(t)x_2(t) & \text{Predatori} \end{cases}$$

$\Rightarrow a_3 (> 0)$, tasso di crescita del predatore

$\Rightarrow a_1 (> 0)$, tasso di crescita delle prede

$\Rightarrow -a_2x_1(t)x_2(t)$, decremento delle prede per la presenza dei predatori

$\Rightarrow a_4x_1(t)x_2(t)$, incremento dei predatori per la presenza delle prede



Università di Ferrara, Dip. di Ingegneria
v. Saragat, 1, I-44100, Ferrara, Italia

Silvio Simani

Esercizi Proposti (1)



Modello matematico di Lotka-Volterra

\Rightarrow Se $a_1 = 20$, $a_2 = 1$, $a_3 = 7$, $a_4 = 0.5$ e $k = 30$, si determinino:

- 1) l'andamento nel tempo del numero di prede e predatori, supponendo nullo l'ingresso $u(t)$ e nelle ipotesi di partire da un ecosistema contenente 10 prede e 10 predatori. Si calcoli anche la traiettoria percorsa dal sistema nello spazio degli stati.
- 2) gli stati di equilibrio del sistema in assenza di ingresso.
- 3) i valori di regime raggiunti dal numero di prede e predatori nelle ipotesi che $u(t)$ sia un gradino di ampiezza $u(t) = 20$ e a partire dalle stesse condizioni proposte al punto 1). Si determini per tentativi l'ampiezza del gradino che consente di mantenere a regime un numero di predatori pari a 15.



Università di Ferrara, Dip. di Ingegneria
v. Saragat, 1, I-44100, Ferrara, Italia

Silvio Simani

Esercizi Proposti (2, facoltativo)



Sistema ibrido

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \begin{cases} A_1 \mathbf{x}(t) & \text{se } x_1(t) * x_2(t) < 0 \\ A_2 \mathbf{x}(t) & \text{se } x_1(t) * x_2(t) \geq 0 \end{cases}$$

$$\Rightarrow \mathbf{x}(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix}, \text{ durata della simulazione } 10s$$

$$\Rightarrow \text{Condizioni iniziali } (1, 0), (0, 1), (10^{-6}, 10^{-6})$$



Università di Ferrara, Dip. di Ingegneria
v. Saragat, 1, I-44100, Ferrara, Italia

Silvio Simani

Esercizi Proposti (2, facoltativo)



Date le matrici:

$$\Rightarrow A_1 = \begin{bmatrix} -0.1 & 1.0 \\ -10.0 & -0.1 \end{bmatrix}, A_2 = \begin{bmatrix} -0.1 & 10 \\ -1.0 & -0.1 \end{bmatrix}$$



Disegnare le traiettorie dello stato per i singoli sistemi e per quello ibrido, per le diverse condizioni iniziali



Disegnare l'andamento dello stato nel tempo per i singoli sistemi e per quello ibrido, per le diverse condizioni iniziali



Università di Ferrara, Dip. di Ingegneria
v. Saragat, 1, I-44100, Ferrara, Italia

Silvio Simani