

FACULTAT DE MATEMÀTIQUES I
ESTADÍSTICA

Equacions diferencials ordinàries

Pau Martín

11 de gener de 2021

Índex

1	Introducció i definicions bàsiques	5
1.1	Introducció	5
1.2	Equacions diferencials ordinàries. Conceptes bàsics	5
1.2.1	Definició d'equació diferencial ordinària	5
1.2.2	Sistemes autònoms i no autònoms	8
1.2.3	El problema de Cauchy (o de valor inicial)	8
1.2.4	Interpretació geomètrica d'una e.d.o.	10
1.2.5	Alguns exemples	10
2	Equacions diferencials lineals	13
2.1	Sistemes lineals generals	13
2.1.1	Definicions bàsiques	13
2.1.2	Estructura de l'espai de solucions de sistemes lineals	14
2.1.3	E.d.o.'s lineals unidimensionals	16
2.1.4	Sistemes lineals homogenis	19
2.1.5	Sistemes lineals no homogenis	25
2.2	Sistemes lineals amb coeficients constants	25
2.2.1	Definicions. La matriu exponencial	25
2.2.2	Càlcul de la matriu exponencial	30
2.2.3	Sistemes lineals amb coeficients constants no homogenis .	35
2.3	Retrats de fase de sistemes lineals	35
2.3.1	Retrats de fase. Òrbites	35
2.3.2	Retrats de fase de sistemes plans	37
2.3.3	Estabilitat de solucions de sistemes lineals	41
2.4	Sistemes lineals periòdics. Teoria de Floquet	43
2.4.1	Propietats elementals	43
2.4.2	La matriu de monodromia	44
2.4.3	Teoria de Floquet	45
2.4.4	Estudi de l'estabilitat de solucions d'un sistema periòdic .	46
3	Teoremes fonamentals	51
3.1	Existència i unicitat de solucions de p.v.i.	51
3.1.1	El problema de Cauchy com a equació integral	51
3.1.2	El teorema del punt fix de Banach	52
3.1.3	El teorema de Picard	55
3.1.4	El teorema de Peano	59
3.1.5	Solucions maximals	60
3.2	Dependència respecte a condicions inicials i paràmetres	62

3.2.1	Continuïtat i dependència Lipschitz	63
3.2.2	Diferenciabilitat	66
3.2.3	Derivades d'ordre superior	69
4	Introducció a la teoria qualitativa	73
4.1	Sistemes autònoms, fluxos i òrbites	73
4.1.1	Introducció	73
4.1.2	Punts fixos i òrbites periòdiques	74
4.1.3	Fluxos preservant volum	76
4.2	Estabilitat en el sentit de Liapunov	77
4.2.1	Estabilitat de Liapunov	77
4.2.2	El criteri de Liapunov	80
4.3	Integrals primeres i integrabilitat	82
5	Apèndixs	87
5.1	Demostració alternativa del Teorema de Picard	87

Capítol 1

Introducció i definicions bàsiques

1.1 Introducció

Les equacions diferencials han estat l'eina que ha permès passar de la descripció a la predicció en l'estudi de tots els fenòmens que ens envolten, des del moviment dels planetes i estrelles a les partícules subatòmiques. La diferència fonamental entre les lleis de Kepler i la llei de la gravitació universal de Newton rau en que les primeres descriuen les trajectòries dels planetes en el seu conjunt (i, per tant, són aproximades al conjunt de dades que les conformen) mentre que la segona, en quantificar els canvis infinitessimals d'aquestes les trajectòries, sense donar-les explícitament, les conté. El cert és que les lleis de Kepler són només una aproximació de les solucions de les equacions definides per la llei de gravitació universal.

Aquest curs només vol ser una introducció a la teoria de les equacions diferencials ordinàries. Per la seva curta durada, ens limitarem a l'estudi dels sistemes lineals, als teoremes fonamentals d'existència, unicitat i regularitat de solucions de equacions diferencials ordinàries i intentarem donar unes pinzellades de teoria qualitativa i teoria de pertorbacions. En qualsevol cas, els continguts del curs seran una base suficient per a poder aprofundir en el tema en cursos posteriors.

1.2 Equacions diferencials ordinàries. Conceptes bàsics

1.2.1 Definició d'equació diferencial ordinària

Sense entrar en precisions tècniques, una equació diferencial és una equació que relaciona una funció incògnita amb les seves derivades. Així, són equacions diferencials

Exemple 1.1. 1. $y' = y$, on la incògnita és una funció $y(x)$,

2. $y'' = -\sin(y)$, on la incògnita és una funció $y(x)$,

3. $y'' = -\sin(y) + \cos(x)$, on la incògnita és una funció $y(x)$,

4. $\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} = 0$, on la incògnita és una funció $z(x, y)$,

5. $y''(x) = -y(x-1)$, on la incògnita és una funció $y(x)$.

En aquest curs estudiarem només les anomenades equacions diferencials ordinàries.

Definició 1.1. Anomenarem equació diferencial ordinària, que escriurem de manera abreujada e.d.o., a una equació de la forma

$$g(x, y(x), y'(x), \dots, y^{(n)}(x)) = 0, \quad (1.1)$$

on la incògnita $y(x) = (y_1(x), \dots, y_m(x))^T$ és una funció de m components i una variable $x \in \mathbb{R}$, $y' = dy/dx$ i $g(x, z_1, z_2, \dots, z_{n+1})$, $z_i \in \mathbb{R}^m$, és una funció de $1+m(n+1)$ variables. La variable x de la que depèn la incògnita y s'anomena variable independent.

Sovint ens interessarà el cas en que hom pot aïllar $y^{(n)}$ de (1.1), és a dir, el cas en que l'e.d.o. és de la forma

$$y^{(n)}(x) = f(x, y(x), y'(x), \dots, y^{(n-1)}(x)). \quad (1.2)$$

En aquest darrer cas, direm que l'e.d.o. està en forma explícita, mentre que en el cas de (1.1) direm que l'e.d.o. està en forma implícita. Per simplificar, sovint escriurem (1.2) com

$$y^{(n)} = f(x, y, y', \dots, y^{(n-1)}),$$

sobreentenent que y és una funció avaluada en x .

Direm que les equacions (1.1) i (1.2) són e.d.o. de m incògnites i d'ordre n .

En l'exemple 1.1, són e.d.o. les equacions a 1, 2 i 3. La 1 és d'ordre 1. La 2 i la 3, d'ordre 2. La 4 no és una e.d.o. perquè la incògnita depèn de dues variables. Aquesta mena d'equacions s'anomenen equacions en derivades parcials. L'equació a 5 tampoc és una e.d.o. perquè la incògnita està avaluada en x i en $x-1$. Aquesta equació és un exemple d'equació diferencial amb retard.

Al llarg d'aquest curs, estudiarem e.d.o. explícites.

Definició 1.2. Considerem l'e.d.o. de m incògnites d'ordre n

$$y^{(n)} = f(x, y, y', \dots, y^{(n-1)}).$$

Direm que una funció $\varphi : (a, b) \subset \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^m$ n'és una solució si φ és n vegades derivable i

$$\varphi^{(n)}(x) = f(x, \varphi(x), \varphi'(x), \dots, \varphi^{(n-1)}(x)), \quad \forall x \in (a, b).$$

En particular, cal que

$$\{(x, \varphi(x), \dots, \varphi^{(n-1)}(x)) \mid x \in (a, b)\} \subset \text{domini}(f).$$

Anomenarem solució general de l'e.d.o. al conjunt de totes les seves solucions.

La qüestió més elemental que ens podem plantejar davant una e.d.o. és si admet solucions. Veuem més endavant sota quines condicions es pot assegurar que una e.d.o. n'admet.

Comentari 1.3. *Sempre es pot transformar una e.d.o. de m incògnites i d'ordre n en una e.d.o. de $n \cdot m$ incògnites i ordre 1. Per tant, ens podrem restringir a l'estudi de les e.d.o. d'ordre 1.*

En efecte, donada l'e.d.o. de m incògnites i d'ordre n

$$y^{(n)} = f(x, y, y', \dots, y^{(n-1)}),$$

podem definir les noves incògnites

$$z_1 = y, z_2 = y', \dots, z_n = y^{(n-1)}.$$

Observeu que cada z_i , $i = 1, \dots, n$, és un vector de m components. Llavors, fent servir que $y^{(n)} = f(x, y, y', \dots, y^{(n-1)})$, tenim que les funcions z_i , $i = 1, \dots, n$, han de satisfer

$$\begin{aligned} z'_1 &= y' = z_2, \\ z'_2 &= y'' = z_3, \\ &\vdots \\ z'_{n-1} &= y^{(n-1)} = z_n, \\ z'_n &= y^{(n)} = f(x, y, y', \dots, y^{(n-1)}) = f(x, z_1, z_2, \dots, z_n), \end{aligned}$$

que és una e.d.o. de $n \cdot m$ incògnites i ordre 1. De manera abreujada, definint Z com el vector que té per components z_1, \dots, z_n (és a dir, $Z^\top = (z_1^\top, \dots, z_n^\top)$), l'e.d.o. queda

$$Z' = \begin{pmatrix} z_2 \\ \vdots \\ z_n \\ f(x, Z) \end{pmatrix}.$$

Exemple 1.2. *Considerem l'e.d.o. d'una incògnita i ordre 2*

$$y'' + y = 0.$$

Observeu que està escrita en forma implícita. En forma explícita és

$$y'' = -y.$$

Si definim $z_1 = y$ i $z_2 = y'$, tenim que, per la igualtat immediatament a sobre,

$$\begin{aligned} z'_1 &= y' = z_2, \\ z'_2 &= y'' = -y = -z_1. \end{aligned}$$

Per tant, l'e.d.o. d'ordre 2 $y'' + y = 0$ és equivalent l'e.d.o. d'ordre 1

$$\begin{aligned} z'_1 &= z_2, \\ z'_2 &= -z_1. \end{aligned}$$

1.2.2 Sistemes autònoms i no autònoms

Tal com hem vist en la subsecció anterior, sense perdre generalitat ens podem restringir a considerar e.d.o.'s d'ordre 1.

Definició 1.4. *Direm que una e.d.o. és autònoma si no depèn explícitament de la variable independent, és a dir, si és de la forma*

$$y' = f(y).$$

Anàlogament, direm que una e.d.o. és no autònoma si és de la forma

$$y' = f(x, y).$$

La següent proposició posa de manifest la diferència entre les e.d.o. autònomes i no autònomes.

Proposició 1.5. *Siguin $y' = f(y)$, una e.d.o. autònoma de m variables, i $\varphi : (a, b) \subset \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^m$, una solució. Llavors, per tot $\alpha \in \mathbb{R}$, la funció $\varphi_\alpha : (a + \alpha, b + \alpha) \subset \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^m$, traslladada de φ , definida per*

$$\varphi_\alpha(x) = \varphi(x - \alpha)$$

n'és també solució.

Demostració. En efecte, com $\varphi'(x) = f(\varphi(x))$, per ser φ solució de l'e.d.o.,

$$\varphi'_\alpha(x) = \varphi'(x - \alpha) = f(\varphi(x - \alpha)) = f(\varphi_\alpha(x)).$$

Per tant, φ_α també n'és solució. □

Exercici 1.1. *En certa manera, el recíproc de la Proposició 1.5 és cert, és a dir, si per a tota solució φ d'una e.d.o., les seves traslladades també en són solució, llavors l'e.d.o. és autònom. Preciseu l'enunciat. Veurem com fer-ho més endavant.*

Comentari 1.6. *Considereu l'e.d.o. no autònoma*

$$y' = f(x, y).$$

Sigui $z = (x, y)$. Com $dx/dx = 1$, tenim que

$$z' = (x', y') = (1, f(x, y)) = (1, f(z)).$$

La variable z és solució del sistema autònom $z' = g(z)$, on $g(z) = (1, f(z))$.

Per tant, és possible transformar un sistema no autònom en un sistema autònom d'una variable més.

1.2.3 El problema de Cauchy (o de valor inicial)

La primera qüestió que ens podem plantejar sobre una e.d.o. és l'existència de solucions. Si un pot trobar-les totes explícitament, la pregunta es torna trivial. Aquest serà el cas d'alguns tipus d'equacions. Però, en general, no serà possible trobar-ne explícitament les solucions. Llavors, la qüestió de la seva existència és delicada. Per a tractar-la, considerarem els anomenats problemes de Cauchy.

Definició 1.7. *Siguin $U \subset \mathbb{R} \times \mathbb{R}^n$, un conjunt obert, i $f : U \rightarrow \mathbb{R}^n$, una funció o camp vectorial.*

Donat $(x_0, y_0) \in U$, anomenarem problema de Cauchy o problema de valor inicial a trobar una solució φ de $y' = f(x, y)$ tal que $\varphi(x_0) = y_0$, és a dir a trobar una funció $\varphi : (a, b) \rightarrow \mathbb{R}^n$, amb $x_0 \in (a, b)$, solució de

$$\begin{aligned} y' &= f(x, y), \\ y(x_0) &= y_0. \end{aligned}$$

El punt (x_0, y_0) s'anomena condició inicial.

S'anomena problema de valor inicial (que abreujaem com p.v.i.), perquè busquem una solució de l'e.d.o. que satisfà un determinat valor y_0 en un instant inicial x_0 .

Alguns exemples són els següents.

Exemple 1.3. *Una solució del p.v.i.*

$$\begin{aligned} y' &= y, \\ y(0) &= 1 \end{aligned}$$

és $\varphi(x) = e^x$. En efecte, $\varphi'(x) = (e^x)' = e^x = \varphi(x)$ i $\varphi(0) = e^0 = 1$.

De fet, l'e.d.o. $y' = y$ admet solucions per a qualsevol condició inicial.

Exemple 1.4. *Per a qualsevol $(x_0, y_0) \in \mathbb{R}^2$, una solució del p.v.i.*

$$\begin{aligned} y' &= y, \\ y(x_0) &= y_0 \end{aligned}$$

és $\varphi(x) = y_0 e^{(x-x_0)}$. En efecte, $\varphi'(x) = (y_0 e^{(x-x_0)})' = y_0 e^{(x-x_0)} = \varphi(x)$ i $\varphi(x_0) = y_0 e^0 = y_0$.

Exercici 1.2. *Proveu que la funció $\varphi(x) = y_0 e^{(x-x_0)}$ en l'exemple anterior és l'única solució del p.v.i. $y' = y$, $y(x_0) = y_0$. Això ho provarem en el proper capítol.*

Però un p.v.i. pot admetre més d'una solució, com mostra el proper exemple.

Exemple 1.5. *El p.v.i.*

$$\begin{aligned} yy' - x &= 0, \\ y(0) &= 0 \end{aligned}$$

admet dues solucions: $\varphi_{\pm}(x) = \pm x$.

O pot no tenir-ne cap.

Exemple 1.6. *Veurem més endavant que el p.v.i.*

$$\begin{aligned} yy' + x &= 0, \\ y(0) &= 0 \end{aligned}$$

no té cap solució.

Exercici 1.3. *Proveu que el p.v.i. de l'Exemple 1.6 no té solucions.*

1.2.4 Interpretació geomètrica d'una e.d.o.

Considerem, per a simplificar, una funció $f : U \subset \mathbb{R} \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$, on U és un obert, i l'e.d.o.

$$y' = f(x, y). \quad (1.3)$$

Una funció φ n'és solució si $\varphi'(x) = f(x, \varphi(x))$. Ara bé, $\varphi'(x)$ és el pendent de la recta tangent a la gràfica de φ . Llavors, la igualtat $\varphi'(x) = f(x, \varphi(x))$ ens diu que el pendent de la recta tangent a la gràfica de la solució $\varphi(x)$ és precisament $f(x, \varphi(x))$. Així, podem interpretar la funció $f(x, y)$ a (1.3) com un camp de pendents, és a dir, una funció que, a cada punt (x, y) , li assigna un pendent $f(x, y)$.

En dimensió superior, tenim una interpretació similar. Suposem ara que, a (1.3), la funció $f : U \subset \mathbb{R} \times \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ és un camp vectorial. Les funcions $\varphi : (a, b) \rightarrow \mathbb{R}^n$ es poden interpretar com corbes a \mathbb{R}^n . En cada punt $\varphi(x)$, el vector $\varphi'(x)$ és el vector tangent a la corba. Llavors, φ és solució de (1.3) si el seu vector tangent en $\varphi(x)$ és $f(x, \varphi(x))$, és a dir, si la corba $\varphi(x)$ és tangent al camp vectorial f en el punt $(x, \varphi(x))$, per a tot $x \in (a, b)$.

1.2.5 Alguns exemples

1. Considerem una molla elàstica, amb factor de rigidesa $\kappa > 0$. Suposem que a l'extrem de la molla pengem una massa m . Sigui $y(t)$ la posició de la massa en l'instant t , mesurada a partir del pun d'equilibri de la molla. De la segona llei de Newton i de la llei de Hooke tenim que la posició de la massa ha de satisfer l'equació de segon ordre

$$m\ddot{y} = -\kappa y.$$

Aquesta és l'equació d'un *oscil·lador harmònic*. Observem que $\dot{y} = dy/dt$.

2. Considerem una massa m que penja d'un pèndol de longitud ℓ en un camp gravitatori constant de força g . Sigui θ l'angle que fa el pèndol respecte a la vertical, on $\theta = 0$ indica que el pèndol està en la posició inferior. L'equació que satisfà θ és

$$m\ell\ddot{\theta} = -g \sin \theta \quad \Longleftrightarrow \quad \ddot{\theta} = -\frac{g}{\ell} \sin \theta.$$

3. Siguin q_1, \dots, q_n les posicions a l'espai (en un sistema de referència fixat) de n cossos puntuals de masses m_1, \dots, m_n . Segons la llei de gravitació universal de Newton, la força que exerceix el cos i sobre el cos j és inversament proporcional al quadrat de la distància entre ells i proporcional al producte de les seves masses. Proveu que les posicions q_i , $i = 1, \dots, n$, satisfan les e.d.o.

$$m_i \ddot{q}_i = G \sum_{j \neq i} \frac{m_i m_j}{\|q_j - q_i\|^3} (q_j - q_i), \quad i = 1, \dots, n.$$

4. Model epidemiològic SIR (vegeu, per exemple, [això](#)). Si considereu una població susceptible, S , un conjunt d'infectats, I , i el grup dels que surten

del total — ja sigui perquè es recuperen o perquè moren —, un model molt conegut de l'expansió de la grip és el conjunt de e.d.o.'s

$$\begin{cases} \dot{S} = -\frac{\beta}{N}SI, \\ \dot{I} = \frac{\beta}{N}SI - \gamma I, \\ \dot{R} = \gamma I, \end{cases}$$

on $N = S + I + R$ és la població total, que es suposa constant, i β i γ són paràmetres. Es pot veure que la dinàmica del sistema depèn essencialment de $R_0 = \beta/\gamma$, que s'anomena **nombre reproductiu bàsic**.

5. E.d.o.'s de famílies de corbes. Com a exemple, considerem la família de les circumferències al pla centrades a l'origen,

$$x^2 + y^2 = r^2, \quad r \in \mathbb{R}.$$

Si suposem que y és una funció de x , derivant aquesta darrera igualtat respecte a x obtenim

$$2x + 2yy' = 0 \quad \Longleftrightarrow \quad y' = -\frac{x}{y}.$$

Ara podríem considerar les famílies de corbes ortogonals a la família $\{x^2 + y^2 = r^2, r \in \mathbb{R}\}$. L'e.d.o. que satisfà és

$$y' = \frac{y}{x}.$$

Comproveu que les solucions d'aquesta darrera equació són $y = \alpha x$, $\alpha \in \mathbb{R}$.

Capítol 2

Equacions diferencials lineals

En aquest capítol estudiarem les e.d.o. lineals. En primer lloc, considerarem els sistemes lineals en general, donant-ne les propietats bàsiques. En general, però, no és possible resoldre explícitament aquesta mena de sistemes. Després passarem a estudiar el cas particular dels sistemes lineals amb coeficients constants, els quals sí podem resoldre completament.

Aprofitem per canviar el nom de la variable independent, que passa a ser t . La incògnita serà indistintament x o y . Les derivades de la incògnita respecte a t les denotarem indistintament com x' o \dot{x} .

2.1 Sistemes lineals generals

Al llarg d'aquesta secció, $I \subset \mathbb{R}$ denotarà un interval obert.

2.1.1 Definicions bàsiques

Definició 2.1. Direm que una e.d.o. o sistema d'e.d.o.'s és lineal si és de la forma

$$\dot{x} = A(t)x + b(t),$$

on, per a tot $t \in I \subset \mathbb{R}$, $A(t) \in \mathcal{M}_{n \times n}(\mathbb{R})$ (o $\mathcal{M}_{n \times n}(\mathbb{C})$) i $b(t) \in \mathbb{R}^n$. La funció incògnita x és un vector n -dimensional.

Direm que el sistema és homogeni si $b(t) = 0$, per a tot t .

Direm que el sistema és de coeficients constants si la matriu A és constant.

Exemple 2.1. L'oscil·lador harmònic forçat externament $\ddot{y} + a^2 y = \cos t$ defineix un sistema lineal. En efecte, introduint $x_1 = y$ i $x_2 = \dot{y}$, l'e.d.o. es transforma en el sistema

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_2 \\ -a^2 x_1 + \cos t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -a^2 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \cos t \end{pmatrix}.$$

El motiu de considerar sistemes lineals és el següent. Considerem el sistema d'e.d.o.'s

$$\dot{x} = f(t, x),$$

on f és una funció de classe C^1 respecte a x . Suposem que en coneixem una solució, $x_0(t)$, $t \in I$, i que volem estudiar-ne les solucions properes a x_0 . Per a fer-ho, escrivim $x = x_0 + \tilde{x}$ o, equivalentment, $\tilde{x} = x - x_0$. Com la funció f és de classe C^1 respecte a x , podem escriure

$$f(t, x) = f(t, x_0(t)) + D_x f(t, x_0(t))(x - x_0(t)) + o((x - x_0(t))),$$

on $D_x f$ denota la matriu diferencial de f respecte a x , amb el que l'equació es transforma en

$$\dot{x} = f(t, x_0(t)) + D_x f(t, x_0(t))(x - x_0(t)) + o((x - x_0(t))).$$

Com $x = x_0 + \tilde{x}$, ens queda

$$\dot{x}_0 + \dot{\tilde{x}} = f(t, x_0(t)) + D_x f(t, x_0(t))\tilde{x} + o(\tilde{x}).$$

Fent servir que $\dot{x}_0 = f(t, x_0(t))$, perquè estem suposant que x_0 és solució de l'e.d.o., aquesta darrera equació és

$$\dot{\tilde{x}} = D_x f(t, x_0(t))\tilde{x} + o(\tilde{x}).$$

Si menyspreem els termes de l'error $o(\tilde{x})$, el comportament de les solucions de $\dot{x} = f(t, x)$ a prop de la solució $x_0(t)$ ve donat, en primer ordre, per les solucions del sistema lineal (i homogeni)

$$\dot{\tilde{x}} = D_x f(t, x_0(t))\tilde{x}. \quad (2.1)$$

Si sabem resoldre aquest sistema lineal, tindrem el primer ordre de les solucions del sistema original properes a x_0 .

2.1.2 Estructura de l'espai de solucions de sistemes lineals

La estructura lineal dels sistemes que estem considerant en aquest capítol se'n tradueix al nivell de les solucions. Més concretament, quan el sistema és homogeni, tenim el següent resultat.

Proposició 2.2. *Considerem el sistema lineal homogeni*

$$\dot{x} = A(t)x.$$

Siguin x_1 i x_2 dues solucions del sistema. Llavors, per a tot $\lambda_1, \lambda_2 \in \mathbb{R}$ (o \mathbb{C}), $\lambda_1 x_1 + \lambda_2 x_2$ n'és també solució. És a dir, la solució general del sistema és un espai vectorial (real i complex). Aquesta propietat és sovint anomenada principi de superposició.

Demostració. Tenim que, per hipòtesi, $\dot{x}_i(t) = A(t)x_i(t)$, $i = 1, 2$. Sigui $\lambda_1, \lambda_2 \in \mathbb{R}$. Tenim que, per la linealitat de A ,

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(\lambda_1 x_1(t) + \lambda_2 x_2(t)) &= \lambda_1 \dot{x}_1(t) + \lambda_2 \dot{x}_2(t) \\ &= \lambda_1 A(t)x_1(t) + \lambda_2 A(t)x_2(t) = A(t)(\lambda_1 x_1(t) + \lambda_2 x_2(t)). \end{aligned}$$

Per tant, $\lambda_1 x_1 + \lambda_2 x_2$ és també solució del sistema. \square

Observeu que la Proposició 2.2 només diu que la solució general d'un sistema lineal homogeni és un espai vectorial, sense donar-ne informació sobre la dimensió. En particular, aquesta podria ser 0 si el sistema només admetés la solució $x(t) = 0$ per a tot t . La dimensió de l'espai de solucions està lligada a l'existència i unicitat de solucions dels p.v.i. associats al sistema, com veurem en el Teorema 2.8.

Quan el sistema és no homogeni, tenim el següent resultat sobre la seva solució general.

Proposició 2.3. *Considerem el sistema lineal*

$$\dot{x} = A(t)x + b(t).$$

Si φ_p , una solució del sistema. Llavors, φ n'és solució si i només si existeix φ_h , solució del sistema homogeni associat $\dot{x} = A(t)x$, tal que $\varphi = \varphi_p + \varphi_h$.

Demostració. Suposem que φ és solució del sistema $\dot{x} = A(t)x + b(t)$. Afirmem que $\varphi_h = \varphi - \varphi_p$ és solució del sistema homogeni associat. En efecte,

$$\dot{\varphi}_h = \dot{\varphi} - \dot{\varphi}_p = A(t)\varphi + b(t) - A(t)\varphi_p - b(t) = A(t)(\varphi - \varphi_p) = A(t)\varphi_h.$$

Per tant, $\varphi = \varphi_p + \varphi_h$. Això prova la implicació cap a la dreta.

La implicació cap a l'esquerra és immediata perquè si $\varphi = \varphi_p + \varphi_h$, amb φ_h solució del sistema homogeni associat, llavors

$$\dot{\varphi} = \dot{\varphi}_p + \dot{\varphi}_h = A(t)\varphi_p + b(t) + A(t)\varphi_h = A(t)(\varphi_p + \varphi_h) + b(t) = A(t)\varphi + b(t).$$

□

Una conseqüència important d'aquestes dues proposicions és que per a resoldre un sistema lineal no homogeni $\dot{x} = A(t)x + b(t)$ una manera de procedir és la següent:

1. trobar la solució general del sistema homogeni associat, $\dot{x} = A(t)x$, $\{\varphi_h \mid \dot{\varphi}_h = A(t)\varphi_h\}$,
2. trobar una solució particular del sistema complet, φ_p .

Llavors, la solució general de l'e.d.o. és

$$\{\varphi_p\} + \{\varphi_h \mid \dot{\varphi}_h = A(t)\varphi_h\} = \{\varphi \mid \varphi = \varphi_p + \varphi_h, \dot{\varphi}_h = A(t)\varphi_h\}.$$

Comentari 2.4. *Les Proposicions 2.2 i 2.3 les podem reescriure fent servir el llenguatge de l'àlgebra lineal de la manera següent.*

Donat el sistema d'e.d.o.'s lineal i homogeni $\dot{x} = A(t)x$, definim l'operador \mathcal{L} , actuant sobre funcions derivables, com

$$\mathcal{L}x = \dot{x} - A(t)x. \quad (2.2)$$

Fent servir aquest operador, el sistema $\dot{x} = A(t)x$ s'escriu $\mathcal{L}x = 0$.

Observem que l'operador \mathcal{L} és lineal. En efecte, per a qualsevol parell de funcions derivables, x_1 i x_2 , i per a tot $\lambda_1, \lambda_2 \in \mathbb{R}$,

$$\begin{aligned} \mathcal{L}(\lambda_1 x_1 + \lambda_2 x_2) &= \frac{d}{dt}(\lambda_1 x_1 + \lambda_2 x_2) - A(t)(\lambda_1 x_1 + \lambda_2 x_2) \\ &= \lambda_1 \dot{x}_1 + \lambda_2 \dot{x}_2 - \lambda_1 A(t)x_1 - \lambda_2 A(t)x_2 \\ &= \lambda_1 \mathcal{L}x_1 + \lambda_2 \mathcal{L}x_2. \end{aligned}$$

Llavors, com l'e.d.o. és $\mathcal{L}x = \dot{x} - A(t)x = 0$, tenim que la seva solució general és

$$\{\varphi \mid \dot{\varphi} - A(t)\varphi = 0\} = \{\varphi \mid \mathcal{L}\varphi = 0\} = \ker \mathcal{L}$$

Ara bé, el nucli d'un operador lineal és un espai vectorial. Això és el que diu la Proposició 2.2.

El sistema no homogeni $\dot{x} = A(t)x + b(t)$ s'escriu, fent servir l'operador \mathcal{L} , com

$$\mathcal{L}x = b.$$

Com \mathcal{L} és lineal, tenim que per a qualsevol φ_p tal que $\mathcal{L}\varphi_p = b$,

$$\{\varphi \mid \mathcal{L}\varphi = b\} = \{\varphi_p\} + \ker \mathcal{L} = \{\varphi \mid \varphi = \varphi_p + \varphi_h, \varphi_h \in \ker \mathcal{L}\}.$$

Això és la traducció a aquest llenguatge del que diu la Proposició 2.3.

2.1.3 E.d.o.'s lineals unidimensionals

El cas unidimensional és molt especial. És l'únic cas general que sempre es pot resoldre — o, al menys, les seves solucions sempre es poden expressar explícitament en termes de quadratures —. Aquest fet ens permetrà resoldre alguns sistemes lineals de dimensió superior.

Considerem l'e.d.o.

$$\dot{x} = a(t)x + b(t), \quad (2.3)$$

on $a, b : I \subset \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ són funcions contínues. Per a resoldre'l, tal com vam dir en la secció anterior, primer trobarem la solució general de l'e.d.o. homogènia associada i, després, trobarem una solució particular de l'e.d.o. completa.

Proposició 2.5. Considerem l'e.d.o. lineal homogènia associada a (2.3),

$$\dot{x} = a(t)x. \quad (2.4)$$

Sigui $t_0 \in I$. La solució general de (2.4) és

$$\left\{ \lambda e^{\int_{t_0}^t a(s) ds} \mid \lambda \in \mathbb{R} \right\}.$$

Demostració. Observem que, com la funció a és contínua I , la funció $\int_{t_0}^t a(s) ds$ és de classe C^1 a I i

$$\frac{d}{dt} \int_{t_0}^t a(s) ds = a(t).$$

Sigui¹

$$\varphi(t) = e^{\int_{t_0}^t a(s) ds}.$$

¹Perquè hem escollit aquesta funció? El raonament és el següent. De $\dot{x}(t) = a(t)x(t)$, si suposem que $x(t) \neq 0$, com $x(t)$ és una funció escalar, tenim que

$$\frac{\dot{x}(t)}{x(t)} = a(t).$$

Integrant a ambdós costats de la igualtat entre t_0 i t , tenim que

$$\int_{t_0}^t \frac{\dot{x}(s)}{x(s)} ds = \int_{t_0}^t a(s) ds.$$

Observem que $\varphi(t) \neq 0$, per a tot $t \in I$, perquè l'exponencial no s'anul·la a \mathbb{R} . Afirmem que φ és solució de (2.4). En efecte,

$$\dot{\varphi}(t) = \frac{d}{dt} \left(e^{\int_{t_0}^t a(s) ds} \right) = e^{\int_{t_0}^t a(s) ds} \frac{d}{dt} \int_{t_0}^t a(s) ds = a(t) e^{\int_{t_0}^t a(s) ds} = a(t) \varphi(t).$$

La Proposició 2.2 implica llavors que

$$\left\{ \lambda e^{\int_{t_0}^t a(s) ds} \mid \lambda \in \mathbb{R} \right\} \subset \{x \mid \dot{x} = a(t)x\}.$$

Ens falta veure la inclusió contrària.

Sigui $\tilde{\varphi} : \tilde{I} \subset I \rightarrow \mathbb{R}$ una solució de (2.4). Com φ no s'anul·la, podem escriure $\tilde{\varphi}(t) = c(t)\varphi(t)$, on $c : \tilde{I} \rightarrow \mathbb{R}$ és una funció derivable². Del fet que tant φ com $\tilde{\varphi}$ siguin solució de (2.4) deduïm que

$$a(t)c(t)\varphi(t) = \frac{d}{dt}(c(t)\varphi(t)) = \dot{c}(t)\varphi(t) + c(t)\varphi(t),$$

el que implica que $\dot{c}(t)\varphi(t) = 0$, per a tot $t \in \tilde{I}$. Com φ no s'anul·la, tenim que $\dot{c}(t) = 0$, per a tot $t \in \tilde{I}$, és a dir $c(t) = \lambda$, per a algun $\lambda \in \mathbb{R}$. \square

Exercici 2.1. *Per què aquesta demostració no funciona en el cas de que l'e.d.o. sigui de dimensió més gran que 1? **Indicació:** si bé es pot definir*

$$\tilde{A}(t) = \int_{t_0}^t A(s) ds,$$

quan A és una matriu, simplement integrant cada element d' A , i definir la seva exponencial com

$$e^{\tilde{A}(t)} = \sum_{j \geq 0} \frac{1}{j!} \tilde{A}(t)^j,$$

que resulta ser una matriu derivable (feu servir el criteri M de Weierstrass de manera adient) veieu que, en general,

$$\frac{d}{dt} e^{\tilde{A}(t)} \neq A(t) e^{\tilde{A}(t)}.$$

Què ha de satisfer la matriu A per a que aquesta darrera igualtat sigui certa?

Ara estem en condicions de donar la solució general de (2.3).

Ara bé, com $\frac{d}{dt} \log x(t) = \frac{\dot{x}(t)}{x(t)}$, tenim que

$$\int_{t_0}^t \frac{\dot{x}(s)}{x(s)} ds = \log x(t) - \log x(t_0) = \log x(t) - \log x_0.$$

Per tant,

$$\log x(t) = \log x_0 + \int_{t_0}^t a(s) ds.$$

Prenent exponencials a ambdós costats, obtenim la funció φ .

² $c(t) = \tilde{\varphi}(t)/\varphi(t)$ és un quocient de funcions derivables amb denominador no nul.

Proposició 2.6. *Segui $t_0 \in I$. La solució general de l'e.d.o. (2.3) és*

$$\left\{ \lambda e^{\int_{t_0}^t a(s) ds} + e^{\int_{t_0}^t a(s) ds} \int_{t_0}^t e^{-\int_{t_0}^s a(u) du} b(s) ds \mid \lambda \in \mathbb{R} \right\}.$$

Equivalentment, per a qualsevol $(t_0, x_0) \in I \times \mathbb{R}$, la única solució del p.v.i.

$$\dot{x} = a(t)x + b(t), \quad x(t_0) = x_0$$

és

$$\begin{aligned} \varphi(t, t_0, x_0) &= e^{\int_{t_0}^t a(s) ds} \left(x_0 + \int_{t_0}^t e^{-\int_{t_0}^s a(u) du} b(s) ds \right) \\ &= e^{\int_{t_0}^t a(s) ds} x_0 + \int_{t_0}^t e^{\int_{t_0}^s a(u) du} b(s) ds. \end{aligned}$$

Demostració. La demostració es basa en el *mètode de variació de les constants*³, fonamental en l'estudi de tot tipus d'equacions que involucren operadors diferencials. Busquem les solucions x de (2.3) introduint la nova incògnita c tal que

$$x(t) = e^{\int_{t_0}^t a(s) ds} c(t). \quad (2.5)$$

Observem que c està ben definida, perquè l'exponencial no s'anul·la. La substitució de x en (2.5) en l'equació (2.3) dona

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= a(t)x(t) + b(t) && \Longleftrightarrow \\ \frac{d}{dt} \left(e^{\int_{t_0}^t a(s) ds} \right) c(t) + e^{\int_{t_0}^t a(s) ds} \dot{c}(t) &= a(t) e^{\int_{t_0}^t a(s) ds} c(t) + b(t) && \Longleftrightarrow \\ a(t) e^{\int_{t_0}^t a(s) ds} c(t) + e^{\int_{t_0}^t a(s) ds} \dot{c}(t) &= a(t) e^{\int_{t_0}^t a(s) ds} c(t) + b(t) && \Longleftrightarrow \\ e^{\int_{t_0}^t a(s) ds} \dot{c}(t) &= b(t). \end{aligned}$$

És a dir,

$$\dot{c}(t) = e^{-\int_{t_0}^t a(s) ds} b(t).$$

Per tant, fixat qualsevol $t_0 \in I$, tenim que totes les funcions c satisfent aquesta darrera igualtat són

$$c(t) = \lambda + \int_{t_0}^t e^{-\int_{t_0}^s a(u) du} b(s) ds.$$

La proposició queda provada substituint aquesta expressió de c en (2.5).

Respecte a la fórmula de $\varphi(t, t_0, x_0)$ només cal observar que s'obté de l'anterior prenent $\lambda = x_0$. Com

$$\int_{t_0}^{t_0} e^{-\int_{t_0}^s a(u) du} b(s) ds = 0.$$

$\varphi(t_0, t_0, x_0) = x_0$, el que implica que és solució del p.v.i.. □

³En el context d'equacions en derivades parcials, aquest mètode es coneix com principi de Duhamel.

2.1.4 Sistemes lineals homogenis

El primer resultat que enunciem el podem generalitzar adaptant-lo convenientment a sistemes d'e.d.o.'s no necessàriament lineals.

Proposició 2.7. *Considerem el sistema lineal homogeni*

$$\dot{x} = A(t)x.$$

Suposem que els coeficients de la matriu A són de classe C^k en $I \subset \mathbb{R}$, amb $k \geq 0$. Llavors, totes les solucions del sistema són de classe C^{k+1} en I .

Demostració. Ho provarem per inducció sobre k . Comencem per $k = 0$.

Per definició, una funció φ és solució del sistema si és derivable i $\dot{\varphi}(t) = A(t)\varphi(t)$. Tant, $\dot{\varphi}(t)$ és el producte de A , que és de classe C^0 , amb φ , que és derivable. En conseqüència, $\dot{\varphi}$ és contínua i, per tant, φ és de classe C^1 .

Suposem ara que A és de classe C^k i que φ és una solució de classe C^{k-1} del sistema. De la igualtat $\dot{\varphi}(t) = A(t)\varphi(t)$ tenim que $\dot{\varphi}(t)$ és de classe C^{k-1} , però això implica que φ és de classe C^k . \square

Ja hem vist a la Proposició 2.2 que la solució general d'un sistema lineal homogeni és un espai vectorial, sense dir-ne res sobre la dimensió. Per a establir la dimensió de l'espai de solucions ens caldrà establir un resultat sobre l'existència i unicitat de solucions de p.v.i. associats a sistemes lineals homogenis, en el següent teorema. Ara només en donarem la demostració en el cas de que el sistema sigui unidimensional. El cas general serà un corol·lari del Teorema 3.9 i, més concretament, la Proposició 3.12, al Capítol 3. Vegeu el Corol·lari 3.13.

Teorema 2.8. *Siguin $I \subset \mathbb{R}$, un interval obert, i $A \in C(I, \mathcal{M}_{n \times n}(\mathbb{R}))$ (és a dir, A és una matriu $n \times n$ amb coeficients reals o complexos continus en I). Llavors, per a qualsevol $(t_0, x_0) \in I \times \mathbb{R}^n$ (o $I \times \mathbb{C}^n$), el p.v.i.*

$$\begin{aligned} \dot{x} &= A(t)x, \\ x(t_0) &= x_0, \end{aligned} \tag{2.6}$$

admet una solució φ , definida a I . A més, si $\tilde{\varphi} : \tilde{I} \subset I \rightarrow \mathbb{R}^n$ n'és una altra, llavors $\tilde{\varphi}(t) = \varphi(t)$, per a tot $t \in \tilde{I}$. És a dir, el problema de valor inicial té una única solució, que, a més, està definida allà on els coeficients del sistema són continus.

El Teorema 2.8 assegura que l'aplicació

$$\begin{aligned} \varphi : I \times I \times \mathbb{R}^n &\longrightarrow \mathbb{R}^n \\ (t, t_0, x_0) &\longrightarrow \varphi(t, t_0, x_0) \end{aligned} \tag{2.7}$$

on $\varphi(t, t_0, x_0)$ és la solució del p.v.i. (2.6), està ben definida.

Definició 2.9. *L'aplicació φ a (2.7) s'anomena flux generat per l'e.d.o. (2.6).*

Més endavant veurem que el flux també estarà definit — amb algunes limitacions respecte el seu domini de definició — per a p.v.i. associats a e.d.o. generals, sota hipòtesis raonables.

La propietat del flux φ en el exercici següent només és vàlida per a sistemes lineals homogenis.

Exercici 2.2. Proveu que el flux $\varphi(t, t_0, x_0)$ definit a 2.9 és una aplicació lineal respecte a x_0 , és a dir, $\varphi(t, t_0, \lambda x + \mu y) = \lambda \varphi(t, t_0, x) + \mu \varphi(t, t_0, y)$, per a tot $x, y \in \mathbb{R}^n$, $\lambda, \mu \in \mathbb{R}$.

Teorema 2.10. Siguin $I \subset \mathbb{R}$ i $A \in C(I, \mathcal{M}_{n \times n}(\mathbb{R}))$ (és a dir, A és una matriu $n \times n$ amb coeficients reals o complexos continus en I). Llavors, la solució general de

$$\dot{x} = A(t)x$$

és un espai vectorial de dimensió n .

Demostració. Siguin e_i , $i = 1, \dots, n$, els vectors de la base canònica de \mathbb{R}^n . Fixem $t_0 \in I$. Per a cada $i = 1, \dots, n$, sigui $\varphi_i : I \rightarrow \mathbb{R}^n$ la solució del p.v.i.

$$\begin{aligned}\dot{x} &= A(t)x, \\ x(t_0) &= e_i,\end{aligned}$$

donada pel Teorema 2.8.

Veiem primer que les funcions $\{\varphi_i\}_{i=1, \dots, n}$ són linealment independents. En efecte, siguin $\lambda_1, \dots, \lambda_n \in \mathbb{R}$ tals que

$$\lambda_1 \varphi_1(t) + \dots + \lambda_n \varphi_n(t) = 0, \quad \forall t \in I.$$

En $t = t_0$, com $\varphi_i(t_0) = e_i$, la igualtat de sobre implica que

$$\lambda_1 e_1 + \dots + \lambda_n e_n = 0.$$

Ara bé, com els vectors $\{e_i\}_{i=1, \dots, n}$ són linealment independents, aquesta darrera igualtat implica que $\lambda_1 = \dots = \lambda_n = 0$. Per tant, la dimensió de la solució general del sistema és mes gran o igual que n .

Veiem ara que $\{\varphi_i\}_{i=1, \dots, n}$ generen totes les solucions del sistema. Siguí $\tilde{\varphi}$ una solució del sistema. Siguin $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ tals que

$$\lambda_1 e_1 + \dots + \lambda_n e_n = \tilde{\varphi}(t_0).$$

Afirmem que $\tilde{\varphi}(t) = \lambda_1 \varphi_1(t) + \dots + \lambda_n \varphi_n(t)$, per a tot $t \in I$. En efecte, tenim que la funció $\hat{\varphi}(t) = \tilde{\varphi}(t) - (\lambda_1 \varphi_1(t) + \dots + \lambda_n \varphi_n(t))$ és solució del sistema, perquè és una combinació lineal de solucions i $\hat{\varphi}(t_0) = 0$, el que implica que $\hat{\varphi}$ és solució del p.v.i.

$$\begin{aligned}\dot{x} &= A(t)x, \\ x(t_0) &= 0.\end{aligned}$$

Ara bé, la funció 0 n'és també solució. Pel Teorema 2.8, $\hat{\varphi}(t) = 0$, per a tot $t \in I$.

En resum, hem vist que les funcions $\{\varphi_i\}_{i=1, \dots, n}$ són base de la solució general del sistema. \square

Comentari 2.11. Observeu que els Teoremes 2.8 i 2.10 no ens proporcionen cap manera de trobar les solucions dels sistemes de la forma $\dot{x} = A(t)x$. En general, no n'hi ha cap. Veurem algunes tècniques per a trobar-les en casos particulars.

Definició 2.12. *Siguin $I \subset \mathbb{R}$ i $A \in C(I, \mathcal{M}_{n \times n}(\mathbb{R}))$ (és a dir, A és una matriu $n \times n$ amb coeficients reals o complexos continus en I). Anomenarem sistema fonamental de solucions a qualsevol base de la solució general de $\dot{x} = A(t)x$. El Teorema 2.10 assegura que un sistema fonamental de solucions consta de n funcions.*

Definició 2.13. *Siguin $I \subset \mathbb{R}$ i $A \in C(I, \mathcal{M}_{n \times n}(\mathbb{R}))$. Sigui $\{\varphi_i\}_{i=1, \dots, n}$ un sistema fonamental del sistema $\dot{x} = A(t)x$. Sigui $M(t)$ la matriu que té per columnes les funcions φ_i , $i = 1, \dots, n$. Direm que M és una matriu fonamental del sistema $\dot{x} = A(t)x$.*

Exercici 2.3. *Siguin $I \subset \mathbb{R}$ i $A \in C(I, \mathcal{M}_{n \times n}(\mathbb{R}))$. Proveu que, donats $C \in \mathcal{M}_{n \times n}(\mathbb{R})$ (o $C \in \mathcal{M}_{n \times n}(\mathbb{C})$) i $t_0 \in I$, existeix una única matriu $\Phi(t)$, $t \in I$, tal que*

$$\dot{\Phi}(t) = A(t)\Phi(t), \quad \Phi(t_0) = C. \quad (2.8)$$

Resolució. En efecte, siguin φ_i i c_i les columnes i -èssimes de les matrius Φ i C , respectivament. La igualtat (2.8) és equivalent a la col·lecció de p.v.i.

$$\dot{\varphi}_i(t) = A(t)\varphi_i(t), \quad \varphi_i(t_0) = c_i, \quad i = 1, \dots, n.$$

Ara bé, el Teorema 2.8 assegura que aquests p.v.i. tenen solució única, definida a I . Per tant, les columnes φ_i estan definides unívocament.

Les següents propietats de les matrius fonamentals són senzilles.

Proposició 2.14. *Siguin $I \subset \mathbb{R}$ i $A \in C(I, \mathcal{M}_{n \times n}(\mathbb{R}))$. Considerem el sistema $\dot{x} = A(t)x$.*

1. *Si $M(t)$ és una matriu fonamental de $\dot{x} = A(t)x$, llavors $\det M(t) \neq 0$, per a tot $t \in I$.*
2. *$M(t)$ és una matriu fonamental de $\dot{x} = A(t)x$ si i només si $\dot{M}(t) = A(t)M(t)$ i existeix $t_0 \in I$ tal que $\det M(t_0) \neq 0$.*
3. *Sigui $M(t)$, una matriu fonamental de $\dot{x} = A(t)x$. Llavors $N(t)$ és matriu fonamental de $\dot{x} = A(t)x$ si i només si existeix una matriu C , constant, amb $\det C \neq 0$, tal que $N(t) = M(t)C$, per a tot $t \in I$.*
4. *Sigui $M(t)$, una matriu fonamental de $\dot{x} = A(t)x$. La solució general de $\dot{x} = A(t)x$ és $\{M(t)v \mid v \in \mathbb{R}^n\}$. Equivalentment, la solució del p.v.i. $\dot{x} = A(t)x$, $x(t_0) = x_0$ és*

$$\varphi(t, t_0, x_0) = M(t)M(t_0)^{-1}x_0.$$

Demostració. Comencem provant 1. Suposem que existeix $t_0 \in I$ tal que $\det M(t_0) = 0$. Com la matriu $M(t_0)$ és singular, existeix $\lambda = (\lambda_1, \dots, \lambda_n)^T \in \mathbb{R}^n$, $\lambda \neq 0$, tal que $M(t_0)\lambda = 0$. Sigui $\varphi(t) = M(t)\lambda$. Com les columnes de M són solució de $\dot{x} = A(t)x$, φ és també solució. Ara bé, $\varphi(t_0) = 0$ i 0 és l'única solució del p.v.i. $\dot{x} = A(t)x$, $x(t_0) = 0$. Per tant, $\varphi(t) = M(t)\lambda = 0$, per a tot $t \in I$. Com $\lambda \neq 0$, això implica que les columnes de $M(t)$ no són linealment independents i, en conseqüència, no poden ser una base de l'espai de solucions.

Ara provem 2. La implicació cap a la dreta és una conseqüència immediata de 1. La implicació cap a l'esquerra és una modificació de la demostració del Teorema 2.10 i es deixa com a exercici.

Ara provem 3. La implicació cap a l'esquerra és una comprovació immediata. En efecte, si $M(t)$ és una matriu fonamental i $\det C \neq 0$, es compleix que, per una banda $\det M(t)C = \det M(t) \det C \neq 0$ i

$$\frac{d}{dt}M(t)C = \dot{M}(t)C = A(t)M(t)C.$$

Llavors 2 implica que $M(t)C$ és matriu fonamental. La implicació cap a la dreta es dedueix de l'exercici 2.3 i del fet que $N(t)$ i $M(t)M(t_0)^{-1}N(t_0)$ són solució del mateix p.v.i. i, per tant, han de coincidir sempre.

Finalment 4 es segueix del fet que, si $\varphi(t)$ és una solució del sistema, $\varphi(t)$ i $M(t)M(t_0)\varphi(t_0)$ són solució del mateix p.v.i. i, pel Teorema 2.8, han de coincidir. \square

Exercici 2.4. *Siguin $I \subset \mathbb{R}$ i $A \in C(I, \mathcal{M}_{n \times n}(\mathbb{R}))$. Considerem el sistema $\dot{x} = A(t)x$. Sigui $\varphi(t, t_0, x_0)$, la solució del p.v.i. $\dot{x} = A(t)x$, $x(t_0) = x_0$. Proveu que, per a qualsevol $t, t_0, s \in I$*

$$\varphi(t, t_0, x_0) = \varphi(t, s, \varphi(s, t_0, x_0)).$$

Deduïu que, fixats t, t_0 , l'aplicació $x_0 \mapsto \varphi(t, t_0, x_0)$ és un difeomorfisme. Recordeu que, per l'Exercici 2.2, aquesta aplicació és lineal. Proveu que, fixats t, t_0 ,

$$\varphi(t_0, t, \varphi(t, t_0, x_0)) = x_0.$$

Exemple 2.2. *Si bé és cert que en general no és possible resoldre — mitjançant quadratures — els sistemes lineals, hi ha alguns casos particulars en els que sí es poden trobar les solucions. El més important, que veurem més endavant, és el cas en que la matriu A que defineix el sistema sigui constant. Un altre, que considerem aquí, el trobem quan la matriu $A(t)$ és triangular.*

Com a exemple, considerem el sistema

$$\begin{cases} \dot{x} = \frac{1}{t}x + y, \\ \dot{y} = \frac{1}{t}y. \end{cases} \quad (2.9)$$

És un sistema lineal homogeni amb matriu

$$A(t) = \begin{pmatrix} \frac{1}{t} & 1 \\ 0 & \frac{1}{t} \end{pmatrix}.$$

Aquesta mena de sistemes es poden resoldre perquè els sistemes lineals unidimensionals es poden resoldre, fent servir el mètode exposat en les Proposicions 2.5 i 2.6. Així, la segona equació de (2.9), només depèn de la variable y . Les seves solucions, segons la Proposició 2.5, són

$$y(t, \lambda) = \lambda t, \quad \lambda \in \mathbb{R}.$$

Si ara substituïm l'expressió trobada per a $y(t, \lambda)$ a la primera equació de (2.9), obtenim l'e.d.o. lineal

$$\dot{x} = \frac{1}{t}x + \lambda t.$$

Enlloc d'aplicar directament la fórmula de la Proposició 2.6, a mode il·lustratiu fem servir el mètode de variació de les constants en la que es basa. Una solució no nul·la de $\dot{x} = \frac{1}{t}x$ és $x(t) = t$ (observeu que s'anul·la precisament on els coeficients de l'e.d.o. deixen de ser continus). Busquem la solució de l'e.d.o. no homogènia escrivint-la com $x(t) = c(t)t$. La funció c ha de complir

$$\dot{c}(t)t = \lambda t \iff c(t) = \mu + \lambda t, \quad \mu \in \mathbb{R},$$

és a dir, les solucions de $\dot{x} = \frac{1}{t}x + \lambda t$ són

$$x(t, \lambda, \mu) = \mu t + \lambda t^2, \quad \mu \in \mathbb{R}.$$

Les solucions del sistema (2.9) són

$$\begin{aligned} x(t, \lambda, \mu) &= \mu t + \lambda t^2, \\ y(t, \lambda) &= \lambda t, \end{aligned} \quad \lambda, \mu \in \mathbb{R}. \quad (2.10)$$

Per a obtenir-ne un sistema fonamental de solucions, només en necessitem dues linealment independents. Per exemple,

$$\varphi_1(t) = \begin{pmatrix} t \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \varphi_2(t) = \begin{pmatrix} t^2 \\ t \end{pmatrix},$$

que hem obtingut fent $\lambda = 0, \mu = 1$, per a φ_1 , i $\lambda = 1, \mu = 0$, per a φ_2 . Una matriu fonamental del sistema és, doncs,

$$M(t) = \begin{pmatrix} t & t^2 \\ 0 & t \end{pmatrix}.$$

Observeu que $\det M(t) \neq 0$ excepte si $t = 0$, que és on els coeficients del sistema deixen de ser continus.

Finalment, donat $t_0 \neq 0$, podem trobar la solució del sistema (2.9) que en $t = t_0$ val $(x_0, y_0)^\top$ trobant λ i μ en (2.10), imposant que $x(t_0, \lambda, \mu) = x_0$ i $y(t_0, \lambda) = y_0$ o bé mitjançant la fórmula

$$\begin{aligned} \varphi(t, t_0, x_0, y_0) &= M(t)M(t_0)^{-1} \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} t & t^2 \\ 0 & t \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t_0^{-1} & -t_0 \\ 0 & t_0^{-1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} t_0^{-1}t & -t_0t + t_0^{-1}t^2 \\ 0 & t_0^{-1}t \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

El punt 1 de la Proposició 2.14 és també un corol·lari del resultat següent.

Teorema 2.15. *Sigui $\Phi(t)$, una matriu tal que $\dot{\Phi}(t) = A(t)\Phi(t)$, on $A(t) \in \mathcal{M}_{n \times n}(\mathbb{R})$. Llavors,*

$$\frac{d}{dt} \det \Phi(t) = \text{traza } A(t) \det \Phi(t).$$

Demostració. Siguin $\{\varphi_i\}_{i=1, \dots, n}$, les columnes de la matriu Φ . La hipòtesi és equivalent a $\dot{\varphi}_i = A\varphi_i$, $i = 1, \dots, n$. Llavors, per la propietat de la derivada del

producte,

$$\begin{aligned}\frac{d}{dt} \det \Phi(t) &= \frac{d}{dt} \det(\varphi_1, \dots, \varphi_n) \\ &= \det(\dot{\varphi}_1, \dots, \varphi_n) + \dots + \det(\varphi_1, \dots, \dot{\varphi}_n) \\ &= \det(A\varphi_1, \dots, \varphi_n) + \dots + \det(\varphi_1, \dots, A\varphi_n)\end{aligned}$$

Tenint en compte aquesta igualtat, definim l'aplicació $f : (\mathbb{R}^n)^n \rightarrow \mathbb{R}$ definida per

$$f(v_1, \dots, v_n) = \det(Av_1, \dots, v_n) + \dots + \det(v_1, \dots, Av_n).$$

És un exercici comprovar que, per a tot $v_1, \tilde{v}_1, v_2, \dots, v_n \in \mathbb{R}^n$ i $\lambda \in \mathbb{R}$,

1. $f(v_1, \dots, v_i, \dots, v_j, \dots, v_n) = -f(v_1, \dots, v_j, \dots, v_i, \dots, v_n)$,
2. $f(\lambda v_1, \dots, v_n) = \dots = f(v_1, \dots, \lambda v_n) = \lambda f(v_1, \dots, v_n)$ i
3. $f(v_1 + \tilde{v}_1, \dots, v_n) = f(v_1, \dots, v_n) + f(\tilde{v}_1, \dots, v_n)$.

És a dir, f és una aplicació n -lineal alternada a \mathbb{R}^n . Però l'espai d'aplicacions n -lineals alternades a \mathbb{R}^n és 1-dimensional. Per tant, existeix una constant a tal que

$$f(v_1, \dots, v_n) = a \det(v_1, \dots, v_n).$$

Per a determinar la constant a , n'hi ha prou en considerar $v_i = e_i$, els vectors de la base canònica, perquè llavors

$$\det(e_1, \dots, Ae_i, \dots, e_n) = \text{element } i\text{-èssim de la diagonal de } A,$$

el que implica que $a = \text{traça } A$. □

Corol·lari 2.16 (Fórmula de Liouville). *Siguin $I \subset \mathbb{R}$, un interval obert, $A \in C(I, \mathcal{M}_{n \times n}(\mathbb{R}))$ i $\Phi(t)$, una matriu tal que $\dot{\Phi}(t) = A(t)\Phi(t)$. Llavors, donat $t_0 \in I$, per a tot $t \in I$,*

$$\det \Phi(t) = \det \Phi(t_0) e^{\int_{t_0}^t \text{traça } A(s) ds}.$$

En particular es compleix que $\det \Phi(t) \neq 0$, per a tot $t \in I$ si i només si existeix $t_0 \in I$ tal que $\det \Phi(t_0) \neq 0$.

Demostració. Pel Teorema de Liouville, $\det \Phi(t)$ satisfà $\dot{x} = \text{traça } A(t)x$. La única solució d'aquesta equació que compleix $x(t_0) = \det \Phi(t_0)$ és

$$\det \Phi(t_0) e^{\int_{t_0}^t \text{traça } A(s) ds}.$$

□

Exercici 2.5. *Considereu el sistema lineal homogeni*

$$\begin{cases} \dot{x} = tx + e^t y, \\ \dot{y} = \cos tx - ty. \end{cases} \quad (2.11)$$

Sigui $M(t)$ una matriu fonamental del sistema. Sigui $\varphi(t, t_0, x_0, y_0)$ la solució del sistema que val (x_0, y_0) en $t = t_0$, és a dir

$$\varphi(t, t_0, x_0, y_0) = M(t)M(t_0)^{-1} \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \end{pmatrix}.$$

Proveu que, per a qualsevol regió mesurable $D \in \mathbb{R}^2$ i tot parell $t, t_0 \in I$,

$$\text{àrea}(D) = \text{àrea}(\varphi(t, t_0, D)).$$

Indicació: tingueu en compte que

$$\text{àrea}(D) = \int_D dx dy.$$

Feu servir el teorema del canvi de variables i la fórmula de Liouville.

2.1.5 Sistemes lineals no homogenis

Considerem el sistema lineal no homogeni

$$\dot{x} = A(t)x + b(t).$$

Veurem en aquesta secció que el mètode de variació de les constants introduït a la Proposició 2.6 per a e.d.o.'s lineals unidimensionals també resulta vàlid en dimensió superior. Com en el cas unidimensional, per a poder aplicar-lo, cal conèixer les solucions del sistema homogeni associat. Com ja hem dit, sovint no és possible resoldre el sistema homogeni.

Proposició 2.17. *Siguin $I \subset \mathbb{R}$, un interval obert, $A \in C(I, \mathcal{M}_{n \times n}(\mathbb{R}))$, $b \in C(I, \mathbb{R}^n)$ i $t_0 \in I$. Siguin $M(t)$, una matriu fonamental del sistema lineal homogeni $\dot{x} = A(t)x$. Llavors, la solució general del sistema $\dot{x} = A(t)x + b(t)$ és*

$$\left\{ M(t)v + M(t) \int_{t_0}^t M(s)^{-1} b(s) ds \mid v \in \mathbb{R}^n \right\}.$$

Equivalentment, per a qualsevol $(t_0, x_0) \in I \times \mathbb{R}^n$, l'única solució del p.v.i.

$$\dot{x} = A(t)x + b(t), \quad x(t_0) = x_0$$

és

$$\begin{aligned} \varphi(t, t_0, x_0) &= M(t) \left(M(t_0)^{-1} x_0 + \int_{t_0}^t M(s)^{-1} b(s) ds \right) \\ &= M(t) M(t_0)^{-1} x_0 + M(t) \int_{t_0}^t M(s)^{-1} b(s) ds. \end{aligned}$$

Demostració. És anàloga a la de la Proposició 2.6 i es deixa com exercici. \square

2.2 Sistemes lineals amb coeficients constants

2.2.1 Definicions. La matriu exponencial

En aquesta secció resoldrem explícitament els sistemes de e.d.o.'s amb coeficients constants. També descriurem qualitativament les seves solucions.

Definició 2.18. *Direm que un sistema lineal de e.d.o.'s és de coeficients constants si és de la forma*

$$\dot{x} = Ax + b(t),$$

on $A \in \mathcal{M}_{n \times n}(\mathbb{R})$ (o $\mathcal{M}_{n \times n}(\mathbb{C})$) i $b \in C(I, \mathbb{R}^n)$, on $I \subset \mathbb{R}$ és un interval obert.

Tenint en compte la Proposició 2.17, podem resoldre el sistema amb coeficients constants $\dot{x} = Ax + b(t)$ si i només si podem obtenir una matriu fonamental del sistema homogeni associat, $\dot{x} = Ax$. I aquesta la trobarem fent servir el mètode indicat en l'Exercici 2.1. Allà vam explicar perquè en general no permet calcular la matriu fonamental. Veurem aquí que, en el cas de sistemes amb coeficients constants, sí que ho fa.

Definició 2.19. *Sigui $A \in \mathcal{M}_{n \times n}(\mathbb{R})$ (o $\mathcal{M}_{n \times n}(\mathbb{C})$). Definim la seva exponencial, que denotarem e^A , com*

$$e^A = \sum_{j \geq 0} \frac{1}{j!} A^j.$$

Sigui $\|\cdot\|$ és una norma a \mathbb{R}^n (totes hi són equivalents). Denotarem amb el mateix símbol la norma matricial associada, $\|A\| = \sup_{\|x\| \neq 0} \|Ax\| \|x\|^{-1}$. Com $\|A^j\| \leq \|A\|^j$, tenim que

$$\|e^A\| \leq \sum_{j \geq 0} \frac{1}{j!} \|A^j\| \leq \sum_{j \geq 0} \frac{1}{j!} \|A\|^j \leq e^{\|A\|} < \infty.$$

Per tant, l'exponencial d'una matriu A està sempre ben definida.

Lema 2.20. *Siguin $A, B \in \mathcal{M}_{n \times n}(\mathbb{R})$ (o $\mathcal{M}_{n \times n}(\mathbb{C})$). Si $AB = BA$, llavors*

$$e^{A+B} = e^A e^B.$$

Demostració. És una comprovació simple. Per una banda,

$$\begin{aligned} e^A e^B &= \sum_{i \geq 0} \frac{1}{i!} A^i \sum_{k \geq 0} \frac{1}{k!} B^k = \sum_{i \geq 0} \sum_{k \geq 0} \frac{1}{i!} \frac{1}{k!} A^i B^k \\ &= \sum_{j \geq 0} \sum_{i+k=j} \frac{1}{i!} \frac{1}{k!} A^i B^k = \sum_{j \geq 0} \sum_{k=0}^j \frac{1}{(j-k)!} \frac{1}{k!} A^{j-k} B^k \\ &= \sum_{j \geq 0} \frac{1}{j!} \sum_{k=0}^j \frac{j!}{(j-k)!k!} A^{j-k} B^k = \sum_{j \geq 0} \frac{1}{j!} \sum_{k=0}^j \binom{j}{k} A^{j-k} B^k. \end{aligned}$$

Per l'altra,

$$e^{A+B} = \sum_{j \geq 0} \frac{1}{j!} (A+B)^j.$$

Ara bé, com $AB = BA$, es compleix que

$$(A+B)^j = \sum_{k=0}^j \binom{j}{k} A^{j-k} B^k.$$

En efecte. Provem l'afirmació per inducció. Si $j = 1$, ens queda $A+B = A+B$,

que és cert. Suposem l'afirmació certa per a $j - 1$. Llavors, com $BA = AB$,

$$\begin{aligned}
 (A + B)^j &= (A + B)^{j-1}(A + B) = \sum_{k=0}^{j-1} \binom{j-1}{k} A^{j-1-k} B^k (A + B) \\
 &= \sum_{k=0}^{j-1} \binom{j-1}{k} A^{j-1-k} B^k A + \sum_{k=0}^{j-1} \binom{j-1}{k} A^{j-1-k} B^{k+1} \\
 &= \sum_{k=0}^{j-1} \binom{j-1}{k} A^{j-k} B^k + \sum_{k=0}^{j-1} \binom{j-1}{k} A^{j-1-k} B^{k+1} \\
 &= \sum_{k=0}^j \binom{j}{k} A^{j-k} B^k.
 \end{aligned}$$

□

Lema 2.21. *Sigui $A \in \mathcal{M}_{n \times n}(\mathbb{R})$ (o $\mathcal{M}_{n \times n}(\mathbb{C})$). Llavors*

$$\frac{d}{dt} e^{tA} = A e^{tA} = e^{tA} A.$$

Demostració. En efecte, com les matrius tA i sA commuten, pel Lemma 2.20,

$$\begin{aligned}
 \frac{d}{dt} e^{tA} &= \lim_{s \rightarrow 0} \frac{e^{(t+s)A} - e^{tA}}{s} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{e^{tA+sA} - e^{tA}}{s} \\
 &= \lim_{s \rightarrow 0} \frac{e^{sA} e^{tA} - e^{tA}}{s} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{e^{sA} - \text{Id}}{s} e^{tA} \\
 &= \lim_{s \rightarrow 0} \frac{1}{s} \sum_{j \geq 1} \frac{1}{j!} s^j A^j e^{tA} = \lim_{s \rightarrow 0} \sum_{j \geq 1} \frac{1}{j!} s^{j-1} A^j e^{tA} \\
 &= A e^{tA}.
 \end{aligned}$$

La segona igualtat és certa perquè $e^{(t+s)A} = e^{tA} e^{sA} = e^{sA} e^{tA}$.

□

Proposició 2.22. *Sigui $\Phi(t)$ la matriu fonamental del sistema homogeni amb coeficients constants $\dot{x} = Ax$ tal que $\Phi(0) = \text{Id}$ (per l'Exercici 2.3, Φ existeix i és única). Llavors,*

1. $\Phi(t) = e^{tA}$,
2. $e^{(t+s)A} = e^{tA} e^{sA}$, per a qualsevol $t, s \in \mathbb{R}$,
3. $e^{-tA} = (e^{tA})^{-1}$ i
4. si $M(t)$ és una matriu fonamental qualsevol de $\dot{x} = Ax$, llavors $e^{tA} = M(t)M(0)^{-1}$.

Demostració. Per a provar 1, observem que

$$\frac{d}{dt} e^{tA} = A e^{tA} = e^{tA} A.$$

En efecte, com les matrius tA i sA commuten, pel Lemma 2.20,

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}e^{tA} &= \lim_{s \rightarrow 0} \frac{e^{(t+s)A} - e^{tA}}{s} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{e^{tA+sA} - e^{tA}}{s} \\ &= \lim_{s \rightarrow 0} \frac{e^{sA}e^{tA} - e^{tA}}{s} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{e^{sA} - \text{Id}}{s} e^{tA} \\ &= \lim_{s \rightarrow 0} \frac{1}{s} \sum_{j \geq 1} \frac{1}{j!} s^j A^j e^{tA} = \lim_{s \rightarrow 0} \sum_{j \geq 1} \frac{1}{j!} s^{j-1} A^j e^{tA} \\ &= A e^{tA}. \end{aligned}$$

A més, $e^{0A} = \text{Id} = \Phi(0)$. Com $\Phi(t)$ i e^{tA} satisfan el mateix p.v.i., coincideixen.

Segui $s \in \mathbb{R}$. Definim $\Phi_1(t) = \Phi(t+s)$ i $\Phi_2(t) = \Phi(t)\Phi(s)$. Com que $\Phi(0) = \text{Id}$, tenim que $\Phi_1(0) = \Phi_2(0) = \Phi(s)$. A més, com $\dot{\Phi}(t) = A\Phi(t)$,

$$\begin{aligned} \dot{\Phi}_1(t) &= \dot{\Phi}(t+s) = A\Phi(t+s) = A\Phi_1(t) \\ \dot{\Phi}_2(t) &= \dot{\Phi}(t)\Phi(s) = A\Phi(t)\Phi(s) = A\Phi_2(t). \end{aligned}$$

És a dir, Φ_1 i Φ_2 són ambdues solució del p.v.i. matricial $\dot{M} = AM$, $M(0) = \Phi(s)$. Per tant, han de coincidir per a tot t . Això prova 2. Una prova alternativa d'aquest fet la dóna el Lemma 2.20.

3 és conseqüència de 2. En efecte, si a 2 prenem $s = -t$, ens queda

$$\text{Id} = \Phi(0) = \Phi(t)\Phi(-t) = \Phi(-t)\Phi(t) \implies \Phi(t)^{-1} = \Phi(-t).$$

Finalment, $M(t)M(0)^{-1}$ és una matriu fonamental i, en $t = 0$, satisfà $M(0)M(0)^{-1} = \text{Id}$. Per tant, $\Phi(t) = e^{tA} = M(t)M(0)^{-1}$. \square

Corol·lari 2.23. Si A és una matriu $n \times n$ amb coeficients constants, el flux $\varphi(t, t_0, x_0)$ de $\dot{x} = Ax$ satisfà

$$\varphi(t, t_0, x_0) = \varphi(t - t_0, 0, x_0).$$

Demostració. En efecte, per l'apartat 4 de la Proposició 2.14,

$$\varphi(t, t_0, x_0) = e^{tA}(e^{t_0A})^{-1}x_0 = e^{tA}e^{-t_0A}x_0 = e^{(t-t_0)A}x_0 = \varphi(t - t_0, 0, x_0).$$

\square

Exercici 2.6. Proveu el Corol·lari 2.23 fent servir només el Teorema 2.8.

Exemple 2.3. Segui $A = \text{diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_n)$, és a dir,

$$A = \begin{pmatrix} \lambda_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \lambda_n \end{pmatrix}.$$

Llavors,

$$e^{tA} = \text{diag}(e^{t\lambda_1}, \dots, e^{t\lambda_n}) = \begin{pmatrix} e^{t\lambda_1} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & e^{t\lambda_n} \end{pmatrix}. \quad (2.12)$$

Ho veurem de dues maneres diferents.

1. És immediat comprovar que

$$A^k = \begin{pmatrix} \lambda_1^k & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \lambda_n^k \end{pmatrix}.$$

Llavors,

$$\begin{aligned} e^{tA} &= \sum_{k \geq 0} \frac{1}{k!} t^k A^k = \sum_{k \geq 0} \frac{1}{k!} t^k \begin{pmatrix} \lambda_1^k & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \lambda_n^k \end{pmatrix} \\ &= \sum_{k \geq 0} \frac{1}{k!} t^k A^k = \sum_{k \geq 0} \frac{1}{k!} \begin{pmatrix} t^k \lambda_1^k & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & t^k \lambda_n^k \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} \sum_{k \geq 0} \frac{1}{k!} t^k \lambda_1^k & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \sum_{k \geq 0} \frac{1}{k!} t^k \lambda_n^k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e^{t\lambda_1} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & e^{t\lambda_n} \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

2. El sistema associat a la matriu A , $\dot{x} = Ax$, és

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \lambda_1 x_1, \\ \vdots \\ \dot{x}_n = \lambda_n x_n. \end{cases}$$

Com cada equació és una e.d.o. lineal unidimensional, les podem resoldre. Per la Proposició 2.5, la solució general de l'equació j és

$$\{x_j(t) = c_j e^{t\lambda_j} \mid c_j \in \mathbb{R}\}. \quad (2.13)$$

Troblem la matriu fonamental, Φ , de $\dot{x} = Ax$ que satisfà $\Phi(0) = \text{Id}$. La columna i -èssima de Φ , φ_i , ha de satisfer $\dot{\varphi}_i = A\varphi_i$, $\varphi_i(0) = e_i$, on e_i és l' i -èssim vector de la base canònica. Tenint en compte (2.13), la component j -èssima de φ_i , φ_{ij} és $\varphi_{ij}(t) = c_{ij} e^{t\lambda_j}$. La condició $\varphi_i(0) = e_i$ es tradueix en

$$\begin{cases} \varphi_{ij}(0) = c_{ij} = 0, & \text{si } i \neq j, \\ \varphi_{ii}(0) = c_{ii} = 1, \end{cases}$$

és a dir, $\varphi_i(t) = e^{t\lambda_i} e_i$. Per tant,

$$\Phi(t) = \begin{pmatrix} e^{t\lambda_1} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & e^{t\lambda_n} \end{pmatrix}.$$

Com, per l'apartat 1 de la Proposició 2.22, $\Phi(t) = e^{tA}$, hem provat (2.12).

Exercici 2.7. Sigui $v \in \ker(A - \lambda \text{Id})^k$. Llavors

$$e^{tA} v = e^{\lambda t} \sum_{j=0}^{k-1} \frac{t^j}{j!} (A - \lambda \text{Id})^j v.$$

Indicació: feu servir que les matrius λId i $A - \lambda \text{Id}$ commuten i l'Exemple 2.3.

La següent proposició serà molt útil per a calcular e^{tA} .

Proposició 2.24. *Considerem el sistema lineal homogeni amb coeficients constants $\dot{x} = Ax$. Sigui $C \in \mathcal{M}_{n \times n}(\mathbb{R})$ (o $\mathcal{M}_{n \times n}(\mathbb{C})$) tal que $\det C \neq 0$. Definim $C\tilde{x} = x$. Llavors, \tilde{x} és solució de*

$$\dot{\tilde{x}} = C^{-1}AC\tilde{x}.$$

Conseqüentment,

$$e^{tC^{-1}AC} = C^{-1}e^{tA}C.$$

Demostració. En efecte, com $\dot{C} = 0$ i $\tilde{x} = C^{-1}x$,

$$\dot{\tilde{x}} = C^{-1}\dot{x} = C^{-1}Ax = C^{-1}AC\tilde{x}.$$

Respecte a les matrius exponencials, observem que ambdues són Id en $t = 0$ i són solució de la mateixa e.d.o.. En efecte, per una banda,

$$\frac{d}{dt}[C^{-1}e^{tA}C] = C^{-1}\frac{d}{dt}e^{tA}C = C^{-1}Ae^{tA}C = C^{-1}AC[C^{-1}e^{tA}C].$$

Per l'altre, 1 de la Proposició 2.22 ens assegura que $e^{tC^{-1}AC}$ satisfà la mateixa e.d.o. \square

Exercici 2.8. *Proveu que si \tilde{N} és una matriu fonamental qualsevol de $\dot{\tilde{x}} = C^{-1}AC\tilde{x}$, on $C \in \mathcal{M}_{n \times n}(\mathbb{R})$, $N = C\tilde{N}$ és matriu fonamental de $\dot{x} = Ax$.*

2.2.2 Càlcul de la matriu exponencial

En vista de la Proposició 2.24, per a resoldre el sistema $\dot{x} = Ax$, considerarem un canvi lineal de variables, $C\tilde{x} = x$, de manera que el sistema transformat, $\dot{\tilde{x}} = C^{-1}AC\tilde{x}$ tingui una forma tal que en podem calcular $e^{tC^{-1}AC}$. Llavors,

$$e^{tA} = Ce^{tC^{-1}AC}C^{-1}.$$

La forma adient per a calcular $e^{tC^{-1}AC}$ és la *forma canònica de Jordan* de la matriu A. Resumim les propietats de la forma canònica de Jordan en la proposició següent. Podeu trobar-ne la prova i indicacions de com calcular-la [aquí](#).

Proposició 2.25 (Forma canònica de Jordan). *Sigui $A \in \mathcal{M}_{n \times n}(\mathbb{R})$ o $\mathcal{M}_{n \times n}(\mathbb{C})$. Existeix una matriu C tal que $J = C^{-1}AC$ té la forma*

$$J = \begin{pmatrix} J_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & J_k \end{pmatrix}, \quad (2.14)$$

on cada bloc J_j és una matriu $n_j \times n_j$, $n_j \geq 1$, $n_1 + \dots + n_k = n$, de la forma

$$J_j = \begin{pmatrix} \lambda_j & 1 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_j & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \lambda_j & 1 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \lambda_j \end{pmatrix}. \quad (2.15)$$

El nombres λ_j són els valors propis d'A. Si tots els valors propis d'A són reals, C és real.

El següent lemma es deixa com a exercici.

Lema 2.26. *Sigui J la matriu diagonal per blocs*

$$J = \begin{pmatrix} J_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & J_k \end{pmatrix},$$

(els blocs no tenen pas perquè tenir la mateixa mida). Llavors, per a tot $j \geq 0$,

$$J^j = \begin{pmatrix} J_1^j & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & J_k^j \end{pmatrix},$$

Corol·lari 2.27. *Sigui J la matriu de la forma*

$$J = \begin{pmatrix} J_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & J_k \end{pmatrix}.$$

Llavors

$$e^{tJ} = \begin{pmatrix} e^{tJ_1} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & e^{tJ_k} \end{pmatrix}.$$

Demostració. Fent servir el Lemma 2.26,

$$\begin{aligned} e^{tJ} &= \sum_{j \geq 0} \frac{1}{j!} t^j J^j = \sum_{j \geq 0} \frac{1}{j!} t^j \begin{pmatrix} J_1^j & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & J_k^j \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} \sum_{j \geq 0} \frac{1}{j!} t^j J_1^j & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \sum_{j \geq 0} \frac{1}{j!} t^j J_k^j \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e^{tJ_1} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & e^{tJ_k} \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

□

Només ens falta calcular la matriu exponencial d'un bloc de Jordan.

Proposició 2.28. *Considerem la matriu $k \times k$*

$$J = \begin{pmatrix} \lambda & 1 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & \lambda & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \lambda & 1 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \lambda \end{pmatrix},$$

on $\lambda \in \mathbb{R}$ (o \mathbb{C}). Llavors,

$$e^{tJ} = \begin{pmatrix} e^{t\lambda} & te^{\lambda t} & \dots & \frac{1}{(k-1)!} t^{k-1} e^{t\lambda} \\ 0 & e^{t\lambda} & \dots & \frac{1}{(k-2)!} t^{k-2} e^{t\lambda} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & e^{t\lambda} \end{pmatrix}$$

Demostració. Observem que $J = \lambda \text{Id} + N$, on

$$N = \begin{pmatrix} 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Es comprova immediatament que N^j és la matriu que té 1's en la diagonal superior $(j+1)$ -èssima i 0's a la resta de components. En particular,

$$N^{k-1} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad N^k = 0.$$

A més, λId i N commuten (perquè λId commuta amb totes les matrius). Llavors, pel Lema 2.20, l'Exercici 2.3 i fent servir que $N^j = 0$, si $j \geq k$,

$$e^{tA} = e^{t\lambda \text{Id} + tN} = e^{t\lambda \text{Id}} e^{tN} = e^{t\lambda} \sum_{j \geq 0} \frac{1}{j!} t^j N^j = e^{t\lambda} \sum_{j=0}^{k-1} \frac{1}{j!} t^j N^j.$$

□

Exercici 2.9. Supposeu que λ és valor propi d' $A \in \mathcal{M}_{n \times n}(\mathbb{R})$, amb vector propi v . Proveu que $e^{t\lambda}v$ és solució de $\dot{x} = Ax$.

Exercici 2.10. Supposeu que $\lambda = a + ib$, amb $b \neq 0$, és valor propi d' $A \in \mathcal{M}_{n \times n}(\mathbb{R})$, amb vector propi (complex) v . Proveu que $e^{t\lambda}v + e^{t\bar{\lambda}}\bar{v}$ i $i(e^{t\lambda}v - e^{t\bar{\lambda}}\bar{v})$ són dues solucions reals linealment independents de $\dot{x} = Ax$.

Aplicació: trobeu e^{tA} , on

$$A = \begin{pmatrix} 1 & -2 \\ 2 & 1 \end{pmatrix}.$$

Si $A \in \mathcal{M}_{n \times n}(\mathbb{R})$ té un valor propi complex $\lambda = a + ib$, $b \neq 0$, existeix un canvi de base real, C , tal que $C^{-1}AC$ està una forma similar a la de Jordan. Més concretament,

$$C^{-1}AC = \begin{pmatrix} J_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & J_k \end{pmatrix},$$

on

$$J_j = \begin{pmatrix} \lambda_j & 1 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_j & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \lambda_j & 1 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \lambda_j \end{pmatrix},$$

si λ_j és un valor propi real d' A i

$$J_j = \begin{pmatrix} \Lambda_j & \text{Id}_{2 \times 2} & \dots & 0 & 0 \\ 0 & \Lambda_j & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \Lambda_j & \text{Id}_{2 \times 2} \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \Lambda_j \end{pmatrix}, \quad \Lambda_j = \begin{pmatrix} a_j & -b_j \\ b_j & a_j \end{pmatrix}, \quad (2.16)$$

si $\lambda_j = a_j + ib_j$, $b_j \neq 0$, és un valor propi complex d' A .

Llavors, tenint en compte el Corol·lari 2.27, per a calcular e^{tA} només ens falta calcular e^{tJ_j} , on J_j és una matriu de la forma (2.16). Per a fer-ho, es procedeix com en el cas real. Sigui $2k$ la mida de la matriu J_j . Considerem les matrius

$$a_j \text{Id}_{2k \times 2k}, \quad b_j \tilde{R}, \quad \tilde{N}$$

on \tilde{R} i \tilde{N} són les matrius $2k \times 2k$

$$\tilde{R} = \begin{pmatrix} R & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & R \end{pmatrix}, \quad R = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix},$$

i

$$\tilde{N} = \begin{pmatrix} 0 & \text{Id}_{2 \times 2} & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \text{Id}_{2 \times 2} \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

Es compleix que

$$J_j = a_j \text{Id}_{2k \times 2k} + b_j \tilde{R} + \tilde{N}.$$

És fàcil veure que les matrius $a_j \text{Id}_{2k \times 2k} + b_j \tilde{R}$ i \tilde{N} commuten⁴, i que, a la seva vegada, les matrius $a_j \text{Id}_{2k \times 2k}$ i $b_j \tilde{R}$ (perquè $\text{Id}_{2k \times 2k}$ commuta amb totes les matrius), el que implica que

$$\begin{aligned} e^{tJ_j} &= e^{t(a_j \text{Id}_{2k \times 2k} + b_j \tilde{R} + \tilde{N})} = e^{t(a_j \text{Id}_{2k \times 2k} + b_j \tilde{R})} e^{t\tilde{N}} \\ &= e^{ta_j \text{Id}_{2k \times 2k}} e^{tb_j \tilde{R}} e^{t\tilde{N}} = e^{ta_j} e^{tb_j \tilde{R}} e^{t\tilde{N}}. \end{aligned}$$

Exercici 2.11. *Comproveu que, com a la demostració de la Proposició 2.28,*

$$e^{t\tilde{N}} = \begin{pmatrix} \text{Id}_{2 \times 2} & t\text{Id}_{2 \times 2} & \dots & \frac{1}{(k-1)!} t^{k-1} \text{Id}_{2 \times 2} \\ 0 & \text{Id}_{2 \times 2} & \dots & \frac{1}{(k-2)!} t^{k-2} \text{Id}_{2 \times 2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \text{Id}_{2 \times 2} \end{pmatrix}$$

⁴La matriu $a_j \text{Id}_{2k \times 2k} + b_j \tilde{R}$ és diagonal per blocs, amb tots els blocs diagonals iguals i els blocs de \tilde{N} commuten amb els de $a_j \text{Id}_{2k \times 2k} + b_j \tilde{R}$, perquè o bé són nuls o bé són $\text{Id}_{2 \times 2}$

Per tant, només falta calcular $e^{tb_j \tilde{R}}$. Ara bé, com aquesta matriu és diagonal per blocs, tenim que

$$e^{tb_j \tilde{R}} = \begin{pmatrix} e^{tb_j R} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & e^{tb_j R} \end{pmatrix}$$

Proposició 2.29.

$$e^{tb_j R} = \begin{pmatrix} \cos(b_j t) & -\sin(b_j t) \\ \sin(b_j t) & \cos(b_j t) \end{pmatrix}$$

Demostració. En donarem dues demostracions.

La primera és una simple comprovació. La matriu $e^{tb_j R}$ és la matriu fonamental del sistema $\dot{x} = b_j R x$ que en $t = 0$ és la identitat. Clarament, per una banda tenim que

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \cos(b_j t) & -\sin(b_j t) \\ \sin(b_j t) & \cos(b_j t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -b_j \sin(b_j t) & -b_j \cos(b_j t) \\ b_j \cos(b_j t) & -b_j \sin(b_j t) \end{pmatrix}$$

i, per l'altra,

$$\begin{pmatrix} 0 & -b_j \\ b_j & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos(b_j t) & -\sin(b_j t) \\ \sin(b_j t) & \cos(b_j t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -b_j \sin(b_j t) & -b_j \cos(b_j t) \\ b_j \cos(b_j t) & -b_j \sin(b_j t) \end{pmatrix}.$$

Com

$$\begin{pmatrix} \cos(b_j t) & -\sin(b_j t) \\ \sin(b_j t) & \cos(b_j t) \end{pmatrix} \Big|_{t=0} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix},$$

la proposició queda provada.

La segona prova consisteix en calcular explícitament $e^{tb_j R}$ mitjançant la fórmula

$$e^{tb_j R} = \sum_{\ell \geq 0} \frac{t^\ell b_j^\ell}{\ell!} R^\ell.$$

Per a sumar aquesta sèrie només cal observar que

$$\begin{aligned} R^0 &= \text{Id}_{2 \times 2} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \\ R &= \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \\ R^2 &= -\text{Id}_{2 \times 2} = \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}, \\ R^3 &= R^2 R = -R = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix}, \\ R^4 &= R^2 R^2 = \text{Id}_{2 \times 2}, \end{aligned}$$

el que implica que

$$\begin{aligned} e^{tb_j R} &= \begin{pmatrix} \sum_{\ell \geq 0} (-1)^\ell \frac{(tb_j)^{2\ell}}{(2\ell)!} & -\sum_{\ell \geq 0} (-1)^\ell \frac{(tb_j)^{2\ell+1}}{(2\ell+1)!} \\ \sum_{\ell \geq 0} (-1)^\ell \frac{(tb_j)^{2\ell+1}}{(2\ell+1)!} & \sum_{\ell \geq 0} (-1)^\ell \frac{(tb_j)^{2\ell}}{(2\ell)!} \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} \cos(b_j t) & -\sin(b_j t) \\ \sin(b_j t) & \cos(b_j t) \end{pmatrix} \end{aligned}$$

□

2.2.3 Sistemes lineals amb coeficients constants no homogenis

Per a resoldre sistemes de la forma

$$\dot{x} = Ax + b(t),$$

es pot fer servir el mètode de variació de les constants, tal com es va veure a la Proposició 2.17. La reformulem fent servir la matriu exponencial de la manera següent.

Proposició 2.30. *Sigui $I \subset \mathbb{R}$, un interval obert, $A \in \mathcal{M}_{n \times n}(\mathbb{R})$, $b \in C(I, \mathbb{R}^n)$ i $t_0 \in I$. Llavors, la solució general del sistema $\dot{x} = Ax + b(t)$ és*

$$\left\{ e^{tA}v + e^{tA} \int_{t_0}^t e^{-sA}b(s) ds \mid v \in \mathbb{R}^n \right\}.$$

Equivalentment, per a qualsevol $(t_0, x_0) \in I \times \mathbb{R}^n$, l'única solució del p.v.i.

$$\dot{x} = Ax + b(t), \quad x(t_0) = x_0$$

és

$$\begin{aligned} \varphi(t, t_0, x_0) &= e^{tA} \left(e^{-t_0A} x_0 + \int_{t_0}^t e^{-sA} b(s) ds \right) \\ &= e^{(t-t_0)A} x_0 + \int_{t_0}^t e^{(t-s)A} b(s) ds. \end{aligned}$$

Ara bé, si la matriu A té coeficients constants i el vector $b(t)$ té una forma particular, es poden trobar solucions particulars del sistema similars a $b(t)$. Es deixa com exercici provar el següent resultat.

Exercici 2.12. *Suposeu que $b(t) = t^k e^{t\lambda} v$, $v \in \mathbb{C}^n$, on $\lambda \notin \text{spec } A$. Llavors, existeixen $v_0, \dots, v_k \in \mathbb{C}^n$ (a \mathbb{R}^n , si A i λ són reals) tals que*

$$\varphi(t) = e^{t\lambda}(v_0 + \dots t^k v_k)$$

és solució de $\dot{x} = Ax + b(t)$.

Aplicació: trobeu una solució real de

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \cos t \\ 0 \end{pmatrix},$$

sense fer servir variació de les constants.

Exercici 2.13. *Si $\lambda \in \text{spec } A$, l'afirmació de l'exercici anterior no és certa en general. Com s'ha de corregir la solució φ per a tenir un resultat anàleg?*

2.3 Retrats de fase de sistemes lineals

2.3.1 Retrats de fase. Òrbites

Considerem el sistema lineal homogeni amb coeficients constants $\dot{x} = Ax$, on $A \in \mathcal{M}_{n \times n}(\mathbb{R})$. Com el sistema és autònom, per la Proposició 1.5, si $\varphi(t)$ n'és una solució, per a tot $t_0 \in \mathbb{R}$, la seva traslladada en el temps, $\varphi_{t_0}(t) = \varphi(t - t_0)$ ho és també. De fet, tenim la següent proposició.

Proposició 2.31. Donats $t_0 \in \mathbb{R}$ i $x_0 \in \mathbb{R}^n$, sigui $\varphi(t, t_0, x_0)$ la solució del p.v.i.

$$\dot{x} = Ax, \quad x(t_0) = x_0.$$

Llavors, per a tot $t_1 \in \mathbb{R}$, $\varphi(t - (t_0 - t_1), t_1, x_0) = \varphi(t, t_0, x_0) = \varphi(t - t_0, 0, x_0)$.

Demostració. Per definició, $\varphi(t - (t_0 - t_1), t_1, x_0)$, $\varphi(t, t_0, x_0)$ i $\varphi(t - t_0, 0, x_0)$ són solució de $\dot{x} = Ax$. Totes tres funcions valen x_0 en $t = t_0$. Per tant, han de coincidir sempre. \square

En particular, per a qualsevol $t_0, t_1 \in \mathbb{R}$, imatge $\varphi(\cdot, t_0, x_0) = \text{imatge } \varphi(t, t_0, x_0)$, és a dir, la imatge de les solucions de

$$\dot{x} = Ax, \quad x(t_0) = x_0$$

no depèn de t_0 .

Això justifica la següent definició.

Definició 2.32. Considerem el sistema $\dot{x} = Ax$, on $A \in \mathcal{M}_{n \times n}(\mathbb{R})$. Siguin $x_0 \in \mathbb{R}^n$. Anomenarem òrbita per x_0 a

$$\mathcal{O}(x_0) = \{\varphi(t, t_0, x_0) \in \mathbb{R}^n \mid t \in \mathbb{R}\} = \text{imatge } \varphi(\cdot, t_0, x_0).$$

La Proposició 2.31 assegura que $\mathcal{O}(x_0)$ no depèn de t_0 i, per tant, està ben definida.

És a dir, la òrbita de x_0 és el recorregut que fan totes les solucions de $\dot{x} = Ax$ que passen en algun instant per x_0 . La Proposició 2.31 és pot interpretar dient que per tot punt de \mathbb{R}^n passa una única òrbita del sistema $\dot{x} = Ax$.

Proposició 2.33. Considerem l'e.d.o. $\dot{x} = Ax$, con $A \in \mathcal{M}_{n \times n}(\mathbb{R}^n)$. Siguin $x_0, x_1 \in \mathbb{R}^n$. Es compleix que $x_1 \in \mathcal{O}(x_0)$ si i només si $\mathcal{O}(x_1) = \mathcal{O}(x_0)$.

Demostració. La implicació cap a la dreta és trivial, perquè $x_1 \in \mathcal{O}(x_1)$.

Suposem que $x_1 \in \mathcal{O}(x_0)$, és a dir existeixen $t_0, t_1 \in \mathbb{R}$ tals que $x_1 = \varphi(t_1, t_0, x_0)$. Però llavors, per a tot $t \in \mathbb{R}$,

$$\varphi(t, t_1, x_1) = \varphi(t, t_1, \varphi(t_1, t_0, x_0)) = \varphi(t, t_0, x_0),$$

el que implica que $\mathcal{O}(x_1) = \mathcal{O}(x_0)$. \square

Exemple 2.4. L'òrbita més simple d'un sistema lineal homogeni és $\mathcal{O}(0) = 0$, que correspon a la família de solucions $\varphi(t, t_0, 0) = 0$, per a tot $t \in \mathbb{R}$.

Definició 2.34. Considerem el sistema $\dot{x} = Ax$, on $A \in \mathcal{M}_{n \times n}(\mathbb{R})$. El seu retrat de fases és el dibuix de totes les seves òrbites, amb el sentit en que estan recorregudes.

Exemple 2.5. Dibuixem el retrat de fases del sistema lineal al pla

$$\begin{cases} \dot{x} = y, \\ \dot{y} = -x. \end{cases}$$

Una manera de trobar les òrbites del sistema és trobar-ne les solucions i dibuixar-ne la imatge. Però trobar-ne les solucions vol dir calcular-ne la dependència

respecte al temps, la qual cosa és irrellevant per a l'obtenció de les òrbites. Una alternativa és descriure les òrbites com a gràfiques de funcions de x o de y , sense obtenir la dependència de les solucions respecte a t . Així, observem que

$$\frac{dy}{dx} = \frac{\frac{dy}{dt}}{\frac{dx}{dt}} = \frac{\dot{y}}{\dot{x}} = -\frac{x}{y}. \quad (2.17)$$

Això només tindrà sentit en els punts (x, y) on $\dot{x} \neq 0$, és a dir, a $\mathbb{R}^2 \setminus \{y = 0\}$. A $\{y = 0\}$, si $x \neq 0$, podem escriure x en funció de y com

$$\frac{dx}{dy} = \frac{\frac{dx}{dt}}{\frac{dy}{dt}} = \frac{\dot{x}}{\dot{y}} = -\frac{y}{x}.$$

L'únic punt on no podem posar les solucions com a gràfica és $(0, 0)$, però ja hem vist a l'Exemple 2.4 que $\{(0, 0)\}$ és una òrbita (que no és una corba).

Resolem l'equació (2.17). Busquem-ne la solució que passa pel punt (x_0, y_0) . La podem escriure com

$$y \frac{dy}{dx} = -x.$$

Fixat x_0 qualsevol, integrant a ambdues bandes entre x_0 i x , obtenim

$$\begin{aligned} \int_{x_0}^x y(\sigma) \frac{dy}{dx}(\sigma) d\sigma &= - \int_{x_0}^x \sigma d\sigma \quad \Longleftrightarrow \\ \frac{1}{2}(y(x)^2 - y(x_0)^2) &= -\frac{1}{2}(x^2 - x_0^2) \quad \Longleftrightarrow \\ x^2 + y^2 &= x_0^2 + y_0^2, \end{aligned}$$

és a dir, la òrbita per (x_0, y_0) és una circumferència centrada en $(0, 0)$ de radi $\sqrt{x_0^2 + y_0^2}$.

2.3.2 Retrats de fase de sistemes plans

En aquesta secció farem una classificació dels retrats de fase dels sistemes lineals homogenis amb coeficients constants 2-dimensionals.

Considerem el sistema

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}, \quad (2.18)$$

on $A \in \mathcal{M}_{2 \times 2}(\mathbb{R})$. Per a simplificar, suposarem que A està en la forma més simple possible: diagonal, si diagonalitza amb valors propis reals, en forma de Jordan, si no diagonalitza i en una forma adient, si els valors propis tenen part imaginària no nul·la. Com haurem fixat els vectors propis, que seran els vectors de la base en la que treballem, els retrats de fase que pintarem només dependran dels valors propis. Es deixa com a exercici fer els retrats de fase en el cas de que els vectors propis siguin arbitraris.

Al llarg d'aquesta secció, λ_1 i λ_2 seran els valors propis d' A , no necessàriament diferents. Si $\lambda_1 \in \mathbb{R}$, $e_1 = (1, 0)^\top$ en serà el vector propi. Si, a més, $\lambda_2 \neq \lambda_1$ o la matriu és $\lambda_1 \text{Id}$, $e_2 = (0, 1)^\top$ serà el vector propi de valor propi λ_2 . Considerarem casos i subcasos.

1. Cas $\lambda_1 \lambda_2 \neq 0$ (és a dir, $\det A \neq 0$).

(a) Cas $\lambda_1, \lambda_2 \in \mathbb{R}$.

i. Cas $\lambda_1 \geq \lambda_2 > 0$. **Node repulsor**.

A. Cas $A = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{pmatrix}$. En aquest cas les solucions són

$$(x, y)^\top = \varphi(t, t_0, x_0, y_0) = (x_0 e^{\lambda_1(t-t_0)}, y_0 e^{\lambda_2(t-t_0)})^\top.$$

El·liminant la variable t , ens queda

$$y = c|x|^{\lambda_2/\lambda_1}, \quad c \in \mathbb{R}.$$

Vegeu les figures 2.1 i 2.2.

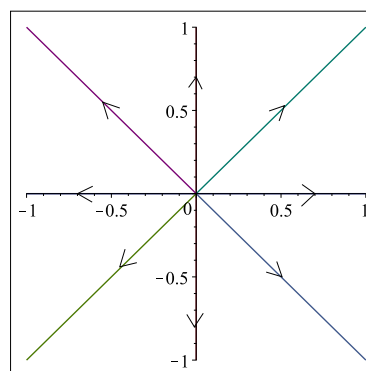
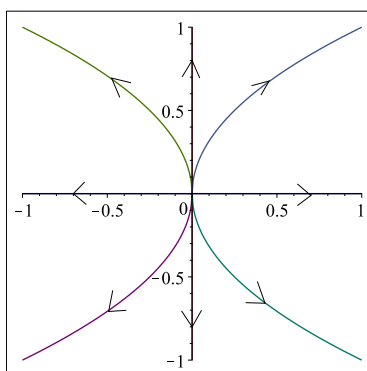


Figura 2.1: Node repulsor, $\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = 2$.

Figura 2.2: Node repulsor, $\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = 1$.

B. Cas $A = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 1 \\ 0 & \lambda_1 \end{pmatrix}$. Les solucions són

$$\begin{aligned} (x, y)^\top &= \varphi(t, t_0, x_0, y_0) \\ &= (x_0 e^{\lambda_1(t-t_0)} + y_0(t-t_0)e^{\lambda_1(t-t_0)}, y_0 e^{\lambda_1(t-t_0)})^\top \\ &= x_0 e^{\lambda_1(t-t_0)} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} + y_0 e^{\lambda_1(t-t_0)} \begin{pmatrix} t-t_0 \\ 1 \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

Aillant $t - t_0$, obtenim que el recorregut de les solucions ve donat per

$$x = a|y| + b|y| \log |y|, \quad a, b \in \mathbb{R}.$$

Vegeu la figura 2.3. Observeu que en aquest cas l'eix $\{x = 0\}$ no és invariant (l'única òrbita que conté és $\{(0, 0)\}$).

ii. Cas $\lambda_1 \leq \lambda_2 < 0$. **Node attractor**. El retrat de fases és com el del cas $\lambda_1 \geq \lambda_2 > 0$, amb el sentit de recorregut invers. Això és degut a que si $\varphi(t)$ és una solució de $\dot{x} = Ax$, la funció $\psi(t) = \varphi(-t)$, que representa la mateixa corba recorreguda en sentit invers, és solució de $\dot{x} = -Ax$.

iii. Cas $\lambda_1 > 0 > \lambda_2$. **Sella**. Les solucions són

$$(x, y)^\top = \varphi(t, t_0, x_0, y_0) = (x_0 e^{\lambda_1(t-t_0)}, y_0 e^{\lambda_2(t-t_0)})^\top.$$

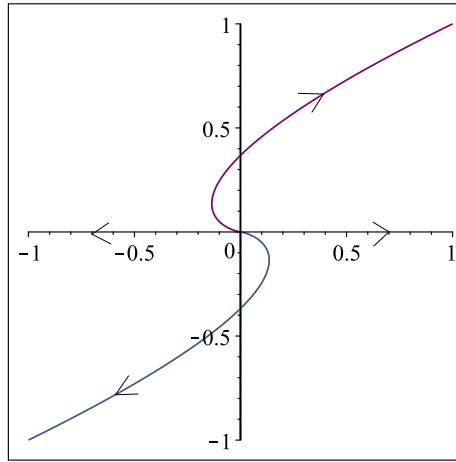
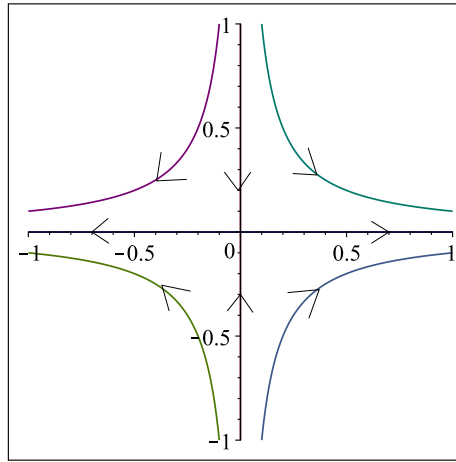


Figura 2.3: Node repulsor, amb caixa de Jordan no trivial.

El·liminant la variable t , ens queda de nou

$$y = c|x|^{\lambda_2/\lambda_1}, \quad c \in \mathbb{R},$$

on ara $\lambda_2/\lambda_1 < 0$. Vegeu la figura 2.4.

Figura 2.4: Sella, $\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = 1$.

- (b) Cas $\lambda_1, \lambda_2 \notin \mathbb{R}$, és a dir $\lambda_1 = a + ib$, $\lambda_2 = a - ib$, $b \neq 0$. En aquest cas, es pot veure que hi ha una base en la que la matriu A és

$$A = \begin{pmatrix} a & -b \\ b & a \end{pmatrix}.$$

Les solucions del sistema són

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = e^{at} \left[c_1 \begin{pmatrix} \cos bt \\ \sin bt \end{pmatrix} + c_2 \begin{pmatrix} -\sin bt \\ \cos bt \end{pmatrix} \right], \quad c_1, c_2 \in \mathbb{R}.$$

i. Cas $a > 0$. **Focus repulsor**. Vegeu la figura 2.5.

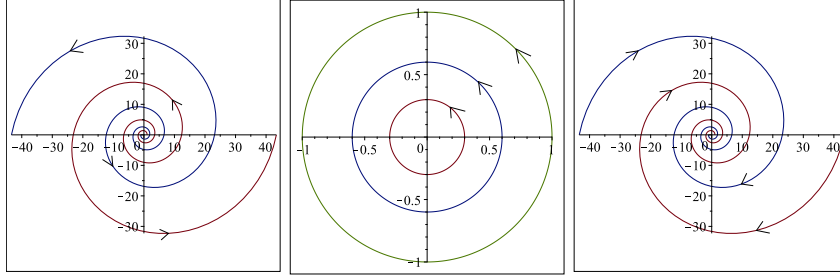


Figura 2.5: Focus repulsor, $b > 0$. Figura 2.6: Centre, $b > 0$. Figura 2.7: Focus attractor, $b < 0$.

ii. Cas $a < 0$. **Focus atractor**. Vegeu la figura 2.7.

iii. Cas $a = 0$. **Centre**. Vegeu la figura 2.6.

2. Cas $\lambda_1 \lambda_2 = 0$ (és a dir, $\det A = 0$).

(a) Cas $\lambda_1 > 0$, $\lambda_2 = 0$. Les solucions són

$$(x, y)^\top = (c_1 e^{\lambda_1 t}, c_2)^\top, \quad c_1, c_2 \in \mathbb{R}.$$

Observeu que cada punt de la recta $\{x = 0\}$ és una òrbita. Vegeu la figura 2.8.

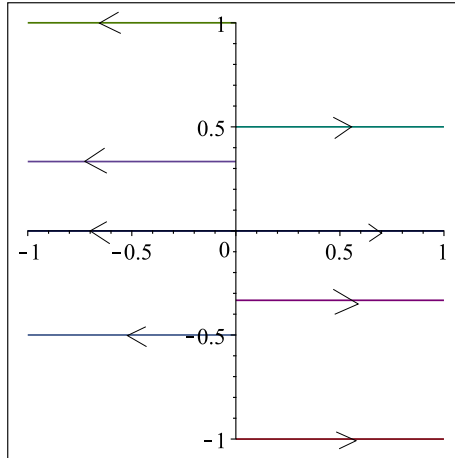


Figura 2.8: Cas, $\lambda_1 > 0$, $\lambda_2 = 0$.

(b) Cas $\lambda_1 < 0$, $\lambda_2 = 0$. Igual que el cas anterior, amb el sentit de recorregut invertit.

(c) Cas $\lambda_1 = \lambda_2 = 0$.

i. Cas $A = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$. Les solucions són

$$(x, y)^\top = (c_1 t, c_2)^\top, \quad c_1, c_2 \in \mathbb{R}.$$

Quina és la diferència entre els retrats de fases d'aquest cas i el del cas $\lambda_1 > 0, \lambda_2 = 0$?

- ii. Cas $A = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$. En aquest cas, tot punt de \mathbb{R}^2 és una òrbita.

2.3.3 Estabilitat de solucions de sistemes lineals

A partir dels retrats de fase dels sistemes lineals al pla, en la secció anterior, podem observar que quan la part real d'algun valor propi d' A és positiva, sempre hi ha solucions de $\dot{x} = Ax$ que s'allunyen, quan el temps creix, de la solució 0. De fet, comprovem que si la part real d'algun valor propi d' A és positiva i φ n'és una solució passant per un punt (x_0, y_0) , hi ha solucions que passant tant a prop com vulgueu de (x_0, y_0) que es separan arbitràriament de φ quan el temps creix. D'aquesta propietat en direm *inestabilitat*.

Si la part real de tots els valors propis és 0 i la part imaginària és no nul·la, les solucions ni s'allunyen ni s'acosten. Quan no s'allunyen, en direm que són *estables*.

Si la part real de tots els valors propis d' A és negativa no només no s'allunyen quan el temps creix, sinó que totes les solucions tendeixen a $(0, 0)$. En aquest cas parlarem de solucions *asimptòticament estables*.

En aquesta secció donarem les definicions precises d'aquests conceptes i un resultat preliminar.

Definició 2.35. *Considerem el sistema lineal*

$$\dot{x} = A(t)x + b(t), \quad (2.19)$$

on $A \in C(\mathbb{R}, \mathcal{M}_{n \times n}(\mathbb{R}))$ i $b \in C(\mathbb{R}, \mathbb{R})$. Sigui $\varphi_0 : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ una solució de (2.19). Direm que φ_0 és

1. estable si, per a tot $\varepsilon > 0$, existeix $\delta > 0$ tal que si φ és una solució de (2.19) satisfent $\|\varphi(t_0) - \varphi_0(t_0)\| < \delta$, per a algun $t_0 \in \mathbb{R}$, llavors $\|\varphi(t) - \varphi_0(t)\| < \varepsilon$, per a tot $t \geq t_0$,
2. asimptòticament estable si és estable i existeix $\varepsilon > 0$ tal que si $\|\varphi(t_0) - \varphi_0(t_0)\| < \varepsilon$, per a algun $t_0 \in \mathbb{R}$, llavors $\lim_{t \rightarrow \infty} \|\varphi(t) - \varphi_0(t)\| = 0$ i
3. inestable si no és estable.

Una primera observació és la següent.

Proposició 2.36. *Considerem $A \in C(\mathbb{R}, \mathcal{M}_{n \times n}(\mathbb{R}))$ i $b \in C(\mathbb{R}, \mathbb{R})$. Qualsevol solució del sistema $\dot{x} = A(t)x + b(t)$ té el mateix caràcter d'estabilitat que la solució 0 del sistema lineal homogeni $\dot{x} = A(t)x$.*

Demostració. De la Definició 2.35, l'estabilitat d'una solució φ_0 de $\dot{x} = A(t)x + b(t)$ depèn de la evolució de $\phi(t) = \varphi_0(t) - \varphi(t)$, on φ n'és una altra solució. Ara bé, si φ_0 i φ són solucions del sistema complet, $\phi(t)$ ho és de $\dot{x} = A(t)x$. La condició $\|\varphi(t_0) - \varphi_0(t_0)\| < \delta$ és equivalent a $\|\phi(t_0) - 0\| < \delta$. \square

Estudiar la estabilitat de les solucions de un sistema $\dot{x} = A(t)x$ és, en general, un problema no trivial. Si el sistema té coeficients constants, com podem trobar les solucions explícitament, la qüestió té fàcil solució.

Proposició 2.37. *Sigui $A \in \mathcal{M}_{n \times n}(\mathbb{R})$. Llavors*

1. *si $\text{Spec } A \subset \{z \in \mathbb{C} \mid \Re z < 0\}$, llavors la solució 0 de $\dot{x} = Ax$ (equivalentment, totes les solucions de $\dot{x} = Ax$) és asimptòticament estable,*
2. *si existeix un $\lambda \in \text{Spec } A$ tal que $\Re \lambda > 0$, llavors la solució 0 de $\dot{x} = Ax$ (equivalentment, totes les solucions de $\dot{x} = Ax$) és inestable.*

Demostració. Donat $v = (v_1, \dots, v_n) \in \mathbb{R}^n$, farem servir la norma

$$\|v\| = \sum_{j=1}^n |v_j|.$$

És un càlcul directe comprovar que la norma matricial associada a $A = (a_{ij})_{1 \leq i, j \leq n}$ és

$$\|A\| = \max_{1 \leq j \leq n} \sum_{i=1}^n |a_{ij}|$$

(és a dir, el màxim de la norma de cada columna).

Suposem que $\text{Spec } A \subset \{z \in \mathbb{C} \mid \Re z < 0\}$. Sigui $a = \max_{\lambda \in \text{Spec } A} \Re \lambda < 0$. Sigui $\nu > 0$ tal que $a + \nu < 0$. Sigui C la matriu tal que $C^{-1}AC$ està en la forma de Jordan real. Tenim que, si $t > 0$,

$$\|e^{tC^{-1}AC}\| \leq e^{ta} \sum_{j=0}^n \frac{t^j}{j!}.$$

Existeix una constant $K > 0$ tal que⁵

$$e^{ta} \sum_{j=0}^n \frac{t^j}{j!} \leq K e^{(a+\nu)t}, \quad \text{per a tot } t \geq 0.$$

En conseqüència, si $t \geq 0$,

$$\|e^{tC^{-1}AC}\| \leq K e^{(a+\nu)t}.$$

Sigui $\varepsilon > 0$. Llavors, si

$$\|x_0\| \leq \frac{\varepsilon}{\|C\| \|C^{-1}\| K},$$

es compleix que, si $t \geq 0$,

$$\|e^{tA}x_0\| = \|C e^{tC^{-1}AC} C^{-1}x_0\| \leq \|C\| \|C^{-1}\| K \|e^{tC^{-1}AC}\| \|x_0\| \leq \varepsilon e^{(a+\nu)t}.$$

Aquesta darrera desigualtat implica que

$$\|e^{tA}x_0\| \leq \varepsilon, \quad \text{per a tot } t \geq 0$$

el que prova que la solució 0 és estable. A més, $\lim_{t \rightarrow \infty} \|e^{tA}x_0\| = 0$, el que prova que és asimptòticament estable. Això prova 1.

⁵En efecte, només cal observar que la funció $e^{-\nu t} \sum_{j=0}^n \frac{t^j}{j!}$ està fitada a $[0, \infty)$.

Suposem ara que existeix $\lambda \in \text{Spec } A$ tal que $\Re \lambda > 0$. Si $\lambda \in \mathbb{R}$, existeix $v \in \mathbb{R}^n$, $v \neq 0$, tal que $\varphi(t) = e^{\Re \lambda t} v$ és solució del sistema. Si $\Im \lambda \neq 0$, existeixen $v_1, v_2 \in \mathbb{R}^n$, linealment independents, tals que

$$\varphi(t) = e^{t\Re \lambda} (\cos(\Im \lambda t) v_1 + \sin(\Im \lambda t) v_2)$$

és solució del sistema. En ambdós casos, $c\varphi$ també n'és solució, per a tot $c \in \mathbb{R}$. Llavors, per a qualsevol $\varepsilon > 0$, existeix c tal que $\|c\varphi(0)\| < \varepsilon$, però prenent t prou gran, com $\lim_{t \rightarrow \infty} e^{\Re \lambda t} = \infty$, $\|c\varphi(t)\| > 1$, el que prova que la solució 0 és inestable. \square

Exercici 2.14. *Proveu que si les solucions de $\dot{x} = Ax$ són estables però no asimptòticament estables, llavors $\text{Spec } A \subset \{z \in \mathbb{C} \mid \Re z \leq 0\}$. Doneu un exemple de sistema $\dot{x} = Ax$ tal que les seves solucions siguin estables però no asimptòticament estables. Doneu un exemple de sistema $\dot{x} = Ax$ tal que $\text{Spec } A \subset \{z \in \mathbb{C} \mid \Re z \leq 0\}$ però que les seves solucions siguin inestables.*

2.4 Sistemes lineals periòdics. Teoria de Floquet

Considerem l'e.d.o. autònoma $\dot{x} = f(x)$. Direm que una solució, φ , és T -periòdica si $\varphi(t+T) = \varphi(t)$, per a tot $t \in \mathbb{R}$. Aquestes solucions, si existeixen, juguen un paper molt important en l'estudi de l'e.d.o.. Provar-ne la existència és sovint una tasca fortament no trivial.

Suposem, però, que coneixem una solució T -periòdica, φ , de l'e.d.o. $\dot{x} = f(x)$, on f és de classe C^1 respecte a x . Tal com vàrem veure a (2.1), esperem que el comportament de les solucions de $\dot{x} = f(x)$ properes a φ_0 vindrà governat pel comportament de les solucions del sistema lineal

$$\dot{x} = Df(\varphi_0(t))x.$$

Ara bé, com φ_0 és T -periòdica, també ho són els coeficients de la matriu $Df(\varphi_0(t))$. És a dir, l'estudi dels sistemes lineals amb coeficients constants ens permetrà obtenir informació del comportament de les solucions properes a solucions periòdiques en sistemes arbitraris.

2.4.1 Propietats elementals

Proposició 2.38. *Sigui $A \in C(\mathbb{R}, \mathcal{M}_{n \times n}(\mathbb{R}))$, T -periòdica. Llavors es compleix el següent.*

1. *Si $\varphi(t)$ és una solució de $\dot{x} = A(t)x$, $\tilde{\varphi}(t) = \varphi(t+T)$ també ho és.*
2. *Sigui $\ell \in \mathbb{N}$. Llavors φ és una solució ℓT -periòdica si i només si existeix t_0 tal que $\varphi(t_0) = \varphi(t_0 + \ell T)$.*

Demostració. Per a veure 1 només cal comprovar que

$$\dot{\tilde{\varphi}}(t) = \dot{\varphi}(t+T) = A(t+T)\varphi(t+T) = A(t)\tilde{\varphi}(t).$$

La implicació cap a la dreta de 2 és immediata. Suposem que $\varphi(t_0) = \varphi(t_0 + \ell T)$, per a algun t_0 . Definim $\hat{\varphi}(t) = \varphi(t + \ell T)$. Es compleix $\hat{\varphi}(t_0) = \varphi(t_0 + \ell T) = \varphi(t_0)$. A més,

$$\dot{\hat{\varphi}}(t) = \dot{\varphi}(t + \ell T) = A(t + \ell T)\varphi(t + \ell T) = A(t)\hat{\varphi}(t).$$

Això prova la implicació cap a l'esquerra. \square

2.4.2 La matriu de monodromia

Proposició 2.39. *Sigui $A \in C(\mathbb{R}, \mathcal{M}_{n \times n}(\mathbb{R}))$, T -periòdica. Sigui $\Phi(t)$ una matriu fonamental de $\dot{x} = A(t)x$. Les afirmacions següents són certes.*

1. $\Phi(t + T)$ n'és també una matriu fonamental.
2. Existeix una matriu constant $M = \Phi(0)^{-1}\Phi(T)$, amb $\det M \neq 0$, tal que $\Phi(t + T) = \Phi(t)M$. A la matriu M se li diu matriu de monodromia.
3. Si \widetilde{M} és la matriu de monodromia associada a una altra matriu fonamental $\widetilde{\Phi}$, existeix una matriu C tal que $\widetilde{M} = C^{-1}MC$.

Demostració. Sigui $\Psi(t) = \Phi(t + T)$. Tenim que, com $A(t + T) = A(t)$,

$$\dot{\Psi}(t) = \dot{\Phi}(t + T) = A(t + T)\Phi(t + T) = A(t)\Phi(t + T) = A(t)\Psi(t).$$

Això prova 1.

Tenim que $\Phi(t + T)$ i $\Phi(t)\Phi(0)^{-1}\Phi(T)$ són matrius fonamentals de $\dot{x} = A(t)x$ i coincideixen en $t = 0$. Han de coincidir per a tot t . Això prova 2.

Si $\widetilde{\Phi}$ n'és una altra matriu fonamental, per una banda, $\widetilde{\Phi}(t) = \Phi(t)C$ i, per una altra, $\widetilde{\Phi}(t + T) = \widetilde{\Phi}(t)\widetilde{M}$. Llavors, per a tot t ,

$$\Phi(t)MC = \Phi(t + T)C = \widetilde{\Phi}(t + T) = \widetilde{\Phi}(t)\widetilde{M} = \Phi(t)C\widetilde{M}.$$

\square

Suposem que Φ és la matriu fonamental de $\dot{x} = A(t)x$, amb A T -periòdica, tal que $\Phi(t_0) = \text{Id}$. Observem que, si φ és el flux de $\dot{x} = A(t)x$, pel punt 4 de la Proposició 2.14, com $\varphi(t, t_0, x_0) = \Phi(t)x_0$,

$$\varphi(t_0 + T, t_0, x_0) = \Phi(t_0 + T)x_0 = \Phi(t_0)Mx_0 = Mx_0.$$

Per tant, M codifica com es transforma una solució del sistema amb condició inicial x_0 en $t = t_0$ en $t = t_0 + T$. Com $\Phi(t + T) = \Phi(t)M$,

$$\begin{aligned} \varphi(t_0 + kT, t_0, x_0) &= \Phi(t_0 + kT)x_0 = \Phi(t_0 + (k - 1)T + T)x_0 \\ &= \Phi(t_0 + (k - 1)T)Mx_0 = \cdots = M^k x_0. \end{aligned}$$

En particular, considereu l'exercici següent.

Exercici 2.15. *Suposeu que M és la matriu de monodromia del sistema T -periòdic $\dot{x} = A(t)x$. Sigui $\ell \in \mathbb{N}$. Proveu que el sistema admet una solució ℓT periòdica no trivial si i només si M té algun valor propi λ tal que $\lambda^\ell = 1$.*

A més, els valors propis de la matriu de monodromia ens caracteritzen l'estabilitat de les solucions dels sistemes amb coeficients periòdics.

Definició 2.40. Els valors propis de la matriu de monodromia s'anomenen multiplicadors característics.

Teorema 2.41. Sigui M una matriu de monodromia del sistema T -periòdic amb coeficients continus $\dot{x} = A(t)x$. Llavors,

1. si $\text{spec } M \subset \{z \in \mathbb{C} \mid |z| < 1\}$, totes les solucions del sistema són asimptòticament estables,
2. si $\text{spec } M \subset \{z \in \mathbb{C} \mid |z| = 1\}$ i M diagonalitza (presumiblement, en \mathbb{C}) les solucions del sistema són estables però no asimptòticament estables i
3. si $\text{spec } M \not\subset \{z \in \mathbb{C} \mid |z| \leq 1\}$ o la forma de Jordan de M té un bloc no diagonal de mida més gran que 1 associat a un valor propi de mòdul 1, les solucions del sistema són inestables.

La demostració, similar a la de la Proposició 2.37, és deixa com a exercici. En donarem una altra després del Teorema 2.44.

2.4.3 Teoria de Floquet

Tot sistema lineal amb coeficients periòdics es pot transformar mitjançant un canvi de variables lineal en un sistema lineal amb coeficients constants. El canvi està determinat per la matriu de monodromia del sistema.

Lema 2.42. Sigui $M \in \mathcal{M}_{n \times n}(\mathbb{R})$ ($\mathcal{M}_{n \times n}(\mathbb{C})$), una matriu tal que $\det M \neq 0$. Llavors existeix una matriu B tal que

$$e^B = M.$$

Direm que $B = \log M$.

La demostració és deixa com a exercici. Podeu mirar [aquí](#). Els comentaris següent us en poden donar pistes.

Comentari 2.43. Sobre la matriu B del Lema 2.42 val la pena remarcar el següent.

1. B pot ser complexa encara que M sigui una matriu real. Per exemple, si $M = -1$, $\log M = \pi i + 2k\pi i$, $k \in \mathbb{Z}$. Però observem que

$$\begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} = \exp \begin{pmatrix} 0 & -\alpha \\ \alpha & 0 \end{pmatrix}.$$

En particular,

$$\begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} = \exp \begin{pmatrix} 0 & -\pi \\ \pi & 0 \end{pmatrix}.$$

2. Si B satisfà $e^B = M$, $B + 2k\pi i \text{Id}$ també, per a tot $k \in \mathbb{Z}$.
3. Si el valors propis de M són tots positius, B es pot escollir real.

4. Com $C^{-1}MC = C^{-1}e^BC = e^{C^{-1}BC}$, podem suposar que o bé M o bé B estan en forma de Jordan.
5. Per a calcular la matriu B , es procedeix com per a calcular l'exponencial d'una matriu. Si $M = \text{diag}(\Lambda_1, \dots, \Lambda_n)$ és diagonal per blocs, $B = \text{diag}(\log \Lambda_1, \dots, \log \Lambda_n)$. Si M és un bloc de Jordan, és a dir, si és de la forma $M = (\lambda \text{Id} + N) = \lambda \text{Id}(\text{Id} + N/\lambda)$, amb $N^k = 0$, com Id i N commuten, proveu que

$$\log M = \log \lambda \text{Id}(\text{Id} + N) = \log \lambda \text{Id} + \log(\text{Id} + N/\lambda)$$

on

$$\log(\text{Id} + N/\lambda) = \sum_{j=1}^{k-1} \frac{(-1)^{j+1}}{j} \frac{1}{\lambda^j} N^j.$$

Teorema 2.44 (Teorema de Floquet). *Sigui $A \in C(\mathbb{R}, \mathcal{M}_{n \times n}(\mathbb{R}))$, T -periòdica. Sigui M una matriu de monodromia del sistema $\dot{x} = A(t)x$. Sigui B tal que $e^{TB} = M$. Llavors existeix una matriu T -periòdica $P(t)$ tal que $P(t)e^{tB}$ és una matriu fonamental de $\dot{x} = A(t)x$.*

En conseqüència, el canvi $x = P(t)\tilde{x}$ transforma el sistema $\dot{x} = A(t)x$ en $\dot{\tilde{x}} = B\tilde{x}$.

Demostració. Sigui Φ la matriu fonamental de $\dot{x} = A(t)x$ tal que $\Phi(t+T) = \Phi(t)M$. Sigui $P(t) = \Phi(t)e^{-tB}$. Llavors,

$$P(t+T) = \Phi(t+T)e^{-(t+T)B} = \Phi(t)Me^{-TB}e^{-tB} = \Phi(t)MM^{-1}e^{-tB} = P(t).$$

Definint $x = P(t)\tilde{x} = \Phi(t)e^{-tB}\tilde{x}$, tenim que

$$\begin{aligned} A(t)\Phi(t)e^{-tB}\tilde{x} &= A(t)x(t) = \dot{x}(t) = \dot{\Phi}(t)e^{-tB}\tilde{x} - \Phi(t)e^{-tB}B\tilde{x} + \Phi(t)e^{-tB}\dot{\tilde{x}} \\ &= A(t)\Phi(t)e^{-tB}\tilde{x} - \Phi(t)e^{-tB}B\tilde{x} + \Phi(t)e^{-tB}\dot{\tilde{x}}, \end{aligned}$$

que implica que $\dot{\tilde{x}} = B\tilde{x}$. □

Demostració del Teorema 2.41. Tenim que $M = e^{TB}$. Per la Proposició 2.37 i l'Exercici (2.14), si els valors propis de B tenen part real negativa (si i només si els valors propis de M tenen mòdul menor que 1) les solucions de $\dot{\tilde{x}} = B\tilde{x}$ són asimptòticament estables, si algun valor propi de B té part real positiva (si i només si algun valor propi de M té mòdul més gran que 1) les solucions de $\dot{\tilde{x}} = B\tilde{x}$ són inestables i si els valors propis de B tenen part real 0 o negativa i els valors propis amb part real 0 són simples o la dimensió del seu nucli és igual a la seva multiplicitat (si i només si els valors propis de M tenen mòdul menor o igual a 1 i els valors propis amb mòdul 1 són simples o la dimensió del seu nucli és igual a la seva multiplicitat), les solucions són estables però no asimptòticament estables. □

2.4.4 Estudi de l'estabilitat de solucions d'un sistema periòdic

Considerem l'equació de Mathieu

$$\ddot{x} + (\omega^2 + \varepsilon \cos 2t)x = 0, \tag{2.20}$$

on $\omega, \varepsilon \in \mathbb{R}$ són paràmetres. El sistema equivalent és

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{pmatrix} = A(t, \omega, \varepsilon) \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}, \quad A(t, \omega, \varepsilon) = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -\omega^2 - \varepsilon \cos 2t & 0 \end{pmatrix}. \quad (2.21)$$

Observem que és un sistema π -periòdic. Definim A_0 i A_1 tals que

$$A(t, \omega, \varepsilon) = A_0 + \varepsilon A_1(t),$$

és a dir

$$A_0 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -\omega^2 & 0 \end{pmatrix}, \quad A_1(t) = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ -\cos 2t & 0 \end{pmatrix}.$$

Segui $\Phi(t, \varepsilon)$ la matriu fonamental de (2.21) que en $t = 0$ és Id. La matriu de monodromia associada és $M_\varepsilon = \Phi(\pi, \varepsilon)$. Pel Teorema 2.41, l'estabilitat de les solucions de (2.21) està determinada pels valors propis de M_ε . Per a calcular-los, una primera observació és la següent.

Proposició 2.45. *Per a tot $\omega, \varepsilon \in \mathbb{R}$, $\det M_\varepsilon = 1$.*

Demostració. Per la fórmula de Liouville,

$$\frac{d}{dt} \det \Phi(t, \varepsilon) = \text{traça } A(t, \omega, \varepsilon) \det \Phi(t, \varepsilon) = 0,$$

el que implica que $\det \Phi(t, \varepsilon)$ és constant. Com $\det \Phi(0, \varepsilon) = \det \text{Id} = 1$ i $M_\varepsilon = \Phi(\pi, \varepsilon)$, la proposició queda provada. \square

Proposició 2.46. *Es compleix el següent.*

1. Si $|\text{traça } M_\varepsilon| > 2$, les solucions de (2.21) són inestables.
2. Si $|\text{traça } M_\varepsilon| < 2$, les solucions de (2.21) són estables.

Demostració. Tenint present aquesta proposició, el polinomi característic de M_ε és $p(\lambda) = \lambda^2 - \text{traça } M_\varepsilon \lambda + \det M_\varepsilon = \lambda^2 - \text{traça } M_\varepsilon \lambda + 1$. Per tant, els valors propis de M_ε són

$$\lambda_{\pm} = \frac{1}{2} \left(\text{traça } M_\varepsilon \pm \sqrt{(\text{traça } M_\varepsilon)^2 - 4} \right).$$

Si $|\text{traça } M_\varepsilon| > 2$, el discriminant és positiu i els dos valors propis de M_ε són reals. Com $\lambda_- \lambda_+ = \det M_\varepsilon = 1$ i $\lambda_- \neq \lambda_+$, un d'ells té mòdul més gran que 1. Llavors el Teorema 2.41 assegura que les solucions de (2.21) són inestables.

Si $|\text{traça } M_\varepsilon| < 2$, el discriminant és negatiu i els dos valors propis de M_ε són complexos conjugats, amb part imaginària no nul·la. Com $\lambda_- \lambda_+ = \det M_\varepsilon = 1$, tots dos tenen mòdul 1 i, com la part imaginària és no nul·la, són simples. El Teorema 2.41 assegura que les solucions de (2.21) són estables. \square

Per tant, per a establir l'estabilitat de les solucions de (2.21) hem de calcular $|\text{traça } M_\varepsilon|$. Ho farem per a cada valor d' ω , prenent ε petit. Per a fer-ho, però, hauréu de fer servir un resultat de regularitat de les solucions que encara no hem provat.

El sistema (2.21) és un sistema lineal, depenent de t , i tal que els coeficients depenen analíticament (de fet, de forma polinomial) d' ε . Veurem en el Teorema ?? que les solucions d'aquest sistema i, en conseqüència, les seves matrius fonamentals, també en depenen de forma analítica. Així, per a cada ω ,

$$\Phi(t, \varepsilon) = \sum_{k \geq 0} \varepsilon^k \Phi_k(t) \quad (2.22)$$

La importància de poder escriure $\Phi(t, \varepsilon)$ com a sèrie és la següent: si bé no podem calcular explícitament Φ , sí que podem calcular Φ_k , per a qualsevol k . Això no ens permetrà determinar les solucions del sistema (2.21), però sí calcular $|\text{traça } M_\varepsilon|$, si prenem ε prou petit.

Proposició 2.47. *Sigui $\Phi(t, \varepsilon)$, la matriu fonamental de (2.21) que en $t = 0$ és Id i siguin Φ_k les matrius definides per (2.22). Llavors*

1. Φ_0 satisfà

$$\dot{\Phi}_0(t) = A_0 \Phi_0(t), \quad \Phi_0(0) = \text{Id},$$

és a dir,

$$\begin{aligned} \Phi_0(t) &= e^{tA_0} = \begin{pmatrix} \cos \omega t & \omega^{-1} \sin \omega t \\ -\omega \sin \omega t & \cos \omega t \end{pmatrix}, & \text{si } \omega \neq 0, \\ \Phi_0(t) &= e^{tA_0} = \begin{pmatrix} 1 & t \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, & \text{si } \omega = 0, \end{aligned}$$

2. si $k \geq 1$, Φ_k satisfà

$$\dot{\Phi}_k(t) = A_0 \Phi_k(t) + A_1(t) \Phi_{k-1}(t), \quad \Phi_k(0) = 0.$$

Demostració. Substituint (2.22) en (2.21), obtenim

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \sum_{k \geq 0} \varepsilon^k \Phi_k(t) &= \sum_{k \geq 0} \varepsilon^k \dot{\Phi}_k(t) \\ &= (A_0 + \varepsilon A_1(t)) \sum_{k \geq 0} \varepsilon^k \Phi_k(t) \\ &= \sum_{k \geq 0} \varepsilon^k A_0 \Phi_k(t) + \sum_{k \geq 0} \varepsilon^{k+1} A_1(t) \Phi_k(t) \\ &= A_0 \Phi_0(t) + \sum_{k \geq 1} \varepsilon^k (A_0 \Phi_k(t) + A_1(t) \Phi_{k-1}(t)) \end{aligned}$$

Igualant els termes amb la mateixa potència d' ε obtenim les equacions per Φ_k . Les condicions en $t = 0$ s'obtenen de

$$\text{Id} = \Phi(0, \varepsilon) = \sum_{k \geq 0} \varepsilon^k \Phi_k(0)$$

i de igualar els termes amb la mateixa potència d' ε a ambdues bandes.

Clarament, com A_0 no depèn de t ,

$$\Phi_0(t) = e^{tA_0}.$$

Per a obtenir les fórmules de e^{tA_0} només cal observar que les columnes de les matrius donades són solució del sistema i, en $t = 0$, són Id. \square

Proposició 2.48. *Sigui $\omega \in \mathbb{R} \setminus \mathbb{Z}$. Existeix $\varepsilon_0 > 0$ tal que si $|\varepsilon| < \varepsilon_0$, les solucions de (2.21) són estables.*

Demostració. Tenim que

$$\begin{aligned} \text{traça } M_\varepsilon &= \text{traça } \Phi(\pi, \varepsilon) = \text{traça } \sum_{k \geq 0} \varepsilon^k \Phi_k(\pi) \\ &= \sum_{k \geq 0} \varepsilon^k \text{traça } \Phi_k(\pi) = \text{traça } \Phi_0(\pi) + \mathcal{O}(\varepsilon). \end{aligned}$$

Ara bé, per la Proposició 2.47, si $\omega \in \mathbb{R} \setminus \mathbb{Z}$

$$|\text{traça } \Phi_0(\pi)| = 2|\cos \omega \pi| < 2.$$

Per tant, si ε és prou petit,

$$|\text{traça } \Phi(\pi, \varepsilon)| = |\text{traça } \Phi_0(\pi) + \mathcal{O}(\varepsilon)| \leq |\text{traça } \Phi_0(\pi)| + |\mathcal{O}(\varepsilon)| < 2.$$

□

Si $\omega = \ell \in \mathbb{Z}$, $\text{traça } \Phi_0(\pi) = 2 \cos \ell \pi = 2(-1)^\ell$. Sigui $k \geq 1$ tal que $\text{traça } \Phi_j(\pi) = 0$, per a $1 \leq j \leq k-1$, i tal que $\text{traça } \Phi_k(\pi) \neq 0$. Llavors

$$\text{traça } \Phi(\pi, \varepsilon) = 2(-1)^\ell + \varepsilon^k \text{traça } \Phi_k(\pi) + \mathcal{O}(\varepsilon^{k+1}).$$

Per tant, l'estabilitat de les solucions de (2.21) dependrà del signe de $\text{traça } \Phi_k(\pi)$ i de la paritat de ℓ .

Proposició 2.49. *Per a qualsevol $\omega = \ell \in \mathbb{Z}$, $\ell \neq 0$, $\text{traça } \Phi_1(\pi) = 0$.*

Demostració. Per la Proposició 2.47 i fent servir el mètode de variació de les constants escrivint $\Phi_1 = \Phi_0 \Psi_1$, tenim que

$$\Phi_0(t) \dot{\Psi}_1(t) = A_1(t) \Phi_0(t), \quad \Psi_1(0) = 0.$$

Per tant, $\dot{\Psi}_1(t) = \Phi_0(t)^{-1} A_1(t) \Phi_0(t)$, el que implica que, com la traça d'una matriu es preserva per canvis de base lineals,

$$\frac{d}{dt}(\text{traça } \Psi_1(t)) = \text{traça } \dot{\Psi}_1(t) = \text{traça } A_1(t) = 0.$$

Com $\Psi_1(0) = 0$, tenim que $\text{traça } \Psi(t) = 0$, per a tot t . Finalment, de l'expressió de Φ_0 donada per la Proposició 2.47 i tenint en compte que $\ell \in \mathbb{Z}$,

$$\text{traça } \Phi_1(\pi) = \text{traça } (\Phi_0(\pi) \Psi(\pi)) = \text{traça } ((-1)^\ell \Psi(\pi)) = 0.$$

□

Per tant, l'estabilitat vindrà donada per Φ_k , amb $k \geq 2$.

Exercici 2.16. *Completeu l'estudi de l'estabilitat calculant Φ_k , per a k adient. El valor de k depèn de ℓ . Obtindreu el següent.*

1. Si $\ell = 0$, $\text{traça} \Phi_1(\pi) = 0$ i $\text{traça} \Phi_2(\pi) = -\pi^2/8$. En aquest cas,

$$\text{traça} \Phi(\pi, \varepsilon) = 2 - \frac{\pi^2}{8} \varepsilon^2 + \mathcal{O}(\varepsilon^3).$$

Per tant $|\text{traça} \Phi(\pi, \varepsilon)| < 2$, si $\varepsilon \neq 0$ i és prou petit. Le solucions són estables.

2. Si $\ell = 1$, $\text{traça} \Phi_2(\pi) = -\pi^2/16$. En aquest cas,

$$\text{traça} \Phi(\pi, \varepsilon) = -2 - \frac{\pi^2}{16} \varepsilon^2 + \mathcal{O}(\varepsilon^3).$$

Per tant $\text{traça} \Phi(\pi, \varepsilon) < -2$, si $\varepsilon \neq 0$ i és prou petit. Le solucions són inestables.

3. Si $\ell = 2$, $\text{traça} \Phi_2(\pi) = \text{traça} \Phi_3(\pi) = 0$ i $\text{traça} \Phi_4(\pi) = 5\pi^2/36864$. En aquest cas,

$$\text{traça} \Phi(\pi, \varepsilon) = 2 + \frac{5\pi^2}{36864} \varepsilon^4 + \mathcal{O}(\varepsilon^5).$$

Per tant $\text{traça} \Phi(\pi, \varepsilon) > 2$, si $\varepsilon \neq 0$ i és prou petit. Le solucions són inestables.

4. Si $\ell \geq 3$, $\text{traça} \Phi_2(\pi) = \text{traça} \Phi_3(\pi) = 0$ i $\text{traça} \Phi_4(\pi) = (-1)^{\ell+1} c_\ell$, on $c_\ell > 0$. Deduïu que les solucions són estables.

Els càlculs són llargs i feixucs. Feu servir un ordinador, si ho considereu convenient. També podeu calcular numèricament la matriu $\Phi(\pi, \varepsilon)$ i obtenir-ne la traça.

Exercici 2.17. Com quadren els resultats de l'exercici anterior amb els diagrames d'estabilitat de l'equació de Mathieu que hom pot trobar a la literatura?

Capítol 3

Teoremes fonamentals

3.1 Existència i unicitat de solucions de p.v.i.

Siguin $U \subset \mathbb{R} \times \mathbb{R}^n$, un conjunt obert i $f : U \rightarrow \mathbb{R}^n$, una funció. Donat $(t_0, x_0) \in U$, considerem el p.v.i. o problema de Cauchy

$$\left. \begin{aligned} \dot{x} &= f(t, x), \\ x(t_0) &= x_0. \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

En aquesta secció veurem que si f satisfà certes condicions, el p.v.i. admetrà solucions i que, sota condicions addicionals, la solució del p.v.i. serà única. Les condicions que donarem seran *suficients* però no *necessàries*, en general. Una de les dificultats de respondre aquestes qüestions rau en el fet de que, a diferència del que passa amb els sistemes lineals, les solucions de (3.1) no tenen pas perquè estar definides pels mateixos valors de t pels quals està definida la funció f . Dedicarem una part d'aquesta secció a estudiar el domini d'existència d'aquestes solucions.

3.1.1 El problema de Cauchy com a equació integral

Per a resoldre el p.v.i. (3.1), el primer que farem serà transformar-lo en una equació de la forma $x = F(x)$, on F serà una funció adient.

Proposició 3.1. *Siguin $U \subset \mathbb{R} \times \mathbb{R}^n$, un conjunt obert i $f : U \rightarrow \mathbb{R}^n$, una funció contínua. Sigui I , un interval obert, $t_0 \in I$ i x_0 tal que $(t_0, x_0) \in U$. Una funció $x : I \rightarrow \mathbb{R}^n$ és solució del p.v.i. (3.1) si i només si és contínua i satisfà*

$$x(t) = x_0 + \int_{t_0}^t f(s, x(s)) ds, \quad t \in I. \quad (3.2)$$

Demostració. Veiem primer la implicació cap a la dreta. Sigui $x : I \rightarrow \mathbb{R}^n$, una solució del p.v.i. (3.1). Com, per definició de solució, és derivable, també és contínua. Com f és contínua, $f(t, x(t))$ és contínua i, com $\dot{x}(t) = f(t, x(t))$, \dot{x} és també contínua. Per tant, per a qualsevol $t \in I$, podem integrar la igualtat $\dot{x}(t) = f(t, x(t))$ entre t_0 i t i, fent servir que $x(t_0) = x_0$, obtenim que $x(t)$ satisfà

$$x(t) - x_0 = x(t) - x(t_0) = \int_{t_0}^t \dot{x}(s) ds = \int_{t_0}^t f(s, x(s)) ds.$$

Veiem ara la implicació cap a l'esquerra. Sigui $x : I \rightarrow \mathbb{R}^n$ una funció contínua satisfent (3.2). Com x és contínua, $f(t, x(t))$ és contínua i, en conseqüència, $\int_{t_0}^t f(s, x(s)) ds$ és derivable. Llavors, com $x(t) = x_0 + \int_{t_0}^t f(s, x(s)) ds$, tenim que x és derivable. Derivant, obtenim que $\dot{x} = f(t, x(t))$. A més, avaluant a $t = t_0$, obtenim que $x(t_0) = x_0$. \square

3.1.2 El teorema del punt fix de Banach

La Proposició 3.1 ens diu que, si la funció f és contínua, trobar una funció derivable x solució de (3.1) és equivalent a trobar una funció contínua x solució de (3.2).

Observem que la part dreta de (3.2) ens permet definir l'operador que a cada funció contínua $x : I \subset \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^n$ tal que $\text{graf}(x) = \{(t, x(t)) \mid t \in I\} \subset U$ li fa correspondre la funció $\mathcal{F}(x)$, on

$$\mathcal{F}(x)(t) = x_0 + \int_{t_0}^t f(s, x(s)) ds. \quad (3.3)$$

Com la funció x és contínua, $\mathcal{F}(x)$ també ho és.

Una manera intuïtiva d'obtenir una solució de (3.2) és la següent: definim $\varphi_0(t) = x_0$, per a tot t , i la successió de funcions $(\varphi_k)_k$ per $\varphi_k = \mathcal{F}(\varphi_{k-1})$, si $k \geq 1$. Veurem que, si f satisfà alguna hipòtesi addicional a la continuïtat, aquesta successió serà convergent cap a la solució de (3.2) (que és la solució de (3.1)). Això és coneix com *esquema iteratiu de Picard*.

Exemple 3.1. *Considerem el p.v.i.*

$$\left. \begin{array}{l} \dot{x} = x, \\ x(0) = 1. \end{array} \right\}$$

L'equació integral equivalent donada per la Proposició 3.1 és

$$x(t) = \mathcal{F}(x)(t) = 1 + \int_0^t x(s) ds$$

Apliquem l'esquema iteratiu de Picard en aquest cas. Comencem amb $\varphi_0(t) = 1$. Llavors els tres primers iterats són

$$\begin{aligned} \varphi_1(t) &= \mathcal{F}(\varphi_0)(t) = 1 + \int_0^t 1 ds = 1 + t, \\ \varphi_2(t) &= \mathcal{F}(\varphi_1)(t) = 1 + \int_0^t (1 + s) ds = 1 + t + \frac{1}{2}t^2, \\ \varphi_3(t) &= \mathcal{F}(\varphi_2)(t) = 1 + \int_0^t \left(1 + s + \frac{1}{2}s^2\right) ds = 1 + t + \frac{1}{2}t^2 + \frac{1}{3!}t^3, \end{aligned}$$

Proveu per inducció que φ_k és el polinomi de Taylor de grau k en $t = 0$ de e^t , que és la solució del p.v.i. que estem considerant. Clarament, en aquest cas concret, l'esquema de Picard convergeix cap a la solució.

Comentari 3.2. *Si la funció f que defineix l'e.d.o. al p.v.i.*

$$\dot{x} = f(t, x), \quad x(t_0) = x_0$$

és analítica en un entorn de (t_0, x_0) , una altra manera d'intentar trobar la solució és expressar-la com a sèrie de potències en $t - t_0$. En efecte, si suposem que podem escriure la solució com una sèrie

$$x(t) = \sum_{j \geq 0} c_j (t - t_0)^j, \quad (3.4)$$

fent servir la expansió en sèrie de Taylor de f , es possible obtenir una recurrència per a les successives derivades de x . Apliqueu aquest mètode a intentar resoldre $\dot{x} = x$, $x(0) = 1$.

Resolució: Substituint (3.4), amb $t_0 = 0$, en l'equació $\dot{x} = x$, obtenim

$$\sum_{j \geq 1} j c_j t^{j-1} = \sum_{j \geq 0} c_j t^j,$$

el que implica que els coeficients c_j han de satisfer la recurrència

$$j c_j = c_{j-1}, \quad j \geq 1.$$

De la condició inicial, obtenim que $1 = x(0) = c_0$ i, en conseqüència,

$$c_j = \frac{1}{j!},$$

(proveu aquesta fórmula per inducció), el que implica que

$$x(t) = \sum_{j \geq 0} \frac{1}{j!} t^j = e^t.$$

L'eina fonamental per a provar la convergència de l'esquema de Picard és el teorema del punt fix de Banach.

Definició 3.3. Siguin (\mathcal{X}, d) un espai mètric, on d és la distància a \mathcal{X} , i $\mathcal{F} : \mathcal{X} \rightarrow \mathcal{X}$, una aplicació. Direm que \mathcal{F} és una contracció si existeix $0 < \lambda < 1$ tal que $d(\mathcal{F}(x), \mathcal{F}(\tilde{x})) \leq \lambda d(x, \tilde{x})$, per a tot $x, \tilde{x} \in \mathcal{X}$.

Comentari 3.4. Si $\mathcal{F} : \mathcal{X} \rightarrow \mathcal{X}$, on \mathcal{X} és un espai mètric, és una contracció, \mathcal{F} és contínua. En efecte, si $\tilde{x} \in \mathcal{X}$ i $\lim_{k \rightarrow \infty} x_k = \tilde{x}$, llavors

$$0 \leq d(\mathcal{F}(x_k), \mathcal{F}(\tilde{x})) \leq \lambda d(x_k, \tilde{x}) \xrightarrow[k \rightarrow \infty]{} 0.$$

Exemple 3.2. Exemples d'espais mètrics complets són els següents.

1. Si \mathcal{X} és un espai de Banach amb norma $\|\cdot\|$, és un espai mètric complet amb la distància $d(x, \tilde{x}) = \|x - \tilde{x}\|$.
2. Siguin \mathcal{X} , un espai de Banach, $x_0 \in \mathcal{X}$, $\rho > 0$ i $\bar{\mathcal{B}}_\rho(x_0) = \{x \in \mathcal{X} \mid \|x - x_0\| \leq \rho\}$, la bola tancada de radi ρ i centre x_0 a \mathcal{X} . Llavors $\bar{\mathcal{B}}_\rho(x_0)$ és un espai mètric complet amb la distància induïda per la norma de \mathcal{X} .
3. Sigui $K \subset \mathbb{R}^k$, un conjunt compacte. L'espai

$$C(K, \mathbb{R}^n) = \{\varphi : K \rightarrow \mathbb{R}^n \mid \varphi \text{ és contínua}\}$$

amb la norma

$$\|\varphi\| = \sup_{x \in K} \|\varphi(x)\|$$

és un espai de Banach. Aquesta norma té la següent propietat: si $\varphi \in C(K, \mathbb{R}^n)$, per a tot $x \in K$,

$$\|\varphi(x)\| \leq \sup_{\tilde{x} \in K} \|\varphi(\tilde{x})\| = \|\varphi\|. \quad (3.5)$$

4. Sigui $I \subset \mathbb{R}$, un interval compacte, i $x_0 \in C(I, \mathbb{R}^n)$. Llavors $\bar{B}_\rho(x_0)$ és un espai mètric complet.
5. Observeu que si K no és compacte, $C(K, \mathbb{R}^n)$ no és un espai de Banach perquè $\sup_{x \in K} \|\varphi(x)\|$ pot ser infinit: la norma no està ben definida. Si que és un espai de Banach, amb la mateixa norma, l'espai

$$C_f(K, \mathbb{R}^n) = \{\varphi : K \rightarrow \mathbb{R}^n \mid \varphi \text{ és contínua i } \sup_{x \in K} \|\varphi(x)\| < \infty\}.$$

El subíndex f de C_f vol dir funcions contínues i fitades. Les boles tancades en $C_f(K, \mathbb{R}^n)$ són espais mètric complets.

Definició 3.5. Sigui $\mathcal{F} : \mathcal{X} \rightarrow \mathcal{X}$, una aplicació. Direm que $p_0 \in \mathcal{X}$ és un punt fix de \mathcal{F} si $\mathcal{F}(p_0) = p_0$.

Teorema 3.6 (Lema de la contracció). Sigui \mathcal{X} , un espai mètric complet, i $\mathcal{F} : \mathcal{X} \rightarrow \mathcal{X}$, una contracció. Llavors \mathcal{F} té un únic punt fix.

Demostració. Sigui d , la distància a \mathcal{X} .

Provem primer que el punt fix, si existeix, és únic. Suposem que p i q són punts fixos de \mathcal{F} . Llavors,

$$d(p, q) = d(\mathcal{F}(p), \mathcal{F}(q)) \leq \lambda d(p, q) \implies (1 - \lambda)d(p, q) \leq 0.$$

Com $0 < \lambda < 1$ i $d(p, q) \geq 0$, $d(p, q) = 0$.

Veiem ara que \mathcal{F} té un punt fix. Sigui $q_0 \in \mathcal{X}$. Consideren la successió $q_j = \mathcal{F}(q_{j-1})$, $j \geq 1$. Afirmem que és una successió de Cauchy. En efecte, per a qualsevol $n, k \geq 1$,

$$\begin{aligned} d(q_{n+k}, q_n) &\leq \sum_{j=1}^k d(q_{n+j}, q_{n+j-1}) = \sum_{j=1}^k d(\mathcal{F}^{n+j}(q_0), \mathcal{F}^{n+j-1}(q_0)) \\ &\leq \lambda^n \sum_{j=1}^k \lambda^{j-1} d(\mathcal{F}(q_0), q_0) \leq d(\mathcal{F}(q_0), q_0) \frac{\lambda^n}{1 - \lambda}, \end{aligned}$$

que tendeix a 0 quan $n, k \rightarrow \infty$. Com la successió $(q_k)_k$ és de Cauchy i \mathcal{X} és complet, té límit, p . Com \mathcal{F} és contínua, es compleix que

$$p = \lim_{k \rightarrow \infty} x_k = \lim_{k \rightarrow \infty} \mathcal{F}(x_{k-1}) = \mathcal{F}(\lim_{k \rightarrow \infty} x_{k-1}) = \mathcal{F}(p).$$

□

El següent lema ens serà útil.

Lema 3.7. *Siguin \mathcal{X} , un espai mètric complet, i $\mathcal{F} : \mathcal{X} \rightarrow \mathcal{X}$. Si existeix $k \geq 1$ tal que \mathcal{F}^k és una contracció, llavors \mathcal{F} té un únic punt fix.*

Demostració. Sigui p , l'únic punt fix de \mathcal{F}^k . Llavors

$$\mathcal{F}(p) = \mathcal{F}(\mathcal{F}^k(p)) = \mathcal{F}^{k+1}(p) = \mathcal{F}^k(\mathcal{F}(p))$$

és també punt fix de \mathcal{F}^k . Com el punt fix de \mathcal{F}^k és únic, $\mathcal{F}(p) = p$. Si \mathcal{F} tingués un altre punt fix, q , també ho seria de \mathcal{F}^k i, per tant, $q = p$. \square

3.1.3 El teorema de Picard

Definició 3.8. *Sigui $f : U \subset \mathbb{R} \times \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n : (t, x) \mapsto f(t, x)$, una funció. Direm que f és Lipschitz respecte a x si existeix $L > 0$ tal que $\|f(t, x) - f(t, \tilde{x})\| \leq L\|x - \tilde{x}\|$, per a tot $(t, x), (t, \tilde{x}) \in U$. A qualsevol constant L satisfent aquesta propietat li direm constant de Lipschitz de f .*

Observem que si el conjunt $U \subset \mathbb{R} \times \mathbb{R}^n$ satisfà que el segment que uneix $(t, x), (t, \tilde{x}) \in U$ està inclòs a U , per tot $(t, x), (t, \tilde{x}) \in U$, i $f : U \subset \mathbb{R} \times \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ és de classe C^1 en U amb

$$\sup_{(t,x) \in U} \left\| \frac{\partial f}{\partial x}(t, x) \right\| < \infty,$$

llavors f és Lipschitz respecte a x en U . En particular, si a més U és compacte, llavors f és Lipschitz respecte a x en U .

Exercici 3.1. *Proveu les afirmacions anteriors. Recordeu que, si el segment que uneix $(t, x), (t, \tilde{x}) \in U$ està inclòs a U i $f : U \rightarrow \mathbb{R}^n$ és de classe C^1 ,*

$$f(t, x) - f(t, \tilde{x}) = \int_0^1 \frac{\partial f}{\partial x}(t, \tilde{x} + s(x - \tilde{x})) ds (x - \tilde{x}).$$

En efecte, només cal tenir en compte que, per la regla de la cadena,

$$\frac{d}{ds}[f(t, \tilde{x} + s(x - \tilde{x}))] = \frac{\partial f}{\partial x}(t, \tilde{x} + s(x - \tilde{x}))(x - \tilde{x})$$

i integrar entre $s = 0$ i $s = 1$.

Teorema 3.9 (Teorema de Picard). *Donats $t_0 \in \mathbb{R}$, $x_0 \in \mathbb{R}^n$, $a, b > 0$, considerem el conjunt compacte $V_{a,b} = I_a(t_0) \times \bar{B}_b(x_0) \subset \mathbb{R} \times \mathbb{R}^n$, on*

$$\begin{aligned} I_a(t_0) &= [t_0 - a, t_0 + a], \\ \bar{B}_b(x_0) &= \{x \in \mathbb{R}^n \mid \|x - x_0\| \leq b\}. \end{aligned}$$

Siguin $f : V_{a,b} \rightarrow \mathbb{R}^n$ una funció contínua i Lipschitz respecte a x i $M \geq \|f\| = \max_{(t,x) \in V_{a,b}} \|f(t, x)\|$. Llavors, el problema de valor inicial

$$\left. \begin{aligned} \dot{x} &= f(t, x), \\ x(t_0) &= x_0, \end{aligned} \right\}$$

té una única solució $\varphi : I_\alpha(t_0) = [t_0 - \alpha, t_0 + \alpha] \rightarrow \mathbb{R}^n$, on $\alpha = \min\{a, b/M\}$.

Comentari 3.10. *Observeu que l'interval de definició de la solució depèn de la fita de la funció f i de la mida del domini de f però no en depèn de la constant de Lipschitz.*

Demostració. Sigui \mathcal{F} l'operador definit a (3.3). Per la Proposició 3.1, trobar una solució φ del p.v.i. és equivalent a trobar una funció φ tal que $\varphi = \mathcal{F}(\varphi)$, és a dir, un punt fix de l'operador \mathcal{F} . Per a veure que \mathcal{F} té un únic punt fix, provarem que \mathcal{F} està ben definit en un espai mètric adient i que existeix $k > 1$ tal que \mathcal{F}^k és una contracció. El Lema 3.7 ens donarà l'existència i unicitat del punt fix.

Considerem l'espai mètric

$$\bar{\mathcal{B}}_{\alpha,b} = \{\varphi \in C(I_\alpha(t_0), \mathbb{R}^n) \mid \|\varphi - x_0\| \leq b\} \subset C(I_\alpha(t_0), \mathbb{R}^n) \quad (3.6)$$

on $\|\varphi\| = \sup_{t \in I_\alpha(t_0)} \|\varphi(t)\|$. Provem que $\mathcal{F} : \bar{\mathcal{B}}_{\alpha,b} \rightarrow \bar{\mathcal{B}}_{\alpha,b}$ està ben definit. Sigui $\varphi \in \bar{\mathcal{B}}_{\alpha,b}$. Com $\|\varphi - x_0\| \leq b$, fent servir (3.5), per a tot $t \in I_\alpha(t_0)$ es compleix

$$\|\varphi(t) - x_0\| \leq \|\varphi - x_0\| \leq b \implies (t, \varphi(t)) \in I_\alpha(t_0) \times \bar{B}_b(x_0).$$

Com $I_\alpha(t_0) \subset I_a(t_0)$, perquè $\alpha \leq a$, això implica que la funció $f(t, \varphi(t))$ està ben definida per a tot $t \in I_\alpha(t_0)$ si $\varphi \in \bar{\mathcal{B}}_{\alpha,b}$. A més, com φ és contínua a $I_\alpha(t_0)$, $f(t, \varphi(t))$ també ho és. Llavors,

$$\mathcal{F}(\varphi)(t) = x_0 + \int_{t_0}^t f(s, \varphi(s)) ds$$

és contínua a $I_\alpha(t_0)$. Ens falta veure que $\mathcal{F}(\varphi) \in \bar{\mathcal{B}}_{\alpha,b}$. Tenim que, com $\|f(s, x)\| \leq M$, si $(s, x) \in I_a(t_0) \times \bar{B}_b(x_0)$, per a tot $t \in I_\alpha(t_0)$

$$\begin{aligned} \|\mathcal{F}(\varphi)(t) - x_0\| &= \left\| \int_{t_0}^t f(s, \varphi(s)) ds \right\| \\ &\leq \left| \int_{t_0}^t \|f(s, \varphi(s))\| ds \right| \leq M|t - t_0| \leq M\alpha \leq b, \end{aligned}$$

el que implica que $\|\mathcal{F}(\varphi) - x_0\| \leq b$. Això prova que l'operador $\mathcal{F} : \bar{\mathcal{B}}_{\alpha,b} \rightarrow \bar{\mathcal{B}}_{\alpha,b}$ està ben definit.

Veiem que existeix $k \geq 1$ tal que \mathcal{F}^k és una contracció. Sigui $L > 0$ una constant de Lipschitz de f . Afirmem primer que, per a tot $k \geq 1$, per a qualsevol parell $\varphi, \tilde{\varphi} \in \bar{\mathcal{B}}_{\alpha,b}(x_0)$, i per a tot $t \in I_\alpha(t_0)$

$$\|\mathcal{F}^k(\varphi)(t) - \mathcal{F}^k(\tilde{\varphi})(t)\| \leq \frac{L^k}{k!} |t - t_0|^k \|\varphi - \tilde{\varphi}\|. \quad (3.7)$$

Suposem que hem provat (3.7). Prenent suprems a $I_\alpha(t_0)$ ens queda

$$\|\mathcal{F}^k(\varphi) - \mathcal{F}^k(\tilde{\varphi})\| \leq \frac{(L\alpha)^k}{k!} \|\varphi - \tilde{\varphi}\|.$$

Com $(L\alpha)^k/k! \xrightarrow{k \rightarrow \infty} 0$, existeix k tal que $0 \leq (L\alpha)^k/k! < 1$. Llavors, \mathcal{F}^k és una contracció. Pel Lema 3.7, \mathcal{F} té un únic punt fix, que és l'única solució del p.v.i. considerat.

Només ens falta provar (3.7). Ho farem per inducció. Observem que la desigualtat és trivial per a $k = 0$, perquè $\mathcal{F}^0 = \text{Id}$. Suposem (3.7) cert per $k - 1$. Llavors, fent servir que f és Lipschitz amb constant de Lipschitz L i la hipòtesi d'inducció,

$$\begin{aligned} \|\mathcal{F}^k(\varphi)(t) - \mathcal{F}^k(\tilde{\varphi})(t)\| &= \left\| \int_{t_0}^t (f(s, \mathcal{F}^{k-1}(\varphi)(s)) - f(s, \mathcal{F}^{k-1}(\tilde{\varphi})(s))) ds \right\| \\ &\leq \int_{t_0}^t L \|\mathcal{F}^{k-1}(\varphi)(s) - \mathcal{F}^{k-1}(\tilde{\varphi})(s)\| ds \\ &\leq \int_{t_0}^t \frac{L^k}{(k-1)!} |s - t_0|^{k-1} \|\varphi - \tilde{\varphi}\| ds \\ &= \frac{L^k}{k!} |t - t_0|^k \|\varphi - \tilde{\varphi}\|. \end{aligned}$$

□

Corol·lari 3.11. *Siguin $U \subset \mathbb{R} \times \mathbb{R}^n$, un conjunt obert, i $f : U \rightarrow \mathbb{R}^n$ una funció tal que $\partial f / \partial x$ és contínua a U . Per a tot punt $(t_0, x_0) \in U$, existeix un entorn tancat $V = I(t_0) \times \bar{B}(x_0) \subset U$ tal que el p.v.i. $\dot{x} = f(t, x)$, $x(t_0) = x_0$ té una única solució $x : I(t_0) \rightarrow \bar{B}(x_0)$.*

Demostració. Sigui $(t_0, x_0) \in U$. Com U és obert, existeix un entorn compacte de (t_0, x_0) de la forma $I_\alpha(t_0) \times \bar{B}_b(x_0) \subset U$. El Teorema 3.9 assegura que el p.v.i. $\dot{x} = f(t, x)$, $x(t_0) = x_0$ té una única solució $x : I_\alpha(t_0) \rightarrow \bar{B}(x_0)$, on $\alpha = \min\{a, b/M\}$ i $M = \max_{(t,x) \in I_\alpha(t_0) \times \bar{B}_b(x_0)} \|f(t, x)\|$. Només cal prendre $I(t_0) = I_\alpha(t_0)$. □

La tècnica del punt fix ens permet obtenir variacions del Teorema de Picard, modificant-ne les hipòtesis. La proposició següent n'és un exemple. Ens serà útil per a tractar sistemes lineals.

Proposició 3.12. *Siguin $I = [a, b] \subset \mathbb{R}$, un interval compacte, i $f : I \times \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$, una funció contínua i Lipschitz respecte a x . Llavors, per a qualssevol $t_0 \in I$, $x_0 \in \mathbb{R}^n$, el problema de valor inicial*

$$\left. \begin{aligned} \dot{x} &= f(t, x), \\ x(t_0) &= x_0, \end{aligned} \right\}$$

té una única solució $\varphi : I \rightarrow \mathbb{R}^n$.

Demostració. Considerem l'espai $C(I, \mathbb{R}^n)$, amb la norma del suprem. Com f és contínua a $I \times \mathbb{R}^n$, si $\varphi \in C(I, \mathbb{R}^n)$, $\mathcal{F}(\varphi) \in C(I, \mathbb{R}^n)$, on $\mathcal{F}(\varphi)(t) = x_0 + \int_{t_0}^t f(s, \varphi(s)) ds$ és l'operador definit a (3.3). En efecte, només cal observar que la funció $f(t, \varphi(t))$ està ben definida i és contínua a I perquè és composició de funcions contínues.

Per acabar la prova, tenint en compte el Teorema 3.6 i el Lemma 3.7, només ens cal veure que, per a algun $k \geq 1$, \mathcal{F}^k és una contracció. Per a fer-ho, observem que, com f és Lipschitz amb constant de Lipschitz L , la desigualtat (3.7) també és vàlida en aquest cas. Llavors, amb un raonament anàleg al de la prova del Teorema 3.9, es compleix que, per a tot parell $\varphi, \tilde{\varphi} \in C(I, \mathbb{R}^n)$

$$\|\mathcal{F}^k(\varphi) - \mathcal{F}^k(\tilde{\varphi})\| \leq \frac{(L \text{llarg}(I))^k}{k!} \|\varphi - \tilde{\varphi}\|,$$

on $\text{llarg}(I) = b-a$ és la llargària de l'interval I . Prenent k tal que $(L \text{llarg}(I))^k/k! < 1$, tenim que \mathcal{F}^k és una contracció. Així queda provat el teorema. \square

Ara farem servir aquesta darrera proposició per a provar que tot p.v.i. associats a sistemes lineals amb coeficients definits en un interval obert I té una única solució definida a tot I .

Corol·lari 3.13 (Teorema 2.8). *Siguin $I \subset \mathbb{R}$, un interval obert, $A \in C(I, \mathcal{M}_{n \times n}(\mathbb{R}))$ i $b \in C(I, \mathbb{R}^n)$. Llavors, per a tot $(t_0, x_0) \in I \times \mathbb{R}^n$, el p.v.i. $\dot{x} = A(t)x + b(t)$, $x(t_0) = x_0$ té una única solució $\varphi : I \rightarrow \mathbb{R}^n$.*

Demostració. Sigui $f(t, x) = A(t)x + b(t)$. Considerem una norma qualsevol a \mathbb{R}^n i la seva norma matricial associada, $\|\cdot\|$. Sigui $(I_n)_n$ una seqüència d'interval·ls compactes tals que $t_0 \in I_1$, $I_n \subset I_{n+1}$, per tot $n \geq 1$, i $\bigcup_{n \geq 1} I_n = I$. Sigui $L_n = \max_{t \in I_n} \|A(t)\|$. Per a $(t, x), (t, \tilde{x}) \in I_n \times \mathbb{R}^n$, es compleix que

$$\|f(t, x) - f(t, \tilde{x})\| = \|A(t)(x - \tilde{x})\| \leq \|A(t)\| \|x - \tilde{x}\| \leq L_n \|x - \tilde{x}\|.$$

Per tant, f satisfà les hipòtesis de la Proposició 3.12 a $I_n \times \mathbb{R}^n$. Sigui $\varphi_n : I_n \rightarrow \mathbb{R}^n$ l'única solució del p.v.i. a I_n donada per la Proposició 3.12. Es compleix que si $t \in I_k \cap I_\ell$, llavors $\varphi_k(t) = \varphi_\ell(t)$. En efecte, si $k \leq \ell$, com $I_k \subset I_\ell$, φ_k i $\varphi_\ell|_{I_k}$ són dues solucions del p.v.i. definides a I_k . Per la unicitat donada per la Proposició 3.12, han de coincidir. D'aquesta manera, la funció $\varphi : (a, b) \rightarrow \mathbb{R}^n$, on $\varphi(t) = \varphi_n(t)$, si $t \in I_n$, és l'única solució del p.v.i. definida a (a, b) . \square

Amb el mateix argument podeu provar corol·lari de la Proposició 3.12 següent.

Corol·lari 3.14. *Sigui $f : (a, b) \times \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$, una funció contínua i Lipschitz respecte a x . Llavors, per a qualsevol $t_0 \in (a, b)$, $x_0 \in \mathbb{R}^n$, el problema de valor inicial*

$$\left. \begin{aligned} \dot{x} &= f(t, x), \\ x(t_0) &= x_0, \end{aligned} \right\}$$

té una única solució $\varphi : (a, b) \rightarrow \mathbb{R}^n$.

Exercici 3.2. *Proveu el Corol·lari 3.14, aplicant el raonament del Corol·lari 3.13.*

Exemple 3.3. *Considereu el sistema autònom que descriu el pèndol,*

$$\begin{cases} \dot{x} = y \\ \dot{y} = -\sin x. \end{cases}$$

Comproveu que satisfà les hipòtesis de la Proposició 3.14 amb constant de Lipschitz $L = 1$. Per tant, qualsevol $(t_0, x_0, y_0) \in \mathbb{R} \times \mathbb{R}^2$, hi ha una única solució del sistema, $(x(t), y(t))$, tal que $(x(t_0), y(t_0)) = (x_0, y_0)$ definida per a tot $t \in \mathbb{R}$.

Comentari 3.15. *Observeu que la hipòtesi de que f sigui Lipschitz a tot $I \times \mathbb{R}^n$ de la Proposició 3.12 és molt restrictiva i imposa, de fet, que el creixement de $\|f\|$ quan $\|x\|$ tendeix a infinit pot ser, com a molt, lineal. Així, si considereu l'e.d.o. $\dot{x} = x^2$, si bé satisfà les hipòtesis del Teorema 3.9 per a qualsevol p.v.i. associat, no és Lipschitz a \mathbb{R} : la constant de Lipschitz a un conjunt U de la funció $f(x) = x^2$ només es pot fitar pel $\sup_{x \in U} |f'(x)| = \sup_{x \in U} |2x|$. Si U no està fitada, $f|_U$ no té pas perquè ser Lipschitz. Això implica que, si bé tot p.v.i.*

associat té solució única, aquesta no té pas perquè estar definida a tot \mathbb{R} . De fet, això és el que passa, doncs la solució de $\dot{x} = x^2$, $x(0) = x_0$ és

$$\varphi(t) = \frac{x_0}{1 - x_0 t},$$

que està definida a $(-\infty, 1/x_0)$, si $x_0 > 0$, a $(1/x_0, \infty)$, si $x_0 < 0$ i només està definida a \mathbb{R} si $x_0 = 0$. Per tant, totes les solucions diferents de 0 de $\dot{x} = x^2$ arriben a ∞ en temps finit.

3.1.4 El teorema de Peano

En la secció anterior hem donat condicions sobre una funció $f(t, x)$ per a que els p.v.i. associats a l'e.d.o. $\dot{x} = f(t, x)$ tinguin solució i aquesta sigui única. Què en podem dir si afeblim aquestes condicions? El següent exemple ens en dona una pista.

Exemple 3.4. Sigui $f(x) = x^{2/3}$. És contínua a \mathbb{R} . Considerem el p.v.i.

$$\left. \begin{array}{l} \dot{x} = f(x) \\ x(0) = 0. \end{array} \right\}$$

Observeu que, com

$$|f(x) - f(0)| = |x^{2/3} - 0| = \frac{1}{|x|^{1/3}}|x - 0|,$$

f no és Lipschitz respecte a x en cap interval que contingui $x = 0$. És immediat comprovar que, donats $t_0 < 0 < t_1$, la funció

$$\varphi(t) = \begin{cases} 3^{-3}(t - t_0)^3, & \text{si } t < t_0, \\ 0, & \text{si } t_0 \leq t \leq t_1, \\ 3^{-3}(t - t_1)^3, & \text{si } t > t_1, \end{cases}$$

és solució del p.v.i..

L'exemple anterior ens mostra que si la funció que defineix l'e.d.o. no és Lipschitz, la unicitat no està garantida.

Teorema 3.16 (Teorema de Peano). Donats $t_0 \in \mathbb{R}$, $x_0 \in \mathbb{R}^n$, $a, b > 0$, considerem el conjunt compacte $V_{a,b} = I_a(t_0) \times \bar{B}_b(x_0) \subset \mathbb{R} \times \mathbb{R}^n$, on

$$\begin{aligned} I_a(t_0) &= [t_0 - a, t_0 + a], \\ \bar{B}_b(x_0) &= \{x \in \mathbb{R}^n \mid \|x - x_0\| \leq b\}. \end{aligned}$$

Sigui $f : V_{a,b} \rightarrow \mathbb{R}^n$ una funció contínua. Sigui M tal que $\max_{(t,x) \in V_{a,b}} \|f(t, x)\| < M$. Llavors el problema de valor inicial

$$\left. \begin{array}{l} \dot{x} = f(t, x), \\ x(t_0) = x_0, \end{array} \right\}$$

té al menys una solució $\varphi : I_\alpha(t_0) = [t_0 - \alpha, t_0 + \alpha] \rightarrow \mathbb{R}^n$, on $\alpha = \min\{a, b/M\}$.

Demostració. Com en el cas del Teorema de Picard, la prova consisteix en veure que l'equació de punt fix $\varphi = \mathcal{F}(\varphi)$, on \mathcal{F} és l'operador definit a (3.3), té almenys una solució. En aquest cas, no hi ha esperança de provar que l'operador és contractiu. Si ho fos, el punt fix seria únic, però l'Exemple 3.4 mostra que, si f és només contínua, els p.v.i. associats poden tenir més d'una solució.

Com f és contínua i $V_{a,b}$ és compacte, existeix una successió $(f_k)_k$ de polinomis que convergeix uniformement cap a f a $V_{a,b}$. Com $(f_k)_k$ és uniformement convergent, existeix k_0 tal que si $k \geq k_0$, $\max_{(t,x) \in V_{a,b}} \|f_k(t,x)\| < M$. Com f_k és un polinomi, és de classe C^∞ i, en particular, satisfà les hipòtesis del Teorema 3.9. Per tant, el p.v.i. $\dot{x} = f_k(t,x)$, $x(t_0) = x_0$ té una única solució $\varphi_k : I_\alpha(t_0) \rightarrow \bar{B}_b(x_0)$. Afirmem que la successió $(\varphi_k)_k$ és una successió equiacotada i equicontínua. En efecte, com

$$\varphi_k(t) = x_0 + \int_{t_0}^t f_k(s, \varphi_k(s)) ds,$$

tenim que, primer,

$$\|\varphi_k(t)\| \leq \|x_0\| + \left\| \int_{t_0}^t f_k(s, \varphi_k(s)) ds \right\| \leq \|x_0\| + M|t - t_0| \leq \|x_0\| + Ma$$

i, segon,

$$\|\varphi_k(t) - \varphi_k(\tilde{t})\| = \left\| \int_{\tilde{t}}^t f_k(s, \varphi_k(s)) ds \right\| \leq M|t - \tilde{t}|.$$

Pel Teorema d'Ascoli-Arzelà, $(\varphi_k)_k$ té una parcial uniformement convergent, $(\varphi_{k_i})_i$, amb límit φ . Comprovem que φ és solució del p.v.i. $\dot{x} = f(t,x)$, $x(t_0) = x_0$. En efecte, tenim que, com f_{k_i} convergeix uniformement cap a f ,

$$\varphi(t) = \lim_{i \rightarrow \infty} \varphi_{k_i}(t) = \lim_{i \rightarrow \infty} x_0 + \int_{t_0}^t f_{k_i}(s, \varphi_{k_i}(s)) ds = x_0 + \int_{t_0}^t f(s, \varphi(s)) ds.$$

□

Corol·lari 3.17. *Siguin $U \subset \mathbb{R} \times \mathbb{R}^n$, un conjunt obert, i $f : U \rightarrow \mathbb{R}^n$, una funció contínua. Siguin $U_1 \subset U_2 \subset U$ tals que $d(U_1, U \setminus U_2) > 0$ i $\sup_{(t,x) \in U_2} \|f(t,x)\| < M < \infty$. Llavors existeix $\alpha > 0$ tal que per a qualsevol $(t_0, x_0) \in U_1$, el p.v.i. $\dot{x} = f(t,x)$, $x(t_0) = x_0$ té una solució $\varphi : I_\alpha(t_0) \rightarrow \mathbb{R}^n$ tal que $\text{graf}(\varphi) \subset U_2$.*

Demostració. Sigui $0 < a < d(U_1, U \setminus U_2)$. Donat $(t_0, x_0) \in U_1$, considerem $V_{a,a} = I_a(t_0) \times \bar{B}_a(x_0) \subset U_2$ i $\alpha = \min\{a, a/M\}$ al Teorema 3.16. Sigui $\varphi : I_\alpha(t_0) \rightarrow \mathbb{R}^n$, la solució que el teorema proporciona. □

3.1.5 Solucions maximals

Els Teoremes de Picard i Peano ens donen l'existència de solucions de p.v.i. d'e.d.o.'s de la forma $\dot{x} = f(t,x)$ sota certes condicions sobre f . Ara bé, l'interval de definició d'aquestes solucions és petit. Només és gran si es compleixen condicions globals força estrictes, com les de la Proposició 3.12 o el Corol·lari 3.13. Per altra banda, en vista de l'exemple al Comentari 3.15, les solucions d'una e.d.o., encara que aquesta vingui definida per una funció molt regular, com un polinomi, poden estar definides només en intervals acotats, arribant a infinit en temps finit.

Proposició 3.18. *Siguin $U \subset \mathbb{R} \times \mathbb{R}^n$, un conjunt obert, i $f : U \rightarrow \mathbb{R}^n$, una funció contínua. Suposem que per a tot $(t_0, x_0) \in U$, el p.v.i.*

$$\dot{x} = f(t, x), \quad x(t_0) = x_0, \quad (3.8)$$

té una única solució, definida en un interval I_{t_0, x_0} obert. Llavors, per a tot $(t_0, x_0) \in U$, existeix una única solució φ de (3.8) definida en un interval $(\omega_-(t_0, x_0), \omega_+(t_0, x_0))$ satisfent la propietat següent. Si ψ és una altra solució de (3.8), definida a un interval obert I_ψ , llavors $I_\psi \subset (\omega_-(t_0, x_0), \omega_+(t_0, x_0))$ i $\psi = \varphi|_{I_\psi}$.

Definició 3.19. *Direm que funció φ , definida en un interval I que anomenarem interval maximal, és una solució maximal de $\dot{x} = f(t, x)$ si per a qualsevol altre solució $\tilde{\varphi}$ definida en un interval \tilde{I} tal que $I \subset \tilde{I}$ i $\varphi = \tilde{\varphi}|_I$ es compleix que $\tilde{I} = I$.*

Si una funció f satisfà les hipòtesis de la Proposició 3.18 en $U \subset \mathbb{R} \times \mathbb{R}^n$, per tot punt $(t_0, x_0) \in U$ passa una única solució maximal.

Comentari 3.20. *Segons el Teorema de Picard, la hipòtesi de que, per a tot $(t_0, x_0) \in U$, el p.v.i. (3.8) tingui solució única es satisfà si f és contínua i localment Lipschitz respecte a x a U , és a dir, si per a tot $(t_0, x_0) \in U$, existeix un entorn de (t_0, x_0) on f és contínua i Lipschitz respecte a x . Recordem que si f i $\partial f / \partial x$ són contínues a U , f és contínua i localment Lipschitz respecte a x a U .*

Demostració de Proposició 3.18. Sigui $(\omega_-(t_0, x_0), \omega_+(t_0, x_0)) = \cup_\psi I_\psi$, on ψ és una solució de (3.8) definida a I_ψ . Definim $\varphi(t) = \psi(t)$, si $t \in I_\psi$. Veiem que la definició no depèn de la funció ψ escollida. Per a veure-ho, considerem ψ i $\tilde{\psi}$, solucions de (3.8) definides a I_ψ i $I_{\tilde{\psi}}$, respectivament. Afirmem que $\psi(t) = \tilde{\psi}(t)$, si $t \in I_\psi \cap I_{\tilde{\psi}}$. En efecte, com I_ψ i $I_{\tilde{\psi}}$ són intervals, la seva intersecció és un interval, que és un conjunt connex. Sigui $J = \{t \in I_\psi \cap I_{\tilde{\psi}} \mid \psi(t) = \tilde{\psi}(t)\}$. Es compleix que $J \neq \emptyset$, perquè $t_0 \in J$, i que J és tancat, perquè $J = (\psi - \tilde{\psi})^{-1}(0)$ i $\psi - \tilde{\psi}$ és una funció contínua. A més, J és obert, perquè si $s \in J$, com $\psi(s) = \tilde{\psi}(s) = x_s$, les funcions ψ i $\tilde{\psi}$ són solució del p.v.i. $\dot{x} = f(t, x)$, $x(s) = x_s$. Com aquest p.v.i. té una única solució, definida en un interval obert I_{s, x_s} , ψ i $\tilde{\psi}$ coincideixen en $I_{s, x_s} \cap (I_\psi \cap I_{\tilde{\psi}})$. Com J és no buit, tancat i obert alhora en un $I_\psi \cap I_{\tilde{\psi}}$, que és connex, $J = I_\psi \cap I_{\tilde{\psi}}$. \square

Teorema 3.21. *Siguin $U \subset \mathbb{R} \times \mathbb{R}^n$, un conjunt obert, i $f : U \rightarrow \mathbb{R}^n$, una funció contínua. Si φ és una solució maximal única de $\dot{x} = f(t, x)$ definida en un interval maximal (ω_-, ω_+) , llavors $(t, \varphi(t)) \xrightarrow[t \rightarrow \omega_\pm]{} \partial U$, és a dir, per a tot $K \subset U$, compacte, existeixen entorns V_\pm de ω_\pm tals que $\varphi(t) \notin K$, si $t \in V_\pm \cap (\omega_-, \omega_+)$.*

Demostració. Farem l'argument a prop d' ω_+ . L'argument a ω_- és anàleg.

Suposem que existeix un compacte $K \subset U$ i una successió $t_k \in (\omega_-, \omega_+)$ amb $\lim_{k \rightarrow \infty} t_k = \omega_+$ satisfent $(t_k, \varphi(t_k)) \in K$, per a tot k . Com K és compacte, la successió $(t_k, \varphi(t_k))$ té una parcial convergent, és a dir, existeix una parcial de $(t_k)_k, (\varphi(t_k))_k$, tal que $\lim_{j \rightarrow \infty} (t_{k_j}, \varphi(t_{k_j})) = (\omega_+, x_0) \in K$. Com $K \subset U$, existeix un entorn compacte de (ω_+, x_0) , $V_{a,b}(\omega_+, x_0) = I_a(\omega_+) \times B_b(x_0) \subset U$. Existeix

$M > 0$ tal que $\max_{(t,x) \in V_{a,b}(\omega_+, x_0)} \|f(t, x)\| < M$. Com $\lim_{j \rightarrow \infty} (t_{k_j}, \varphi(t_{k_j})) = (\omega_+, x_0)$, existeix j_0 tal que si $j \geq j_0$, $(t_{k_j}, \varphi(t_{k_j})) \in V_{a/3, b/3}(t_{k_j}, \varphi(t_{k_j})) \subset V_{a,b}(\omega_+, x_0)$. El Teorema de Peano assegura que el p.v.i.

$$\dot{x} = f(t, x), \quad x(t_{k_j}) = \varphi(t_{k_j})$$

té una solució definida en $I_\alpha(t_{k_j})$, on $\alpha = \min\{a/3, b/(3M)\}$. Ara bé, φ és també solució d'aquest p.v.i. Com, per hipòtesi, aquesta solució és única, deduïm que φ està definida al menys a $I_\alpha(t_{k_j}) \cup (\omega_-, \omega_+)$. Però com t_{k_j} tendeix a ω_+ i α no depèn de j , si j és prou gran $t_{k_j} + \alpha > \omega_+$, el que contradiu que φ és una solució maximal. \square

3.2 Dependència respecte a condicions inicials i paràmetres

Segui $f(t, x, \lambda)$, amb $(t, x, \lambda) \in U \subset \mathbb{R} \times \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^p$, U obert, una funció contínua. Aquí, λ denotarà els paràmetres dels que f pot dependre. Suposem que, per a tot $(t_0, x_0, \lambda) \in U$, el p.v.i.

$$\dot{x} = f(t, x, \lambda), \quad x(t_0) = x_0$$

té una única solució. Segui $\varphi(t, t_0, x_0, \lambda)$, l'única solució maximal donada per la Proposició 3.18, definida en un interval maximal $(\omega_-(t_0, x_0, \lambda), \omega_+(t_0, x_0, \lambda))$. Sota aquestes condicions, podem definir el conjunt

$$\tilde{U} = \{(t, t_0, x_0, \lambda) \in \mathbb{R} \times \mathbb{R} \times \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^p \mid (t_0, x_0, \lambda) \in U, t \in (\omega_-(t_0, x_0, \lambda), \omega_+(t_0, x_0, \lambda))\}$$

i l'aplicació $\varphi : \tilde{U} \rightarrow \mathbb{R}^n : (t, t_0, x_0, \lambda) \mapsto \varphi(t, t_0, x_0, \lambda)$, on $\varphi(t, t_0, x_0, \lambda)$ és la solució del p.v.i. $\dot{x} = f(t, x, \lambda)$, $x(t_0) = x_0$ està ben definida.

Definició 3.22. L'aplicació φ s'anomena flux generat per l'e.d.o. $\dot{x} = f(t, x, \lambda)$.

Exercici 3.3. Suposeu les hipòtesis anteriors. Segui $(s, t_0, x_0, \lambda) \in \tilde{U}$. Llavors, per a tot t tal que $(t, t_0, x_0, \lambda) \in \tilde{U}$, es compleix

$$\varphi(t, s, \varphi(s, t_0, x_0, \lambda), \lambda) = \varphi(t, t_0, x_0, \lambda).$$

Resolució de l'Exercici 3.3. Siguin

$$\begin{aligned} \varphi_1(t) &= \varphi(t, t_0, x_0, \lambda) \\ \varphi_2(t) &= \varphi(t, s, \varphi(s, t_0, x_0, \lambda), \lambda), \end{aligned}$$

La funció φ_1 està definida perquè $(t, t_0, x_0, \lambda) \in \tilde{U}$. La funció φ_2 està definida al menys per a valors de t propers a s perquè $(s, t_0, x_0, \lambda) \in \tilde{U}$ i la Proposició 3.18. A més, com ambdues coincideixen en $t = s$ i satisfan $\dot{\varphi}_i(t) = f(t, \varphi_i(t), \lambda)$, $i = 1, 2$, ambdues coincideixen per a tot t on alguna de les dues estigui definida. \square

En aquesta secció estudiarem la dependència del flux, φ , respecte a les seves variables, (t, t_0, x_0, λ) . La resposta és simple: si la funció f que defineix l'e.d.o. és de classe C^k respecte a (t, x, λ) , llavors el flux és de classe C^k respecte a (t, t_0, x_0, λ) .

3.2.1 Continuïtat i dependència Lipschitz

Teorema 3.23. *Siguin $U \subset \mathbb{R} \times \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^p$, un conjunt obert, i $f : U \rightarrow \mathbb{R}^n$ una funció contínua. Suposem que, per a tot $(t_0, x_0, \lambda) \in U$, el p.v.i.*

$$\dot{x} = f(t, x, \lambda), \quad x(t_0) = x_0$$

té una única solució maximal, $\varphi(t, t_0, x_0, \lambda)$, definida en el seu interval de definició maximal, $(\omega_-(t_0, x_0, \lambda), \omega_+(t_0, x_0, \lambda))$.

Llavors, el conjunt

$$\tilde{U} = \{(t, t_0, x_0, \lambda) \in \mathbb{R} \times \mathbb{R} \times \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^p \mid (t_0, x_0, \lambda) \in U, t \in (\omega_-(t_0, x_0, \lambda), \omega_+(t_0, x_0, \lambda))\} \quad (3.9)$$

és un obert i $\varphi : \tilde{U} \rightarrow \mathbb{R}^n$ és contínua.

Exemple 3.5. *Considerem l'e.d.o. $\dot{x} = \lambda x^3$, on $\lambda \in \mathbb{R}$. La solució maximal $\varphi(t, t_0, x_0, \lambda)$ que en $t = t_0$ val x_0 és*

$$\varphi(t, t_0, x_0, \lambda) = \frac{x_0}{(1 - 2\lambda x_0^2(t - t_0))^{1/2}},$$

que està definida si $2\lambda x_0(t - t_0) < 1$. El conjunt \tilde{U} és doncs

$$\tilde{U} = \{(t, t_0, x_0, \lambda) \in \mathbb{R} \times \mathbb{R} \times \mathbb{R} \times \mathbb{R} \mid 2\lambda x_0^2(t - t_0) < 1\},$$

que és un conjunt obert. Clarament, φ hi és contínua.

El Teorema 3.23 serà conseqüència dels dos següents resultats auxiliars.

Lema 3.24. *Siguin X , un espai mètric compacte i $\varphi_n : X \rightarrow \mathbb{R}^n$, una seqüència equicontínua i equiacotada. Suposem que tota parcial uniformement convergent de $(\varphi_n)_n$ ho fa al mateix límit, φ . Llavors, $(\varphi_n)_n$ convergeix uniformement cap a φ .*

Demostració. Suposem que $(\varphi_n)_n$ no convergeix uniformement cap a φ . Existeix $\varepsilon > 0$ i una parcial $(\varphi_{n_k})_k$ tal que $\max_{x \in X} \|\varphi_{n_k}(x) - \varphi(x)\| > \varepsilon$. Ara bé, $(\varphi_{n_k})_k$ és una seqüència equicontínua i equiacotada. El Teorema d'Ascoli-Arzelà assegura que té una parcial convergent la qual, per hipòtesi, ha de tendir cap a φ , contradient el fet que $\max_{x \in X} \|\varphi_{n_k}(x) - \varphi(x)\| > \varepsilon$. \square

Proposició 3.25. *Siguin $U \subset \mathbb{R} \times \mathbb{R}^n$, un conjunt obert, $f_n : U \rightarrow \mathbb{R}^n$, $n \in \mathbb{N}$, funcions contínues tals que, per a tot $K \subset U$, compacte, la successió $f_n|_K$ convergeix uniformement cap a f_0 . Sigui $(t_n, x_n) \in U$, una successió tal que $\lim_{n \rightarrow \infty} (t_n, x_n) = (t_0, x_0) \in U$. Suposem que, per a tot $n \geq 0$, els p.v.i.*

$$\dot{x} = f_n(t, x), \quad x(t_n) = x_n,$$

tenen una única solució φ_n , definida en el seu interval de definició maximal $I_n = (\omega_{n,-}, \omega_{n,+})$. Sigui $[a, b] \subset I_n = (\omega_{0,-}, \omega_{0,+})$. Existeix n_0 tal que si $n \geq n_0$, $[a, b] \subset I_n$ i $\varphi_n|_{[a,b]}$ tendeix uniformement a $\varphi_0|_{[a,b]}$.

Demostració. Siguin $K_1 \subset K_2 \subset U$, compactes, $K_1 \subset \overset{\circ}{K}_2$, tals que $\text{graf}(\varphi_0|_{[a,b]}) \subset \overset{\circ}{K}_1$. Com $f_n|_{K_2}$ convergeix uniformement cap a $f_0|_{K_2}$, existeix $M > 0$ tal que $\|f_n|_{K_2}\| < M$, per a tot n . Pel Corol·lari 3.17 i la hipòtesi de la unicitat de solucions, existeix $\alpha > 0$ tal que per a tot punt $(\tilde{t}, \tilde{x}) \in K_1$, el p.v.i. $\dot{x} = f_n(t, x)$, $x(\tilde{t}) = \tilde{x}$ té una única solució φ_n definida a $\{|t - \tilde{t}| \leq \alpha\}$ i tal que $\text{graf}(\varphi_n) \subset K_2$. Sigui $0 < \tilde{\alpha} < \alpha$. Com $\lim_{n \rightarrow \infty} t_n = t_0$, existeix \tilde{n} tal que si $n \geq \tilde{n}$, φ_n està definida en $\{|t - t_0| \leq \tilde{\alpha}\}$. En efecte, si $|t - t_0| \leq \tilde{\alpha}$ i $|t_0 - t_n|$ és prou petit,

$$|t - t_n| \leq |t - t_0| + |t_0 - t_n| \leq \tilde{\alpha} + |t_0 - t_n| \leq \alpha.$$

Afirmem que la família $(\varphi_n|_{\{|t-t_0| \leq \tilde{\alpha}\}})_n$ és equicontínua i equiacotada. En efecte, com $\text{graf}(\varphi_n|_{\{|t-t_0| \leq \tilde{\alpha}\}}) \subset \text{graf}(\varphi_n|_{\{|t-t_n| \leq \alpha\}}) \subset K_2$, és equiacotada i, com

$$\|\dot{\varphi}_n(t)\| \leq \|f(t, \varphi_n(t))\| \leq M,$$

és equicontínua. A més, totes les parcials convergents ho són cap a φ_0 , perquè si (φ_{n_k}) convergeix uniformement cap a $\tilde{\varphi}$, es compleix que, per la convergència uniforme de les f_n ,

$$\begin{aligned} \tilde{\varphi}(t) &= \lim_{k \rightarrow \infty} \varphi_{n_k}(t) = \lim_{k \rightarrow \infty} \left(x_{n_k} + \int_{t_{n_k}}^t f_{n_k}(s, \varphi_{n_k}(s)) ds \right) \\ &= x_0 + \int_{t_0}^t f_0(s, \tilde{\varphi}(s)) ds, \end{aligned}$$

perquè $(t_{n_k}, x_{n_k}) \xrightarrow[k \rightarrow \infty]{} (t_0, x_0)$. Però φ_0 és l'única solució d'aquesta equació en $\{|t - t_0| \leq \tilde{\alpha}\}$. Per tant, $\tilde{\varphi} = \varphi_0$. Llavors, pel Lema 3.24, la successió original φ_n convergeix uniformement a φ_0 a $|t - t_0| \leq \tilde{\alpha}$.

Si $[a, b] \subset \{|t - t_0| \leq \tilde{\alpha}\}$, ja hem acabat. Suposem que $t_0 + \tilde{\alpha} < b$. Considerem la successió $(t_n^1, x_n^1) = (t_n + \tilde{\alpha}, \varphi_n(t_n + \tilde{\alpha}))$. Com φ_n convergeix uniformement cap a φ_0 en $\{|t - t_0| \leq \tilde{\alpha}\}$ $\lim_{n \rightarrow \infty} (t_n^1, x_n^1) = (t_0 + \tilde{\alpha}, \varphi_0(t_0 + \tilde{\alpha}))$. En particular, com $\text{graf}(\varphi_0|_{\{|t-t_0| \leq \tilde{\alpha}\}}) \subset \overset{\circ}{K}_1$, existeix n_0 tal que $(t_n^1, x_n^1) \in \overset{\circ}{K}_1$, si $n \geq n_0$. Això ens permet aplicar de nou l'argument anterior a la successió de p.v.i. $\dot{x} = f_n(t, x(t))$, $x(t_n^1) = x_n^1$. En deduïm que φ_n convergeix uniformement cap a φ_0 en $[t_0 - \tilde{\alpha}, t_0 + 2\tilde{\alpha}]$. Repetint l'argument $(b - a)/\tilde{\alpha}$ vegades, la proposició queda provada. \square

Demostració del Teorema 3.23. Veiem que \tilde{U} és obert. Sigui $(t_1, t_0, x_0, \lambda) \in \tilde{U}$, és a dir, que l'única solució del p.v.i. $\dot{x} = f(t, x)$, $x(t_0) = x_0$ està definida en un interval maximal $I_{x_0, \lambda} = (\omega_-(x_0, \lambda), \omega_+(x_0, \lambda))$ amb $t_1 \in I_{x_0, \lambda}$. Veiem que si $(\tilde{t}_1, \tilde{t}_0, \tilde{x}_0, \tilde{\lambda})$ està prou a prop de (t_1, t_0, x_0, λ) , llavors la solució del p.v.i. $\dot{x} = f(t, x)$, $x(\tilde{t}_0) = \tilde{x}_0$ està definida també a \tilde{t}_1 . En efecte, sigui $[a, b] \subset I_{x_0, \lambda}$ tal que $t_1 \in (a, b)$. Per la Proposició 3.25, si $(\tilde{t}_1, \tilde{t}_0, \tilde{x}_0, \tilde{\lambda})$ està prou a prop de (t_1, t_0, x_0, λ) , tenim que la solució del p.v.i. $\dot{x} = f(t, x)$, $x(\tilde{t}_0) = \tilde{x}_0$ està definida també a $[a, b]$ i $\tilde{t}_1 \in [a, b]$.

A més, de la mateixa proposició, tenim que

$$\lim_{(\tilde{t}_1, \tilde{t}_0, \tilde{x}_0, \tilde{\lambda}) \rightarrow (t_1, t_0, x_0, \lambda)} \varphi(\tilde{t}_1, \tilde{t}_0, \tilde{x}_0, \tilde{\lambda}) = \varphi(t_1, t_0, x_0, \lambda),$$

el que prova que φ és contínua a \tilde{U} . \square

Hem vist fins ara que si f és contínua i les solucions de l'e.d.o. $\dot{x} = f(t, x, \lambda)$ són úniques, el flux que en defineix és també continu. Ara veurem que si f , a més de contínua, és Lipschitz respecte a x , també ho serà el flux. Per a fer-ho, farem servir el següent resultat, que té un interès per si mateix. Aquí en trobareu enunciat alternatiu.

Lema 3.26 (Lema de Grönwall). *Siguin $u, v : [a, b] \rightarrow [0, \infty) \subset \mathbb{R}$, contínues. Suposem que existeix $\alpha \geq 0$ tal que*

$$u(t) \leq \alpha + \int_a^t v(s)u(s) ds, \quad t \in [a, b].$$

Llavors,

$$u(t) \leq \alpha e^{\int_a^t v(s) ds}, \quad t \in [a, b].$$

En particular, si $\alpha = 0$, $u(t) = 0$, $t \in [a, b]$.

Demostració. Suposem $\alpha > 0$. Sigui $w(t) = \alpha + \int_a^t v(s)u(s) ds$, que és de classe C^1 . Es compleix que $w(a) = \alpha$ i, com u i v són no negatives, $w(t) \geq \alpha > 0$. A més, derivant, $w' = v(t)u(t) \leq v(t)w(t)$. Com w no s'anul·la, tenim que, integrant entre a i t ,

$$\frac{w'(t)}{w(t)} \leq v(t) \implies \log w(t) - \log w(a) = \int_a^t \frac{w'(s)}{w(s)} ds \leq \int_a^t v(s) ds$$

el que prova l'afirmació si $\alpha > 0$. Si $\alpha = 0$, tenim que la hipòtesi es satisfà per a tot $\tilde{\alpha} > 0$, amb el que $u(t) \leq \tilde{\alpha} e^{\int_a^t v(s) ds}$. Com $\tilde{\alpha} > 0$ és arbitrari, tenim que $u(t) = 0$, per a tot $t \in [a, b]$. \square

La següent proposició ens dona la dependència Lipschitz respecte a condicions inicials, en el cas de que f també en depengui.

Proposició 3.27. *Siguin $U \subset \mathbb{R} \times \mathbb{R}^n$, un conjunt obert, i $f : U \rightarrow \mathbb{R}^n$ una funció contínua. Suposem que f és L -Lipschitz respecte a x . Llavors, per a qualsevol $(t_0, x_0), (t_0, \tilde{x}_0) \in U$ i qualsevol t per al qual $\varphi(t, t_0, x_0)$ i $\varphi(t, t_0, \tilde{x}_0)$ estan definits,*

$$\|\varphi(t, t_0, x_0) - \varphi(t, t_0, \tilde{x}_0)\| \leq e^{L|t-t_0|} \|x_0 - \tilde{x}_0\|.$$

Demostració. Com,

$$\begin{aligned} & \|\varphi(t, t_0, x_0) - \varphi(t, t_0, \tilde{x}_0)\| \\ &= \left\| x_0 - \tilde{x}_0 + \int_{t_0}^t (f(s, \varphi(s, t_0, x_0)) - f(s, \varphi(s, t_0, \tilde{x}_0))) ds \right\| \\ &\leq \|x_0 - \tilde{x}_0\| + \left| \int_{t_0}^t \|f(s, \varphi(s, t_0, x_0)) - f(s, \varphi(s, t_0, \tilde{x}_0))\| ds \right| \\ &\leq \|x_0 - \tilde{x}_0\| + \left| \int_{t_0}^t L \|\varphi(s, t_0, x_0) - \varphi(s, t_0, \tilde{x}_0)\| ds \right| \end{aligned}$$

prenent al Lema de Grönwall $a = t_0$, $\alpha = \|x_0 - \tilde{x}_0\|$, $u(t) = \|\varphi(t, t_0, x_0) - \varphi(t, t_0, \tilde{x}_0)\|$ i $v(t) = L$, obtenim

$$\|\varphi(t, t_0, x_0) - \varphi(t, t_0, \tilde{x}_0)\| \leq e^{L|t-t_0|} \|x_0 - \tilde{x}_0\|.$$

\square

3.2.2 Diferenciabilitat

Suposem que l'e.d.o. $\dot{x} = f(t, x, \lambda)$ defineix un flux $\varphi(t, s, x, \lambda)$, és a dir suposem que φ és l'única funció satisfent

$$\frac{d\varphi}{dt}(t, s, x, \lambda) = f(t, \varphi(t, s, x, \lambda), \lambda), \quad (3.10)$$

$$\varphi(s, s, x, \lambda) = x. \quad (3.11)$$

Suposem per un moment que podem derivar f i φ respecte a les seves variables i que podem commutar l'ordre de derivació, en el cas de que calculem derivades creuades. Llavors tindrem el següent.

1. Derivant respecte a x en (3.10), com estem suposant que podem intercanviar l'ordre de derivació, per una banda es complirà

$$\frac{\partial}{\partial x} \frac{d\varphi}{dt}(t, s, x, \lambda) = \frac{d}{dt} \frac{\partial \varphi}{\partial x}(t, s, x, \lambda)$$

i, per l'altra

$$\frac{\partial}{\partial x} (f(t, \varphi(t, s, x, \lambda), \lambda)) = \frac{\partial f}{\partial x}(t, \varphi(t, s, x, \lambda), \lambda) \frac{\partial \varphi}{\partial x}(t, s, x, \lambda).$$

2. Derivant respecte a x en (3.11), tenim que

$$\frac{\partial}{\partial x} \varphi(s, s, x, \lambda) = \frac{\partial}{\partial x} x = \text{Id}.$$

És a dir, la matriu $(\partial \varphi / \partial x)|_{(t, \varphi(t, s, x, \lambda), \lambda)}$ satisfà el p.v.i. lineal homogeni

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{dt} M(t) &= \frac{\partial f}{\partial x}(t, \varphi(t, s, x, \lambda), \lambda) M(t), \\ M(s) &= \text{Id}. \end{aligned} \right\} \quad (3.12)$$

Si, enlloc de derivar respecte a x , derivem respecte a λ , obtenim que

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \frac{\partial \varphi}{\partial \lambda}(t, s, x, \lambda) &= \frac{\partial f}{\partial x}(t, \varphi(t, s, x, \lambda), \lambda) \frac{\partial \varphi}{\partial \lambda}(t, s, x, \lambda) + \frac{\partial f}{\partial \lambda}(t, \varphi(t, s, x, \lambda), \lambda), \\ \frac{\partial}{\partial \lambda} \varphi(s, s, x, \lambda) &= 0, \end{aligned}$$

és a dir, la matriu $(\partial \varphi / \partial \lambda)|_{(t, \varphi(t, s, x, \lambda), \lambda)}$ satisfà el p.v.i. lineal no homogeni

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \Lambda(t) &= \frac{\partial f}{\partial x}(t, \varphi(t, s, x, \lambda), \lambda) \Lambda(t) + \frac{\partial f}{\partial \lambda}(t, \varphi(t, s, x, \lambda), \lambda), \\ \Lambda(s) &= 0. \end{aligned} \quad (3.13)$$

En aquesta secció veurem que les operacions de derivació són lícites i que les derivades de φ efectivament satisfan (3.12) i (3.13). Tan les primeres com les segones s'anomenen *equacions variacionals*.

En el que ve a continuació, si $f(t, x, \lambda)$ és una funció de $(t, x, \lambda) \in \mathbb{R} \times \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^m$ amb valors a \mathbb{R}^n ,

$$\partial_x f(t, x, \lambda) = D_x f(t, x, \lambda) = \frac{\partial f}{\partial x}(t, x, \lambda)$$

denotarà la matriu $n \times n$ de les derivades parcials de f respecte a x , mentre que

$$\partial_\lambda f(t, x, \lambda) = D_\lambda f(t, x, \lambda) = \frac{\partial f}{\partial \lambda}(t, x, \lambda)$$

denotarà la matriu $n \times m$ (n fileres i m columnes) de les derivades parcials de f respecte a λ , si existeixen.

Teorema 3.28. *Sigui $U \subset \mathbb{R} \times \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^m$, un conjunt obert, i $f : U \rightarrow \mathbb{R}^n$, una funció contínua tal que $\partial_x f$ és contínua en U . Sigui $\varphi(t, s, x, \lambda)$, el flux generat per l'e.d.o. $\dot{x} = f(t, x, \lambda)$, definit a l'obert $\tilde{U} \subset \mathbb{R} \times \mathbb{R} \times \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^m$ donat pel Teorema 3.23. Llavors, per a tot $(t, s, x, \lambda) \in \tilde{U}$ existeix la derivada de φ respecte a x , $\partial_x \varphi$, i és contínua a \tilde{U} . A més, $M(t) = (\partial \varphi / \partial x)|_{(t, s, x, \lambda)}$ és l'única solució del p.v.i. lineal homogeni*

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{dt} M(t) &= \frac{\partial f}{\partial x}(t, \varphi(t, s, x, \lambda), \lambda) M(t), \\ M(s) &= \text{Id}. \end{aligned} \right\} \quad (3.14)$$

Observeu que, escrivint x en coordenades, $x = (x_1, \dots, x_n)$, com $\partial \varphi / \partial x_i$ és la columna i de la matriu $\partial \varphi / \partial x$, de la fórmula (3.2.2) obtenim que

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x_i}(t, \varphi(t, s, x, \lambda), \lambda) = v_i(s),$$

on $v_i(s)$ és l'única solució del sistema lineal homogeni

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{dt} v_i(t) &= \frac{\partial f}{\partial x}(t, \varphi(t, s, x, \lambda), \lambda) v_i(t), \\ v_i(s) &= e_i, \end{aligned} \right\}$$

i e_i és l' i -èssim vector de la base canònica a \mathbb{R}^n .

Comentari 3.29. *Tal com vàrem veure a l'Exercici 3.1, sota les condicions del teorema, es compleix que*

$$f(t, x, \lambda) - f(t, \tilde{x}, \lambda) = G(t, x, \tilde{x}, \lambda)(x - \tilde{x}),$$

per a tot $(t, x, \lambda), (t, \tilde{x}, \lambda) \in U$, on

$$G(t, x, \tilde{x}, \lambda) = \int_0^1 \frac{\partial f}{\partial x}(t, \tilde{x} + s(x - \tilde{x}), \lambda) ds. \quad (3.15)$$

Com $\frac{\partial f}{\partial x}$ és contínua, G ho és també. Observeu que

$$\lim_{\tilde{x} \rightarrow x} G(t, x, \tilde{x}, \lambda) = \frac{\partial f}{\partial x}(t, x, \lambda).$$

Demostració. Sigui $(\hat{t}, \hat{s}, \hat{x}, \hat{\lambda}) \in \tilde{U}$, és a dir, la solució $\varphi(t, \hat{s}, \hat{x}, \hat{\lambda})$ de l'e.d.o. que en $t = \hat{s}$ val \hat{x} , definida per a $I_{\hat{s}, \hat{x}, \hat{\lambda}} = (\omega_-(\hat{s}, \hat{x}, \hat{\lambda}), \omega_+(\hat{s}, \hat{x}, \hat{\lambda}))$, satisfà $\hat{t} \in I_{\hat{s}, \hat{x}, \hat{\lambda}}$. Sigui $[a, b] \subset I_{\hat{s}, \hat{x}, \hat{\lambda}}$ tal que $\hat{t} \in [a, b]$. Pel Teorema 3.23, si $(\tilde{s}, \tilde{x}, \tilde{\lambda}) \in U$ està prou a prop de $(\hat{s}, \hat{x}, \hat{\lambda})$, la solució $\varphi(t, \tilde{s}, \tilde{x}, \tilde{\lambda})$ està definida a $[a, b]$. A més, el mateix teorema afirma que

$$\lim_{(\tilde{s}, \tilde{x}, \tilde{\lambda}) \rightarrow (\hat{s}, \hat{x}, \hat{\lambda})} \varphi(t, \tilde{s}, \tilde{x}, \tilde{\lambda}) = \varphi(t, \hat{s}, \hat{x}, \hat{\lambda}),$$

uniformement a $[a, b]$.

La derivada parcial de φ respecte a x_i en el punt $(\hat{t}, \hat{s}, \hat{x}, \hat{\lambda})$ és

$$\lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{h} (\varphi(\hat{t}, \hat{s}, \hat{x} + he_i, \hat{\lambda}) - \varphi(\hat{t}, \hat{s}, \hat{x}, \hat{\lambda})),$$

si aquest límit existeix. Provem que així és i que en depèn contínuament de $(\hat{t}, \hat{s}, \hat{x}, \hat{\lambda})$. Per a abreujar, anomenem

$$\Delta_i(t, \hat{s}, \hat{x}, \hat{\lambda}, h) = \frac{1}{h} \left(\varphi(t, \hat{s}, \hat{x} + he_i, \hat{\lambda}) - \varphi(t, \hat{s}, \hat{x}, \hat{\lambda}) \right), \quad t \in [a, b].$$

Amb aquesta notació,

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x_i}(\hat{t}, \hat{s}, \hat{x}, \hat{\lambda}) = \lim_{h \rightarrow 0} \Delta_i(\hat{t}, \hat{s}, \hat{x}, \hat{\lambda}, h),$$

si aquest límit existeix.

Com el flux φ està unívocament definit per

$$\frac{d}{dt} \varphi(t, s, x, \lambda) = f(t, \varphi(t, s, x, \lambda), \lambda), \quad \varphi(s, s, x, \lambda) = x,$$

fent servir el Comentari 3.29,

$$\frac{d}{dt} \Delta_i(t, \hat{s}, \hat{x}, \hat{\lambda}, h) = G(t, \varphi(t, \hat{s}, \hat{x}, \hat{\lambda}), \varphi(t, \hat{s}, \hat{x} + he_i, \hat{\lambda}), \lambda) \Delta_i(t, \hat{s}, \hat{x}, \hat{\lambda}, h),$$

on G està definida a (3.15), i, a $t = \hat{s}$,

$$\Delta_i(\hat{s}, \hat{s}, \hat{x}, \hat{\lambda}, h) = \frac{1}{h} \left(\varphi(\hat{s}, \hat{s}, \hat{x} + he_i, \hat{\lambda}) - \varphi(\hat{s}, \hat{s}, \hat{x}, \hat{\lambda}) \right) = e_i,$$

és a dir, $\Delta_i(t, \hat{s}, \hat{x}, \hat{\lambda}, h)$ és la solució del p.v.i.

$$\left. \begin{aligned} \dot{u}(t) &= G(t, \varphi(t, \hat{s}, \hat{x}, \hat{\lambda}), \varphi(t, \hat{s}, \hat{x} + he_i, \hat{\lambda}), \lambda) u(t) \\ u(\hat{s}) &= e_i. \end{aligned} \right\} \quad (3.16)$$

Tenim que la matriu G està definida a $[a, b]$ i, per la convergència uniforme de $\varphi(t, \hat{s}, \hat{x} + he_i, \hat{\lambda})$ cap a $\varphi(t, \hat{s}, \hat{x}, \hat{\lambda})$ a $[a, b]$,

$$\lim_{h \rightarrow 0} G(t, \varphi(t, \hat{s}, \hat{x}, \hat{\lambda}), \varphi(t, \hat{s}, \hat{x} + he_i, \hat{\lambda}), \lambda) = \frac{\partial f}{\partial x}(t, \varphi(t, \hat{s}, \hat{x}, \hat{\lambda}), \lambda)$$

uniformement a $[a, b]$. Llavors, el Teorema 3.23 assegura que la solució de (3.16) tendeix uniformement quan h tendeix a 0 cap a la solució de

$$\left. \begin{aligned} \dot{u}(t) &= \frac{\partial f}{\partial x}(t, \varphi(t, \hat{s}, \hat{x}, \hat{\lambda}), \lambda) u(t) \\ u(\hat{s}) &= e_i. \end{aligned} \right\} \quad (3.17)$$

Això prova que existeix

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x_i}(t, \hat{s}, \hat{x}, \hat{\lambda}) = \lim_{h \rightarrow 0} \Delta_i(t, \hat{s}, \hat{x}, \hat{\lambda}, h)$$

i que és solució de (3.17). A més, φ depèn contínuament de les seves variables i $\partial f / \partial x$ també, de nou, el Teorema 3.23 ens dona que $\frac{\partial \varphi}{\partial x_i}(t, \hat{s}, \hat{x}, \hat{\lambda})$ depèn contínuament de les seves variables. \square

Exercici 3.4. Proveu, repetint els arguments anteriors, que sota les hipòtesis del Teorema 3.28, el flux $\varphi(t, s, x, \lambda)$ és també derivable respecte a s . Proveu que $(\partial\varphi/\partial s)|_{(t,s,x,\lambda)}$ satisfà

$$\left. \begin{aligned} \dot{v}(t) &= \frac{\partial f}{\partial x}(t, \varphi(t, s, x, \lambda), \lambda)v(t), \\ v(s) &= -f(s, x). \end{aligned} \right\}$$

Comentari 3.30. Per a estudiar la diferenciabilitat respecte als paràmetres λ , en el cas de que l'e.d.o. en depengui diferenciablement, es pot enunciar i provar un teorema anàleg al Teorema 3.28. Però, de fet no cal. En efecte, si considerem l'e.d.o. $\dot{x} = f(t, x, \lambda)$, amb f satisfent les hipòtesis del Teorema 3.28 i, a més, tal que existeix $\partial f/\partial \lambda$ en U , i és contínua, podem definir una nova variable $y = (x, \lambda)$, una nova funció $F(t, y) = (f(t, y), 0)$ i la seva e.d.o. associada

$$\dot{y} = F(t, y) \iff \begin{cases} \dot{x} = f(t, x, \lambda) \\ \dot{\lambda} = 0. \end{cases}$$

La funció F satisfà les hipòtesis del Teorema 3.28 i, per tant, el seu flux depèn diferenciablement respecte a la condició inicial.

Exercici 3.5. Si anomenem $N(t) = \frac{\partial \varphi}{\partial \lambda}(t, s, x, \lambda)$, que és una matriu de m columnes i n fileres, es compleix que $N(t)$ és l'única solució de

$$\left. \begin{aligned} \dot{N}(t) &= \frac{\partial f}{\partial x}(t, \varphi(t, s, x, \lambda), \lambda)N(t) + \frac{\partial f}{\partial \lambda}(t, \varphi(t, s, x, \lambda), \lambda), \\ N(s) &= 0. \end{aligned} \right\}$$

3.2.3 Derivades d'ordre superior

Finalment, tenim el següent resultat.

Teorema 3.31. Sigui $U \subset \mathbb{R} \times \mathbb{R}^n$, un conjunt obert, i $f : U \rightarrow \mathbb{R}^n$, una funció contínua i de classe C^k respecte a x , amb $k \geq 1$, és a dir, que existeixen totes les derivades parcials de f respecte a x fins a ordre k i són contínues. Sigui $\varphi(t, s, x)$, el flux generat per l'e.d.o. $\dot{x} = f(t, x)$, definit a l'obert $\tilde{U} \subset \mathbb{R} \times \mathbb{R} \times \mathbb{R}^n$ donat pel Teorema 3.23. Llavors, φ és de classe C^k respecte a x en el seu domini.

Demostració. Ho provarem per inducció sobre k . L'afirmació és certa si $k = 1$, pel teorema 3.28.

Suposem cert que, si un sistema és de classe C^{k-1} respecte a les variables dependents, amb $k \geq 2$, el flux depèn de classe C^{k-1} respecte a les condicions inicials.

Per la hipòtesi d'inducció, tenim que φ és de classe C^{k-1} respecte a x en \tilde{U} . Com $k - 2 \geq 0$, la funció

$$\Phi(t, s, x) = \begin{pmatrix} \varphi(t, s, x) \\ \frac{\partial \varphi}{\partial x}(t, s, x) \end{pmatrix}$$

està ben definida en \tilde{U} i és, al menys, de classe C^{k-2} . Pel teorema 3.28, la funció

Φ satisfà

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}\Phi(t, s, x) &= \begin{pmatrix} \frac{d}{dt}\varphi(t, s, x) \\ \frac{d}{dt}\frac{\partial\varphi}{\partial x}(t, s, x) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f(t, \varphi(t, s, x)) \\ \frac{\partial f}{\partial x}(t, \varphi(t, s, x))\frac{\partial\varphi}{\partial x}(t, s, x) \end{pmatrix} \\ &= F\left(t, \varphi(t, s, x), \frac{\partial\varphi}{\partial x}(t, s, x)\right), \end{aligned}$$

on

$$F(t, x, X) = \begin{pmatrix} f(t, x) \\ \frac{\partial f}{\partial x}(t, x)X \end{pmatrix} \quad (3.18)$$

amb X denotant una matriu $n \times n$, i, un altre cop pel teorema 3.28,

$$\Phi(s, s, x) = \begin{pmatrix} \varphi(s, s, x) \\ \frac{\partial\varphi}{\partial x}(s, s, x) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x \\ \text{Id} \end{pmatrix}.$$

És a dir, denotant $Z = (x, X)$, Φ és solució del p.v.i.

$$\left. \begin{aligned} \dot{Z} &= F(t, Z), \\ Z(s) &= \begin{pmatrix} x \\ \text{Id} \end{pmatrix}. \end{aligned} \right\} \quad (3.19)$$

Ara bé, com f és de classe C^k , la funció F definida a (3.18) és de classe C^{k-1} . La hipòtesi d'inducció assegura que el flux generat per (3.19) és de classe C^{k-1} respecte a les condicions inicials. Ara bé, per la definició de Φ , això vol dir que tant $\varphi(t, s, x)$ com $\frac{\partial\varphi}{\partial x}(t, s, x)$ són de classe C^{k-1} respecte a x , el que implica que $\varphi(t, s, x)$ és de classe C^k respecte a x . \square

Exemple 3.6. *Sigui $U \subset \mathbb{R} \times \mathbb{R}$, obert tal que $(0, 0) \in U$, i $g : U \rightarrow \mathbb{R}$, una funció de classe C^k tal que $g(0, 0) = \frac{\partial}{\partial x}g(0, 0) = 0$ i $\frac{\partial}{\partial \lambda}g(0, 0) = 1$. Sigui $f(x, \lambda) = (1 + \lambda)x + g(x, \lambda)$, que és també de classe C^k . Considerem l'e.d.o. autònoma*

$$\dot{x} = f(x, \lambda) = (1 + \lambda)x + g(x, \lambda).$$

Observem que, per a $\lambda = 0$, una solució d'aquesta e.d.o. és $\psi(t) = 0$, per a tot t . En efecte,

$$0 = \frac{d}{dt}\psi(t) = f(\psi(t), 0) = f(0, 0) = f(\psi(t), 0).$$

Sigui $\varphi(t, x, \lambda)$ la solució de l'e.d.o. tal que $\varphi(0, x, \lambda) = x$, és a dir,

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{dt}\varphi(t, x, \lambda) &= f(\varphi(t, x, \lambda), \lambda), \\ \varphi(0, x, \lambda) &= x. \end{aligned} \right\}$$

Hem provat que φ és una funció de classe C^k (ho hem provat?). Tenim que $\varphi(t, 0, 0) = \psi(t) = 0$, per a tot t , perquè ambdues funcions són solució del mateix p.v.i.. Calculem $\frac{\partial}{\partial x}\varphi(t, 0, 0)$ i $\frac{\partial}{\partial \lambda}\varphi(t, 0, 0)$.

Tenim que $\frac{\partial}{\partial x}\varphi(t, 0, 0)$ satisfà

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{dt}\frac{\partial\varphi}{\partial x}(t, 0, 0) &= \frac{\partial f}{\partial x}(\varphi(t, 0, 0), 0)\frac{\partial\varphi}{\partial x}(t, 0, 0), \\ \frac{\partial\varphi}{\partial x}(t, 0, 0) &= 1. \end{aligned} \right\}$$

Com $\varphi(t, 0, 0) = 0$ i $\frac{\partial}{\partial x}f(\varphi(t, 0), 0) = \frac{\partial}{\partial x}f(0, 0) = 1 + \frac{\partial}{\partial x}g(0, 0) = 1$, $\frac{\partial}{\partial x}\varphi(t, 0, 0)$ satisfà

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{dt} \frac{\partial \varphi}{\partial x}(t, 0, 0) &= \frac{\partial \varphi}{\partial x}(t, 0, 0), \\ \frac{\partial \varphi}{\partial x}(t, 0, 0) &= 1. \end{aligned} \right\}$$

Per tant, $\frac{\partial}{\partial x}\varphi(t, 0, 0) = e^t$.

Tenim que $\frac{\partial}{\partial \lambda}\varphi(t, 0, 0)$ satisfà

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{dt} \frac{\partial \varphi}{\partial \lambda}(t, 0, 0) &= \frac{\partial f}{\partial x}(\varphi(t, 0), 0) \frac{\partial \varphi}{\partial \lambda}(t, 0, 0) + \frac{\partial f}{\partial \lambda}(\varphi(t, 0), 0), \\ \frac{\partial \varphi}{\partial \lambda}(t, 0, 0) &= 1. \end{aligned} \right\}$$

Com $\frac{\partial}{\partial x}g(0, 0) = 1$, tenim que $\frac{\partial}{\partial \lambda}f(0, 0) = \frac{\partial}{\partial \lambda}g(0, 0) = 1$. Llavors, $\frac{\partial}{\partial \lambda}\varphi(t, 0, 0)$ satisfà

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{dt} \frac{\partial \varphi}{\partial \lambda}(t, 0, 0) &= \frac{\partial \varphi}{\partial \lambda}(t, 0, 0) + 1, \\ \frac{\partial \varphi}{\partial \lambda}(t, 0, 0) &= 0. \end{aligned} \right\}$$

Per tant, fem servir la fórmula de variació de les constants,

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \lambda}(t, 0, 0) = e^t \int_0^t e^{-s} ds = e^t - 1.$$

En resum, hem provat que

$$\begin{aligned} \varphi(t, x, \lambda) &= \varphi(t, 0, 0) + \frac{\partial \varphi}{\partial x}(t, 0, 0)x + \frac{\partial \varphi}{\partial \lambda}(t, 0, 0)\lambda + \mathcal{O}(\|(x, \lambda)\|^2) \\ &= e^t x + (e^t - 1)\lambda + \mathcal{O}(\|(x, \lambda)\|^2). \end{aligned}$$

Observeu que el terme de l'error, $\mathcal{O}(\|(x, \lambda)\|^2)$, també depèn de t .

Exercici 3.6. En l'exemple anterior, suposeu que $k \geq 2$ i que

$$\frac{\partial^2 g}{\partial x^2}(0, 0) = 2 \frac{\partial^2 g}{\partial x \partial \lambda}(0, 0) = \frac{\partial^2 g}{\partial \lambda^2}(0, 0) = 1.$$

Calculeu $\frac{\partial^2}{\partial^2 x}\varphi(t, 0, 0)$, $\frac{\partial^2}{\partial x \partial \lambda}\varphi(t, 0, 0)$ i $\frac{\partial^2}{\partial \lambda^2}\varphi(t, 0, 0)$.

Capítol 4

Introducció a la teoria qualitativa

4.1 Sistemes autònoms, fluxos i òrbites

4.1.1 Introducció

Siguin $U \subset \mathbb{R}^n$, un conjunt obert, i $f : U \rightarrow \mathbb{R}^n$, un camp vectorial de classe C^k , amb $k \geq 1$. Considerem l'e.d.o. $\dot{x} = f(x)$. Anomenarem *flux generat per f* a la funció $\varphi(t, x)$ definida per

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{dt}\varphi(t, x) &= f(\varphi(t, x)), \\ \varphi(0, x) &= x. \end{aligned} \right\} \quad (4.1)$$

Els Teoremes 3.23 i 3.31 asseguren que el flux φ està definit en un conjunt $\tilde{U} \subset \mathbb{R} \times \mathbb{R}^n$, obert, i hi és de classe C^k com a funció de (t, x) . Perquè és cert això?

Observeu que, com el sistema és autònom, la solució del p.v.i.

$$\left. \begin{aligned} \dot{x} &= f(x), \\ x(t_0) &= x_0. \end{aligned} \right\}$$

és $\varphi(t - t_0, x_0)$, és a dir, φ ens genera totes les solucions de $\dot{x} = f(x)$.

Donat $x \in U$, l'òrbita de $\dot{x} = f(x)$ per x és

$$\mathcal{O}(x) = \{\varphi(t, x) \mid t \in (\omega_-(x), \omega_+(x))\},$$

on $(\omega_-(x), \omega_+(x))$ és l'interval de definició maximal de $\varphi(t, x)$. Recordem que

Proposició 4.1. $\mathcal{O}(x) \cap \mathcal{O}(y) \neq \emptyset$ si i només si $\mathcal{O}(x) = \mathcal{O}(y)$.

Demostració. En efecte, si $y \in \mathcal{O}(x)$, existeix τ tal que $y = \varphi(\tau, x)$. Però, llavors, $\varphi(t, y) = \varphi(t, \varphi(\tau, x)) = \varphi(t + \tau, x)$ (observeu que les tres funcions són solució del mateix p.v.i.), el que implica que $\mathcal{O}(x) = \mathcal{O}(y)$. \square

És a dir, per a cada punt x de U passa una única òrbita de $\dot{x} = f(x)$. Observeu que hi passen infinites solucions diferents: $\varphi(t - t_0, x)$, per a qualsevol t_0 .

Direm que $U \subset \mathbb{R}^n$ és l'espai de fases de l'e.d.o. $\dot{x} = f(x)$, és a dir, l'espai on viuen les òrbites de l'e.d.o.. La Proposició 4.1 assegura que per a cada punt de l'espai de fases passa una única òrbita (encara que infinites solucions diferents). L'espai de fases ampliat de $\dot{x} = f(x)$ (també podríem incloure el cas de que f depengui del temps) és $\tilde{U} \subset \mathbb{R} \times \mathbb{R}^n$. Per a cada punt de l'espai de fases ampliat passa una única solució de l'equació. El retrat de fases de l'e.d.o. $\dot{x} = f(x)$ és el dibuix de totes les seves òrbites, amb el sentit de recorregut.

4.1.2 Punts fixos i òrbites periòdiques

Les solucions més simples de les e.d.o.'s són les que són constants.

Definició 4.2. *Siguin $U \subset \mathbb{R}^n$, un conjunt obert, i $f : U \rightarrow \mathbb{R}^n$, una funció de classe C^k , amb $k \geq 1$. Direm que $p \in U$ és un punt fix o un punt crític o un punt singular de $\dot{x} = f(x)$ si $f(p) = 0$.*

Proposició 4.3. *Siguin $U \subset \mathbb{R}^n$, un conjunt obert, i $f : U \rightarrow \mathbb{R}^n$, una funció de classe C^k , amb $k \geq 1$. Sigui $p \in U$. La funció $\phi(t) = p$, per a tot t , és solució de $\dot{x} = f(x)$ si i només si p és un punt singular de f .*

Demostració. La funció $\phi(t) = p$, per a tot t , és solució de $\dot{x} = f(x)$ si i només si $0 = \dot{\phi}(t) = f(\phi(t)) = f(p)$. \square

Si p és un punt singular, $\mathcal{O}(p) = \{p\}$.

Exemple 4.1. *L'equació $\dot{x} = x(1 - x)$ té dos punts fixos, $x = 0$ i $x = 1$. Dibuixeu-ne el retrat de fases.*

Definició 4.4. *Direm que una òrbita $\mathcal{O}(p)$ de $\dot{x} = f(x)$ és periòdica si la solució per p — equivalentment, si totes les solucions per p — és periòdica.*

Proposició 4.5. *Siguin $U \subset \mathbb{R}^n$, un conjunt obert, i $f : \mathbb{R} \times U \rightarrow \mathbb{R}^n$, una funció de classe C^k , amb $k \geq 1$, T -periòdica respecte a t . Una solució ϕ de $\dot{x} = f(t, x)$ és T -periòdica si i només si existeix $t_0 \in \mathbb{R}$ tal que $\phi(t_0) = \phi(t_0 + T)$.*

Demostració. Si φ és periòdica, l'afirmació satisfà per a tot t_0 .

Suposem que $\phi(t_0) = \phi(t_0 + T)$. Provem que $\varphi(t)$ i $\varphi(t + T)$ coincideixen per a tot t . En efecte, com $\frac{d}{dt}\varphi(t + T) = \dot{\varphi}(t + T) = f(t + T, \varphi(t + T)) = f(t, \varphi(t + T))$, ambdues funcions són solució de $\dot{x} = f(t, x)$. En $t = t_0$, coincideixen. Per la unicatat de solucions, han de coincidir sempre. \square

Corol·lari 4.6. *Siguin $U \subset \mathbb{R}^n$, un conjunt obert, i $f : U \rightarrow \mathbb{R}^n$, una funció de classe C^k , amb $k \geq 1$. L'òrbita per $p \in U$ de $\dot{x} = f(x)$ és una òrbita periòdica si i només si és una corba tancada.*

Demostració. Com el sistema és autònom, és periòdic respecte a t amb qualsevol període.

Per definició, si l'òrbita és periòdica, es tancada. Si l'òrbita és tancada, vol dir que existeixen $t_0 < t_1$ tals que $\varphi(t_0, p) = \varphi(t_1, p) = \varphi(t_0 + T, p)$ amb $T = t_1 - t_0$. Per la Proposició 4.5, és periòdica. \square

L'existència d'òrbites periòdiques en una e.d.o. és sempre una qüestió interessant. A diferència de l'existència de punts fixos, que és un problema algebraic, provar l'existència d'òrbites periòdiques sovint requereix tècniques sofisticades. Un cas senzill és el següent.

Proposició 4.7. *Considerem el sistema*

$$\dot{x} = f(x) + \varepsilon g(t, x, \varepsilon), \quad (4.2)$$

on $f : U \subset \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$, U obert, és funció de classe C^k , amb $k \geq 1$ i $g : \mathbb{R} \times U \times (-a, a) \rightarrow \mathbb{R}^n$ és de classe C^k i T -periòdica respecte a t , és a dir, $g(t + T, x, \varepsilon) = g(t, x, \varepsilon)$, per a tot $t \in \mathbb{R}$. Suposem que existeix $p \in U$ tal que $f(p) = 0$.

Llavors, si $2k\pi i/T \notin \text{spec } Df(p)$, per a tot $k \in \mathbb{Z}$, existeix $\varepsilon_0 > 0$ tal que, per a tot ε satisfent $|\varepsilon| < \varepsilon_0$, el sistema (4.2) té una solució T -periòdica, $\gamma(t, \varepsilon)$, de classe C^k respecte a ε i tal que $\gamma(t, \varepsilon) = p + \mathcal{O}(\varepsilon)$, és a dir, existeix $K > 0$ tal que $\|\gamma(t, \varepsilon) - p\| \leq K|\varepsilon|$, per a tot $t \in \mathbb{R}$.

Demostració. Sigui $\varphi(t, s, x, \varepsilon)$, el flux definit per l'equació (4.2). Per la Proposició 4.5, si trobem q tal que $\varphi(T, 0, q, \varepsilon) = q$, llavors $\varphi(t, 0, q, \varepsilon)$ és una solució periòdica de (4.2).

Definim $F(x, \varepsilon) = \varphi(T, 0, x, \varepsilon) - x$. Tenim que, com la funció que defineix l'e.d.o. (4.2) és de classe C^k , F és de classe C^k , perquè φ ho és. Afirmem que

1. $F(p, 0) = 0$ i
2. $\det \frac{\partial F}{\partial x}|_{(p, 0)} \neq 0$.

Per a veure 1, observem que $\varphi(t, 0, p, 0)$ és la solució de $\dot{x} = f(x)$ amb condició inicial p en $t = 0$. Ara bé, per hipòtesi, $f(p) = 0$, el que implica que $\varphi(t, 0, p, 0) = p$, per a tot t . En particular, $F(p, 0) = \varphi(T, 0, p, 0) - p = 0$.

Per a veure 2, observem que

$$\frac{\partial F}{\partial x}(p, 0) = \frac{\partial \varphi}{\partial x}(T, 0, p, 0) - \text{Id}.$$

Per tant, $\lambda \in \text{spec } \frac{\partial}{\partial x} F|_{(p, 0)}$ si i només si $\lambda + 1 \in \text{spec } \frac{\partial \varphi}{\partial x}(T, 0, p, 0)$. Llavors tindrem que $\det \frac{\partial}{\partial x} F|_{(p, 0)} \neq 0$ si i només si tots els valors propis de $\frac{\partial \varphi}{\partial x}(T, 0, p, 0)$ són diferents d'1. Ara bé, pel Teorema 3.28,

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \frac{\partial \varphi}{\partial x}(t, 0, p, 0) &= \frac{\partial}{\partial x} (f(x) + \varepsilon g(t, x, \varepsilon))|_{(t, \varphi(t, 0, p, 0), 0)} \frac{\partial \varphi}{\partial x}(t, 0, p, 0) \\ &= \frac{\partial f}{\partial x}(\varphi(t, 0, p, 0)) \frac{\partial \varphi}{\partial x}(t, 0, p, 0) \\ &= \frac{\partial f}{\partial x}(p) \frac{\partial \varphi}{\partial x}(t, 0, p, 0) \end{aligned}$$

i

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x}(0, 0, p, 0) = \text{Id},$$

el que implica que, com $\frac{\partial f}{\partial x}(p)$ és una matriu constant,

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x}(t, 0, p, 0) = e^{t \frac{\partial f}{\partial x}(p)}.$$

Els valors propis de $e^{T \frac{\partial f}{\partial x}(p)}$ són $e^{T\mu}$, on $\mu \in \text{spec } \frac{\partial f}{\partial x}(p)$. Com, per hipòtesi, $\mu \neq 2\pi i k/T$, $k \in \mathbb{Z}$, $e^{T\mu} \neq e^{2\pi i k} = 1$. Això prova 2.

Finalment, pel teorema de la funció implícita, 1 i 2 asseguren que existeix una funció $q(\varepsilon) = p + \mathcal{O}(\varepsilon)$, de classe C^k , tal que $F(q(\varepsilon), \varepsilon) = 0$, és a dir, que $\gamma(t, \varepsilon) = \varphi(t, 0, q(\varepsilon), \varepsilon)$ és una solució T -periòdica. Observem que, com $\varphi(t, 0, x, \varepsilon)$ i $q(\varepsilon)$ són funcions de classe C^k , $\gamma(t, \varepsilon)$ també ho és. A més, $\gamma(t, 0) = \varphi(t, 0, q(0), 0) = \varphi(t, 0, p, 0) = p$. Llavors, per a tot $(t, \varepsilon) \in [0, T] \times [-\varepsilon_0, \varepsilon_0]$,

$$\|\gamma(t, \varepsilon) - p\| = \|\gamma(t, \varepsilon) - \gamma(t, 0)\| \leq \sup_{(s, \tilde{\varepsilon}) \in [0, T] \times [-\varepsilon_0, \varepsilon_0]} \left\| \frac{\partial \gamma}{\partial \varepsilon}(s, \tilde{\varepsilon}) \right\| |\varepsilon|.$$

Com $[0, T] \times [-\varepsilon_0, \varepsilon_0]$ és un compacte i γ és C^1 , existeix $K > 0$ tal que

$$\sup_{(s, \tilde{\varepsilon}) \in [0, T] \times [-\varepsilon_0, \varepsilon_0]} \left\| \frac{\partial \gamma}{\partial \varepsilon}(s, \tilde{\varepsilon}) \right\| \leq K.$$

Com $\gamma(t, \varepsilon)$ és T -periòdica, això acaba la prova. \square

4.1.3 Fluxos preservant volum

Siguin $U \subset \mathbb{R} \times \mathbb{R}^n$, un conjunt obert, i $f : U \rightarrow \mathbb{R}^n$, una funció contínua i de classe C^k respecte a x , amb $k \geq 1$. Considerem l'e.d.o. $\dot{x} = f(t, x)$. Signi $\varphi(t, \tau, x)$ el seu flux, és a dir, la funció definida per

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{dt} \varphi(t, \tau, x) &= f(t, \varphi(t, \tau, x)), \\ \varphi(t, \tau, x) &= x. \end{aligned} \right\} \quad (4.3)$$

Els Teoremes 3.23 i 3.31 asseguren que el flux φ està definit en un conjunt $\tilde{U} \subset \mathbb{R} \times \mathbb{R} \times \mathbb{R}^n$, obert, i hi és de classe C^k com a funció de (τ, x) .

Proposició 4.8. *Considereu el flux φ definit per (4.1), en les hipòtesis d'aquesta secció. Siguin $\tau \in \mathbb{R}$ i $V \subset \mathbb{R}^n$, obert, tal que $\{\tau\} \times V \subset U$. Supposem que existeix $t \in \mathbb{R}$ tal que $\varphi(t, \tau, x)$ està definit per a tot $x \in V$. Llavors, l'aplicació $\phi_{t, \tau} : V \rightarrow \phi_\tau(V)$ definida per $\phi_{t, \tau}(x) = \varphi(t, \tau, x)$ és un difeomorfisme.*

Demostració. La unicitat de solucions implica que $\phi_{t, \tau} : V \rightarrow \phi_\tau(V)$ és bijectiva. Com f és C^k respecte a x , el Teorema 3.28 implica que $\phi_{t, \tau}$ és també C^k . Només ens falta veure que la inversa és C^k . Pel teorema de la funció inversa, n'hi ha prou en veure que $\det D\phi_{t, \tau}(x) \neq 0$, per a tot $x \in V$. En efecte, com $D\phi_{t, \tau}(x) = \frac{\partial}{\partial x} \varphi(t, \tau, x)$, i, pel Teorema 3.28,

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \frac{\partial \varphi}{\partial x}(t, \tau, x) &= \frac{\partial f}{\partial x}(t, \varphi(t, \tau, x)) \frac{\partial \varphi}{\partial x}(t, \tau, x) \\ \frac{\partial \varphi}{\partial x}(\tau, \tau, x) &= \text{Id}. \end{aligned}$$

Llavors, la Fórmula de Liouville 2.16 ens diu que $\det \frac{\partial \varphi}{\partial x}(t, \tau, x)$ és solució de l'e.d.o. lineal homogènia d'ordre 1

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \det \frac{\partial \varphi}{\partial x}(t, \tau, x) &= \text{tr} \frac{\partial f}{\partial x}(t, \varphi(t, \tau, x)) \det \frac{\partial \varphi}{\partial x}(t, \tau, x) \\ \det \frac{\partial \varphi}{\partial x}(\tau, \tau, x) &= 1. \end{aligned} \quad (4.4)$$

Com la condició inicial, en $t = \tau$, és diferent de 0, tenim que $\det \frac{\partial \varphi}{\partial x}(t, \tau, x) \neq 0$, per a tot t on estigui definida l'e.d.o.. Això acaba la prova. \square

Teorema 4.9. *Considerem φ , el flux definit per $\dot{x} = f(t, x)$, sota les hipòtesis que estem suposant en aquesta secció. Suposem addicionalment que*

$$\text{divergència}_x f(t, x) = \text{traça} \frac{\partial f}{\partial x}(t, x) = 0, \quad \forall (t, x) \in U. \quad (4.5)$$

Llavors, el flux φ preserva volum, en el sentit següent. Sigui $V \subset U$, $t, \tau \in \mathbb{R}$ tal que l'aplicació $\phi_{t,\tau}$ de la Proposició 4.8 està ben definida. Llavors, per a tot conjunt mesurable $A \subset V$,

$$\text{mesura}(A) = \text{mesura}(\phi_{t,\tau}(A)).$$

Demostració. Només cal aplicar el teorema del canvi de variables i la Fórmula de Liouville 2.16. En efecte, per la Proposició 4.8, $\phi_{t,\tau} : A \mapsto \phi_{t,\tau}(A)$ és un canvi de variables. Llavors, pel teorema del canvi de variables,

$$\begin{aligned} \text{mesura}(\phi_{t,\tau}(A)) &= \int_{\phi_{t,\tau}(A)} 1 \, d\tilde{x} \\ &= \int_A |\det D\phi_{t,\tau}(x)| \, dx \\ &= \int_A \left| \det \frac{\partial \varphi}{\partial x}(t, \tau, x) \right| \, dx \end{aligned}$$

Ara bé, com el camp f té divergència nul·la, l'equació (4.4) es transforma en

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \det \frac{\partial \varphi}{\partial x}(t, \tau, x) &= 0 \\ \det \frac{\partial \varphi}{\partial x}(\tau, \tau, x) &= 1. \end{aligned}$$

Per tant, $\det \frac{\partial \varphi}{\partial x}(t, \tau, x) = 1$, per a tot t . Això acaba la prova. \square

4.2 Estabilitat en el sentit de Liapunov

4.2.1 Estabilitat de Liapunov

Definició 4.10. *Sigui $f : \mathbb{R} \times U \subset \mathbb{R} \times \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$, contínua. Sigui $\varphi(t)$ una solució de $\dot{x} = f(t, x)$, definida per a tot $t \geq 0$.*

Direm que φ és estable si, per a tot $\varepsilon > 0$, existeix $\delta > 0$ tal que si ψ és solució de $\dot{x} = f(t, x)$ i satisfà $\|\varphi(0) - \psi(0)\| < \delta$, llavors $\psi(t)$ està definida per a tot $t \geq 0$ i $\|\varphi(t) - \psi(t)\| < \varepsilon$, $t \geq 0$.

Direm que φ és asimptòticament estable si és estable i existeix $\tilde{\delta} > 0$ tal que si $\|\varphi(0) - \psi(0)\| < \tilde{\delta}$, llavors $\lim_{t \rightarrow \infty} \|\varphi(t) - \psi(t)\| = 0$.

En el cas dels sistemes lineals amb coeficients constants, ja havíem estudiat l'estabilitat de les solucions en la Proposició 2.37. Recordem que les solucions del sistema $\dot{x} = Ax$, on $A \in \mathcal{M}_{n \times n}(\mathbb{R})$ tenen el mateix caràcter d'estabilitat que la solució 0. Vàrem veure que, si tots els valors propis d' A tenen part real negativa, la solució 0 és asimptòticament estable i és inestable si A té algun valor propi amb part real positiva.

Exemple 4.2. *Si $A \in \mathcal{M}_{2 \times 2}(\mathbb{R})$, amb valors propis de la forma $\lambda = \pm ia$, $a \in \mathbb{R} \setminus \{0\}$, és a dir, un centre. L'origen és una solució estable però no asimptòticament estable. Llavors, tota solució és estable però no asimptòticament estable.*

Exemple 4.3. *El sistema lineal*

$$\begin{aligned}\dot{x} &= y \\ \dot{y} &= -x\end{aligned}\tag{4.6}$$

és un centre. Totes les solucions són estables però no asimptòticament estables. Observem que les òrbites d'aquest sistema són circumferències centrades en $(0, 0)$. Ara considerem el sistema no lineal

$$\begin{aligned}\dot{x} &= (1 + x^2 + y^2)y \\ \dot{y} &= -(1 + x^2 + y^2)x\end{aligned}\tag{4.7}$$

Les seves òrbites són les mateixes que les de (4.6). En efecte, ambdós sistemes tenen un únic punt fix, l'origen, i l'equació de les òrbites d'ambdós sistemes és la mateixa:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{\frac{dy}{dt}}{\frac{dx}{dt}} = -\frac{x}{y}.$$

Com les òrbites de (4.7) són també circumferències centrades en l'origen, l'origen és una solució estable però no asimptòticament estable de (4.7). Ara bé, a diferència del sistema (4.6), on totes les solucions són també estables, la resta de solucions de (4.7) no són estables. Per què? El motiu és simple: si bé en els dos casos, totes les solucions són periòdiques, en el primer, totes les solucions tenen el mateix període, 2π , mentre que, en el segon, el període canvia en variar l'òrbita periòdica. Això implica que les solucions són inestables.

Per a veure-ho, considerem el canvi a coordenades polars en (4.7), $x = r \cos \theta$, $y = r \sin \theta$. El sistema es transforma en

$$\begin{aligned}\dot{r} &= 0 \\ \dot{\theta} &= -(1 + r^2)\end{aligned}\tag{4.8}$$

Per tant, les solucions són $r(t) = r_0$, $\theta(t) = \theta_0 - (1 + r_0^2)t$. Sigui $\varphi_1(t) = (r_0, -(1 + r_0^2)t)$ i $\varphi_1(t) = (r_1, -(1 + r_1^2)t)$, dues solucions en els cercles de radis r_0 i r_1 , respectivament, en coordenades polars. Suposeu que $r_0 \neq r_1$. Llavors $\varphi_1(t) - \varphi_0(t) = (0, (r_0^2 - r_1^2)t)$. Com $r_0 \neq r_1$, quan $t = 2\pi/(r_0^2 - r_1^2)$, les solucions estan en punts oposats de les òrbites.

Teorema 4.11. *Sigui $B_\rho \subset \mathbb{R}^n$, la bola oberta de radi $\rho > 0$, centrada en $x = 0$, i $g : \mathbb{R} \times U \rightarrow \mathbb{R}^n$, una funció contínua. Suposem que $g(t, x) = o(x)$, uniformement en t , és a dir, que per a tot $\delta > 0$, existeix $\rho' \leq \rho$ tal que $\|g(t, x)\| \leq \delta \|x\|$, per a tot $x \in B_{\rho'}$ i $t \in \mathbb{R}$. Considerem el sistema*

$$\dot{x} = Ax + g(t, x),\tag{4.9}$$

on $A \in \mathcal{M}_{n \times n}(\mathbb{R})$. Observem que $\psi(t) = 0$, per a tot t , n'és solució. Suposem addicionalment que el sistema té solucions úniques per a tota condició inicial.

Llavors, si tots els valors propis d' A tenen part real negativa, la solució $\psi(t) = 0$ és asimptòticament estable.

Demostració. Donat $x \in B_\rho$, la solució φ de (4.9) que satisfà $\varphi(0) = x$ és l'única funció que satisfà

$$\varphi(t) = e^{tA}x + \int_0^t e^{(t-s)A}g(s, \varphi(s)) ds. \quad (4.10)$$

En efecte, si escrivim $\varphi(t) = e^{tA}\tilde{\varphi}(t)$, substituïnt a (4.9), tenim que

$$\dot{\tilde{\varphi}}(t) = e^{-tA}g(t, \varphi(t)) \implies \tilde{\varphi}(t) = \tilde{\varphi}(0) + \int_0^t e^{-sA}g(s, \varphi(s)) ds.$$

Com $x = \varphi(0) = \tilde{\varphi}(0)$, la fórmula queda provada. Aquesta fórmula és vàlida mentre $\varphi(t) \in B_\rho$. Com $\varphi(0) = x \in B_\rho$, $\varphi(t) \in B_\rho$, si t és prou petit.

Quan provarem la Proposició 2.37 vèrem veure que, com els valors propis d' A tenen tots part real negativa, existeixen $C > 1$ i $\mu > 0$ tals que $\|e^{tA}\| \leq Ce^{-t\mu}$, si $t \geq 0$. Sigui $\rho' \leq \rho$ tal que $\|g(t, x)\| \leq \frac{\mu}{2C}\|x\|$, si $x \in B_{\rho'}$.

Siguin $x \in B_{\rho'}$ i $\varphi(t)$, la solució de (4.9) tal que $\varphi(0) = x$. Fent servir la fórmula (4.10), tenim que, si $t \geq 0$ i $\varphi(s) \in B_{\rho'}$, per a tot $s \in [0, t]$, $\varphi(t)$ satisfà

$$\|\varphi(t)\| \leq Ce^{-t\mu}\|x\| + \int_0^t \frac{\mu}{2}e^{-(t-s)\mu}\|\varphi(s)\| ds. \quad (4.11)$$

Observeu que la desigualtat és certa perquè $t \geq 0$ i $s \in [0, t]$, el que implica que $t - s \geq 0$ i, en particular, $\|e^{(t-s)A}\| \leq \frac{\mu}{2C}e^{-(t-s)\mu}$. Llavors, si anomenem $u(t) = e^{t\mu}\|\varphi(t)\|$, la desigualtat (4.11) és equivalent a

$$u(t) \leq C\|x\| + \int_0^t \frac{\mu}{2}u(s) ds.$$

Però, pel Lema de Grönwall (Lemma 3.26) (prenent $\alpha = C\|x\|$ i $v(s) = \mu/2$), tenim que $u(t) \leq Ce^{\mu t/2}\|x\|$, el que implica que

$$\|\varphi(t)\| = e^{-\mu t}u(t) \leq Ce^{-\mu t/2}\|x\|. \quad (4.12)$$

D'aquesta desigualtat deduïm que

1. si $x \in B_{\rho'/C}$, $\varphi(t)$ està definida per a tot $t \geq 0$
2. i que la solució 0 de (4.9) és asimptòticament estable.

Veiem primer 1. Només hem de veure que $\varphi(t) \in B_{\rho'}$, per a tot $t \geq 0$. Suposem que no, és a dir, que existeix $t > 0$ tal que $\|\varphi(t)\| = \rho'$ i $\varphi(s) \in B_{\rho'}$, si $s \in [0, t]$ (és a dir, t és el primer valor pel qual $\varphi(t) \in B_{\rho'}^C$, que és un tancat). Però llavors, per la desigualtat (4.12), $\|\varphi(t)\| \leq Ce^{-\mu t/2}\|x\| < C\|x\| \leq \rho'$, el que contradiu el fet que $\|\varphi(t)\| = \rho'$.

Veiem ara 2. Hem de veure primer que la solució 0 és estable. En efecte, per a tot $\varepsilon > 0$, si $\|x\| \leq \min\{\rho', \varepsilon\}/C$, per la desigualtat (4.12), que, per 1, és vàlida per a tot $t \geq 0$, tenim que

$$\|\varphi(t) - 0\| \leq Ce^{-\mu t/2}\|x\| \leq e^{-\mu t/2}\varepsilon \leq \varepsilon.$$

Això prova que 0 és una solució estable. Finalment, d'aquesta mateixa desigualtat tenim que, si $x \in B_{\rho'/C}$

$$0 \leq \|\varphi(t) - 0\| \leq e^{-\mu t/2}\rho' \xrightarrow[t \rightarrow \infty]{} 0.$$

Això prova que 0 és asimptòticament estable. \square

Comentari 4.12. Observeu que la hipòtesi de que $g(t, x) = o(x)$, uniformement en t , en el Teorema 4.11 és suficient però no necessària. La podríeu substituir per $\|g(t, x)\| \leq \kappa\|x\|$, amb κ prou petit. Quin és el valor de κ necessari per a que la demostració funcioni?

Comentari 4.13. L'equació 4.10 suggereix que hom podria obtenir φ mitjançant un procediment de punt fix. Malgrat això, amb les hipòtesis del Teorema 4.11, l'operador que defineix la part dreta de 4.10 no és una contracció. Per què? Ara bé, si suposem addicionalment que la funció g és de classe C^1 respecte a x i $\frac{\partial g}{\partial x}(t, x) = o(1)$, uniformement en t , llavors és possible provar el teorema mitjançant un argument de punt fix. Feu els detalls.

Corol·lari 4.14. Sigui $U \subset \mathbb{R}^n$, un conjunt obert, i on $f : U \rightarrow \mathbb{R}^n$, una funció de classe C^k , amb $k \geq 1$. Considerem el sistema $\dot{x} = f(x)$. Suposem que $p \in U$ n'és un punt fix i que tots els valors propis de $Df(p)$ tenen part real negativa. Llavors p és un punt fix asimptòticament estable.

Demostració. El canvi $y = x - p$ transforma el sistema $\dot{x} = f(x)$ en el sistema $\dot{y} = g(y) = f(p + y)$. En efecte,

$$\dot{y} = \dot{x} = f(x) = f(p + y).$$

Trivialment, $g(0) = f(p) = 0$. Per tant, el sistema $\dot{y} = g(y)$ té un punt fix en $y = 0$. A més, $Dg(0) = Df(p)$ té tots els valors propis amb part real negativa. Com g és de classe C^k , amb $k \geq 1$, tenim que

$$\dot{y} = Dg(0)y + \tilde{g}(y)$$

on $\tilde{g}(y) = g(y) - Dg(0)y = o(y)$. Com el sistema no depèn de t , estem sota les hipòtesis del Teorema 4.11. \square

Exercici 4.1. Considereu el sistema (4.2) de la Proposició 4.7, amb les hipòtesis que allí es suposen sobre f i g . Proveu que si, a més, tots els valors propis de $Df(p)$ tenen part real negativa, l'òrbita periòdica de la Proposició 4.5 és asimptòticament estable, si ε és prou petit.

4.2.2 El criteri de Liapunov

Siguin $U \subset \mathbb{R}^n$, obert, $f : U \rightarrow \mathbb{R}^n$, una funció de classe C^1 i $\varphi(t, x)$, el flux definit per $\dot{x} = f(x)$, és a dir, la funció definida per

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}\varphi(t, x) &= f(\varphi(t, x)) \\ \varphi(0, x) &= x. \end{aligned}$$

Donada una funció $V : U \rightarrow \mathbb{R}$, denotarem per \dot{V} la funció

$$\dot{V}(x) = D_x V(x)f(x) = \frac{d}{dt}(V \circ \varphi)|_{(0, x)}.$$

Definició 4.15. Sigui p un punt singular o crític de f . Sigui $\tilde{U} \subset U$, un entorn obert de p . Direm que una funció $V : \tilde{U} \rightarrow \mathbb{R}$, diferenciable, és una funció de Liapunov per a p si

1. $V(p) = 0$ i $V(x) > 0$, si $x \neq p$ i
2. $\dot{V}(x) \leq 0$, per a tot $x \in \tilde{U}$.

Es diu que V és una funció de Liapunov estricta si, a més,

3. $\dot{V}(x) < 0$, per a tot $x \in \tilde{U}$, $x \neq p$.

El següent teorema és conegut com el *criteri de Liapunov*.

Teorema 4.16. *Sigui p un punt singular de $\dot{x} = f(x)$, sota les hipòtesis en aquesta secció. Si existeix una funció de Liapunov per a p , llavors p és estable. Si la funció és estricta, p és asimptòticament estable.*

Demostració. Sigui V , una funció de Liapunov per a p . Sigui $\varepsilon > 0$ i $B = \{x \mid \|x - p\| \leq \varepsilon\}$. Com $V(x) > 0$, si $x \neq p$, i V és contínua, tenim que $\rho = \min_{\|x-p\|=\varepsilon} V(x) > 0$. A més, com $V(p) = 0$, existeix un entorn de p , $\tilde{B} \subset B$, tal que $V(x) < \rho$, per a tot $x \in \tilde{B}$. Ara, si $x \in \tilde{B}$, $\varphi(t, x) \in B$, per a tot $t > 0$. En efecte, com

$$\frac{d}{dt}(V(\varphi(t, x))) = DV(\varphi(t, x)) \frac{d}{dt} \varphi(t, x) = DV(\varphi(t, x)) f(\varphi(t, x)) < 0,$$

V és decreixent al llarg de l'òrbita per x . Com $V(x) < \rho$, $V(\varphi(t, x)) < \rho$, el que implica que $\varphi(t, x) \in B$, si $t \geq 0$. Per tant, p és estable.

Suposem ara que V és estricta. Provem que, per a qualsevol successió creixent $(t_k)_k$ tal que $\lim_k t_k = \infty$, $\lim_k \varphi(t_k, x) = p$. Veiem que tota parcial convergent de $(\varphi(t_k, x))_k$ ho és cap a p . Suposem, doncs, que $\lim_k \varphi(t_k, x) = q$. Com V és estrictament decreixent al llarg de l'òrbita de x , és immediat que $V(\varphi(t, x)) > V(q)$, per a tot $t \geq 0$. Suposem que $q \neq p$. Llavors, $V(\varphi(1, q)) < V(q)$ (perquè, com $q \neq p$, $\dot{V}(q) < 0$). Com el flux és continu respecte a les condicions inicials, això implica que hi ha un entorn de q , W , tal que per a tot $z \in W$, $V(\varphi(1, z)) < V(q)$. Ara bé, com $\lim_k \varphi(t_k, x) = q$, existeix k_0 tal que si $k \leq k_0$, $\varphi(t_k, x) \in W$. Però, llavors, $V(\varphi(t_{k_0} + 1, x)) < V(q)$, amb el que arribem a una contradicció. Per tant, $q = p$. \square

Exemple 4.4. *Considereu el sistema autònom al pla*

$$\left. \begin{aligned} \dot{x} &= -x + 2x(x + y)^2 \\ \dot{y} &= -y^3 + 2y^3(x + y)^2 \end{aligned} \right\}.$$

Observeu que $(0, 0)$ és un punt singular aïllat. No podem aplicar el Teorema 4.11, perquè els valors propis de la diferencial del camp en $(0, 0)$ són -1 i 0 .

Considerem la funció $V(x, y) = x^2 + y^2$. Clarament satisfà $V(x, y) > V(0, 0)$, si $(x, y) \neq (0, 0)$. A més, per a tot $(x, y) \neq (0, 0)$ satisfent $\|(x, y)\| < 1$,

$$\begin{aligned} \dot{V}(x, y) &= 2(x\dot{x} + y\dot{y}) = 2(-x^2 + 2x^2(x^2 + y^2) - y^4 + 2y^4(x^2 + y^2)) \\ &= -2(1 - 2(x^2 + y^2))(x^2 + y^4) < 0. \end{aligned}$$

Com V és una funció de Liapunov estricta per a $(0, 0)$, aquest és un punt asimptòticament estable.

Exemple 4.5. La funció $V(x, y) = x^4 + 2y^2$ és una funció de Liapunov per a $(0, 0)$ en el sistema

$$\left. \begin{aligned} \dot{x} &= y - xy^2 \\ \dot{y} &= -x^3 \end{aligned} \right\}.$$

En efecte,

$$\dot{V}(x, y) = 4x^3\dot{x} + 4y\dot{y} = 4(x^3y - x^4y^2 - x^3y) = -4x^4y^4 \leq 0.$$

Per tant, $(0, 0)$ és estable. Observeu que $(0, 0)$ és una solució inestable del sistema linealitzat

$$\left. \begin{aligned} \dot{x} &= y \\ \dot{y} &= 0 \end{aligned} \right\}.$$

4.3 Integrals primeres i integrabilitat

Definició 4.17. Sigui $U \subset \mathbb{R}^n$, obert, $f : U \rightarrow \mathbb{R}^n$, una funció de classe C^1 i $\varphi(t, x)$, el flux definit per $\dot{x} = f(x)$. Direm que una funció de classe C^k , $k \geq 1$, $I : U \rightarrow \mathbb{R}$ és una integral primera del sistema si és constant al llarg de les seves trajectòries, és a dir, si

$$\frac{d}{dt}(I \circ \varphi)(t, x) = 0.$$

per a tot $t \in \mathbb{R}$.

Per la regla de la cadena, I és una integral primera de $\dot{x} = f(x)$ si i només si

$$0 = \frac{d}{dt}(I \circ \varphi)(t, x) = DI(\varphi(t, x)) \frac{d}{dt} \varphi(t, x) = DI(\varphi(t, x)) f(\varphi(t, x)).$$

És a dir, sota les hipòtesis anteriors,

Proposició 4.18. $I : U \rightarrow \mathbb{R}$ és una integral primera de $\dot{x} = f(x)$ si i només si

$$DI(x)f(x) = 0, \quad \text{per a tot } x \in U.$$

Exemple 4.6. Considereu el sistema

$$\left. \begin{aligned} \dot{x} &= y \\ \dot{y} &= -x \end{aligned} \right\}.$$

La funció $I(x, y) = x^2 + y^2$ n'és una integral primera. En efecte, si $(x(t), y(t))$ n'és una solució,

$$\frac{d}{dt}I(x(t), y(t)) = 2x(t)\dot{x}(t) + 2y(t)\dot{y}(t) = 2(x(t)y(t) - y(t)x(t)) = 0,$$

per a tot t . Això implica que les solucions de l'e.d.o. estan contingudes en els conjunts de nivell de la funció I , és a dir, a $C_\alpha = \{(x, y) \mid I(x, y) = \alpha\}$. Ara bé, com l'únic punt singular del sistema és $(0, 0)$, en cada C_α , per a $\alpha > 0$, hi ha una única òrbita.

Exercici 4.2. *Segui A una matriu $n \times n$ tal que els seus valors propis tenen part real negativa. Proveu que les úniques integrals primeres de $\dot{x} = Ax$ són les funcions constants. En efecte, com tota solució $x(t)$ satisfà $\lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = 0$, tenim que $I(x(t)) = \lim_{t \rightarrow \infty} I(x(t)) = I(0)$. Per tant, $I(x) = I(0)$.*

Exemple 4.7. *Considerem el sistema al pla*

$$\left. \begin{aligned} \dot{x} &= f_1(x, y) \\ \dot{y} &= f_2(x, y) \end{aligned} \right\}.$$

Suposem que $I(x, y)$ n'és una integral primera i que $DI(x, y) \neq 0$, per a tot (x, y) . Llavors, per a cada $\alpha \in \mathbb{R}$, el conjunt $C_\alpha = \{(x, y) \mid I(x, y) = \alpha\}$ o bé és buit o bé defineix una corba, que conté òrbites del sistema. Si només volem el retrat de fases del sistema, amb la integral primera i amb el coneixement del seus punts singulars en tenim prou.

Si volem calcular les solucions, podem fer el següent. Fixem α pel qual $C_\alpha \neq \emptyset$. De l'equació $I(x, y) = \alpha$, aïllem o bé x en funció de y o y en funció de x . Suposem, per a fixar idees, que podem escriure $y = \phi(x, \alpha)$. Llavors, substituint a la primera equació del sistema, ens queda

$$\dot{x} = f_1(x, \phi(x, \alpha)),$$

que és una e.d.o. d'ordre 1 autònoma i, per tant, es pot resoldre. La solució, $x(t, x_0, \alpha)$, és substituïda a la segona equació, i obtenim $y(t, x_0, \alpha)$.

Hi ha un tipus d'equacions diferencials que tenen sempre una integral primera.

Definició 4.19. *Seguin $U \subset \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n$, un conjunt obert, $x = (q, p)$ i $f : U \rightarrow \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n$, un camp vectorial. Direm que l'e.d.o. $\dot{x} = f(x)$ és un sistema hamiltonià si existeix una funció $H : U \rightarrow \mathbb{R}$ (de classe C^2) tal que el sistema és*

$$\left. \begin{aligned} \dot{q}_j &= \frac{\partial H}{\partial p_j}(q, p) \\ \dot{p}_j &= -\frac{\partial H}{\partial q_j}(q, p) \end{aligned} \right\}, \quad j = 1, \dots, n. \quad (4.13)$$

La funció H s'anomena hamiltonià.

Exemple 4.8. *El pèndol $\ddot{\theta} = -\sin \theta$ es pot escriure com un sistema hamiltonià. En efecte, anomenant $q = \theta$ i $p = \dot{\theta}$, l'e.d.o. és equivalent al sistema*

$$\left. \begin{aligned} \dot{q} &= p \\ \dot{p} &= -\sin q \end{aligned} \right\}. \quad (4.14)$$

Aquest sistema és hamiltonià amb hamiltonià

$$H(q, p) = \frac{1}{2}p^2 + \cos q - 1.$$

En efecte,

$$\frac{\partial H}{\partial p}(q, p) = p, \quad -\frac{\partial H}{\partial q}(q, p) = \sin q.$$

Observeu que com el sistema és globalment Lipschitz, les seves solucions estan definides per a tot $t \in \mathbb{R}$.

Proposició 4.20. *Suposem que l'e.d.o. $\dot{x} = f(x)$ és hamiltoniana amb hamiltonià H , de classe C^2 . Llavors, H és una integral primera del sistema.*

Demostració. Sigui $(q(t), p(t))$, una solució de $\dot{x} = f(x)$. Llavors, com $(q(t), p(t))$ satisfà (4.13),

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}H(q(t), p(t)) &= \\ &= \sum_{j=1}^n \left(\frac{\partial H}{\partial q_j}(q(t), p(t)) \dot{q}_j(t) + \frac{\partial H}{\partial p_j}(q(t), p(t)) \dot{p}_j(t) \right) \\ &= \sum_{j=1}^n \left(\frac{\partial H}{\partial q_j}(q(t), p(t)) \frac{\partial H}{\partial p_j}(q(t), p(t)) - \frac{\partial H}{\partial p_j}(q(t), p(t)) \frac{\partial H}{\partial q_j}(q(t), p(t)) \right) \\ &= 0. \end{aligned}$$

□

Exemple 4.9. *Dibuixem el retrat de fases del pèndol. Hem vist que el seu hamiltonià és*

$$H(q, p) = \frac{1}{2}p^2 + \cos q - 1.$$

Les òrbites del sistema estan contingudes en els conjunts de nivell de H , $C_\alpha = \{(q, p) \mid H(q, p) = \alpha\}$. Descriuim-los. Observem que, com H és 2π -periòdic en q , n'hi ha prou en dibuixar les corbes per a $q \in [0, 2\pi]$ i estendre-les periòdicament.

1. *Com $\cos q - 1 \geq -2$, tenim que $H(q, p) \geq -2$. Per tant, si $\alpha < -2$, $C_\alpha = \emptyset$.*
2. $C_{-2} = \{(q, p) \mid H(q, p) = -2\} = \{(q, p) \mid \frac{1}{2}p^2 + \cos q = -1\} = \{(\pi, 0)\}$.
Per tant, $((2k+1)\pi, 0)$, $k \in \mathbb{Z}$, són punts d'equilibri del sistema.
3. *Si $-2 < \alpha < 0$, $(q, p) \in C_\alpha$ si*

$$p^2 = 2(1 + \alpha - \cos q).$$

Si $-2 < \alpha < 0$, aquesta equació té solució si $\cos q < 1 + \alpha$, és a dir, si $q \in [\pi - q_\alpha, \pi + q_\alpha]$, on $\cos q_\alpha = 1 + \alpha \in (1, -1)$, $q_\alpha \in (0, \pi)$. Per tant, C_α , si $0 < \alpha < 2$, és una corba tancada simple. Com els únics punts singular del sistema (4.14) amb $q \in [0, 2\pi]$ són $(0, 0)$, $(\pi, 0)$ i $(2\pi, 0)$, sobre aquestes corbes no hi ha cap punt fix. En conseqüència, C_α conté una única òrbita.

4. *Considerem C_0 . Els seus punts són solució de*

$$p^2 = 2(1 - \cos q).$$

Com $1 - \cos q \geq 0$, tenim que $p = \pm \sqrt{2(1 - \cos q)}$. Ara bé, sobre aquestes dues corbes (una amb el signe + i l'altre amb el signe -) estan els punts fixos $(0, 0)$ i $(2\pi, 0)$. Per tant, en aquestes corbes tenim dos tipus d'òrbites: els punts fixos i les òrbites que els connecten. Aquestes darreres s'anomenen òrbites heteroclíniques (o homoclíniques, si interpretem $(0, 0)$ i $(2k\pi, 0)$, $k \in \mathbb{Z}$, com el mateix punt). A més, separen regions de l'espai de fase del pèndol amb comportament diferent. Per aquest motiu també s'anomenen separatrius.

5. Si $\alpha > 2$, $1 + \alpha) - \cos q > 0$, amb la qual cosa C_α són dues corbes, sense punts crítics. Conté, doncs, dues òrbites.

Observeu que, per a tot $\alpha \in \mathbb{R}$, C_α és un conjunt compacte (mirat a $(\mathbb{R}/\mathbb{Z}) \times \mathbb{R}$). Això implica que totes les solucions estan contingudes dins d'un compacte. El Teorema 3.21 assegura llavors que les solucions de l'e.d.o. estan definides per a tot $t \in \mathbb{R}$.

Trobar el retrat de fases no ens dona les solucions del sistema sinó només el seu recorregut. Ara bé, podem fer servir que H és una integral primera per a trobar les solucions explícitament. Calculem la solució de (4.14) corresponent a la separatriu. Tenim que, $(q, p) \in C_0$, llavors

$$p = \pm \sqrt{2(1 - \cos q)}.$$

Escollim el signe + (repetiu els càlculs amb el signe -). Ara bé, substituint aquesta igualtat en la primera equació de (4.14), tenim que, fent servir que $\cos q = \cos^2 \frac{q}{2} - \sin^2 \frac{q}{2}$, $1 = \cos^2 \frac{q}{2} + \sin^2 \frac{q}{2}$ i que $q \in [-\pi, \pi]$,

$$\dot{q} = \sqrt{2(1 - \cos q)} = 2 \sin \frac{q}{2} = 4 \cos \frac{q}{4} \sin \frac{q}{4} = 4 \tan \frac{q}{4} \cos^2 \frac{q}{4}$$

La solució d'aquesta equació que satisfà, per a fixar-ne una, $q(0) = \pi$ (que correspon a $p(0) = 2$) l'obtenim integrant:

$$\int_0^t \frac{\dot{q}(s)}{4 \tan \frac{q(s)}{4} \cos^2 \frac{q(s)}{4}} ds = \int_0^t 1 ds = t,$$

i, observant que, com estem escollint $q(0) = \pi$,

$$\int_0^t \frac{\dot{q}(s)}{4 \tan \frac{q(s)}{4} \cos^2 \frac{q(s)}{4}} ds = \log \left(\tan \frac{q(t)}{4} \right) - \log \left(\tan \frac{q(0)}{4} \right) = \log \left(\tan \frac{q(t)}{4} \right)$$

Per tant,

$$q(t) = 4 \arctan e^t.$$

Obteniu $p(t)$ de $p(t) = \dot{q}(t)$.

Capítol 5

Apèndixs

5.1 Demostració alternativa del Teorema de Picard

Aquí donem una altra demostració del Teorema 3.9, deguda a Inma Baldomà. Aquesta demostració es basa en el fet següent. Considerem $\mathcal{F} : \mathcal{X} \rightarrow \mathcal{X}$, una aplicació definida en un espai mètric amb distància d . Suposem que \mathcal{F} és Lipschitz respecte a aquesta distància, és a dir, que existeix una constant $L > 0$ tal que $d(\mathcal{F}(x), \mathcal{F}(y)) \leq Ld(x, y)$ per a tot $x, y \in \mathcal{X}$. Sigui \tilde{d} és una distància equivalent a d , és a dir \tilde{d} és una distància a \mathcal{X} tal que existeixen constants $c_1, c_2 > 0$ satisfent $c_1\tilde{d}(x, y) \leq d(x, y) \leq c_2\tilde{d}(x, y)$, per a tot $x, y \in \mathcal{X}$. Llavors \mathcal{F} també és Lipschitz respecte a \tilde{d} . En efecte,

$$\tilde{d}(\mathcal{F}(x), \mathcal{F}(y)) \leq c_1^{-1}d(\mathcal{F}(x), \mathcal{F}(y)) \leq c_1^{-1}Ld(x, y) \leq c_2c_1^{-1}Ld(x, y).$$

Ara bé, la constant de Lipschitz de \mathcal{F} ha canviat: passa de ser L , per a la distància d , a ser $c_2c_1^{-1}L$, per a la distància \tilde{d} . Per tant, \mathcal{F} pot ser una contracció per a la distància \tilde{d} i no ser-ho per a d . Però si ho és en una, té un únic punt fix. Llavors, per a provar el Teorema de Picard el que farem serà considerar una distància equivalent a la induïda per la norma del suprem en l'espai de les funcions contínues per a la que l'operador \mathcal{F} definit a (3.3) i actuant en l'espai mètric $\tilde{B}_{\alpha, b}(x_0)$ a (3.6) sigui una contracció.

Sigui L la constant de Lipschitz de f en $V_{a, b}$ i $\rho > L$. Definim, donada $\varphi \in C(I_\alpha(t_0), \mathbb{R}^n)$, on $\alpha = \min\{a, b/M\}$,

$$\|\varphi\|_\rho = \sup_{t \in I_\alpha(t_0)} e^{-\rho|t-t_0|} \|\varphi(t)\|. \quad (5.1)$$

És un exercici comprovar que, com $e^{-\rho|t-t_0|} > 0$, per a tot $t \in I_\alpha(t_0)$, $\|\cdot\|_\rho$ és una norma a $C(I_\alpha(t_0), \mathbb{R}^n)$. Observem que, com, per a tot $t \in I_\alpha(t_0)$

$$e^{-\rho|t-t_0|} \|\varphi(t)\| \leq \|\varphi(t)\| \leq e^{\rho|\alpha|} e^{-\rho|t-t_0|} \|\varphi(t)\|,$$

es compleix que $\|\varphi\|_\rho \leq \|\varphi\| \leq e^{\rho|\alpha|} \|\varphi\|_\rho$, on $\|\cdot\|$ denota la norma del suprem a $C(I_\alpha(t_0), \mathbb{R}^n)$. Per tant, ambdues normes són equivalents.

L'avantatge que suposa fer servir el pes $e^{-\rho|t|}$ a la definició de la norma ρ és la següent. Si $\varphi \in C(I_\alpha(t_0), \mathbb{R}^n)$, llavors

$$\begin{aligned} \|\varphi(t)\| &\leq e^{\rho|t-t_0|} \|e^{-\rho|t-t_0|} \varphi(t)\| \\ &\leq e^{\rho|t-t_0|} \sup_{s \in I_\alpha(t_0)} \|e^{-\rho|s-t_0|} \varphi(s)\| = e^{\rho|t-t_0|} \|\varphi\|_\rho. \end{aligned} \quad (5.2)$$

Considerem l'espai metric $\bar{B}_{\alpha,b}(x_0)$, introduït a (3.6), amb la distància $\tilde{d}(\varphi, \tilde{\varphi}) = \|\varphi - \tilde{\varphi}\|_\rho$. Ja hem vist que \mathcal{F} envia funcions de $\bar{B}_{\alpha,b}(x_0)$ a $\bar{B}_{\alpha,b}(x_0)$. Veiem que \mathcal{F} és una contracció fent servir la distància \tilde{d} . En efecte, si $\varphi, \tilde{\varphi} \in \bar{B}_{\alpha,b}(x_0)$, fent servir que f és Lipschitz i la propietat (5.2) de la norma ρ , tenim que

$$\begin{aligned} \|\mathcal{F}(\varphi) - \mathcal{F}(\tilde{\varphi})\|_\rho &= \sup_{t \in I_\alpha(t_0)} \|e^{-\rho|t|} (\mathcal{F}(\varphi) - \mathcal{F}(\tilde{\varphi}))\| \\ &= \sup_{t \in I_\alpha(t_0)} \left\| e^{-\rho|t-t_0|} \int_{t_0}^t (f(s, \varphi(s)) - f(s, \tilde{\varphi}(s))) ds \right\| \\ &\leq \sup_{t \in I_\alpha(t_0)} \left| e^{-\rho|t-t_0|} \int_{t_0}^t \|f(s, \varphi(s)) - f(s, \tilde{\varphi}(s))\| ds \right| \\ &\leq \sup_{t \in I_\alpha(t_0)} \left| e^{-\rho|t-t_0|} \int_{t_0}^t L \|\varphi(s) - \tilde{\varphi}(s)\| ds \right| \\ &\leq \sup_{t \in I_\alpha(t_0)} L \left| e^{-\rho|t-t_0|} \int_{t_0}^t e^{\rho|s-t_0|} \|\varphi - \tilde{\varphi}\|_\rho ds \right| \\ &= L \|\varphi - \tilde{\varphi}\|_\rho \sup_{t \in I_\alpha(t_0)} \left| \int_{t_0}^t e^{-\rho|t-t_0|} e^{\rho|s-t_0|} ds \right|. \end{aligned}$$

És immediat comprovar que

$$\left| \int_{t_0}^t e^{-\rho|t-t_0|} e^{\rho|s-t_0|} ds \right| = \frac{1}{\rho} (1 - e^{-\rho|t-t_0|}) \leq \frac{1}{\rho},$$

el que implica que

$$\|\mathcal{F}(\varphi) - \mathcal{F}(\tilde{\varphi})\|_\rho \leq \frac{L}{\rho} \|\varphi - \tilde{\varphi}\|_\rho.$$

Com $\rho > L$, \mathcal{F} és una contracció en aquesta norma. Té, per tant, un únic punt fix.