

Capítulo 11

Equações Diferenciais Ordinárias. Uma Introdução

Conteúdo

11.1	Definição e Alguns Exemplos	497
11.1.1	Equações Diferenciais Ordinárias Lineares	499
11.1.2	Equações Ordinárias de Segunda Ordem. Exemplos de Interesse	503
11.2	Sistemas de Equações Diferenciais Ordinárias	505
11.3	Discussão sobre Problemas de Valor Inicial	509
11.3.1	Problemas de Valor Inicial. Patologias e Exemplos a se Ter em Mente	511
11.3.2	Teoremas de Existência e Unicidade de Soluções	514
11.3.3	Soluções Globais	516
11.3.4	Dependência Contínua de Condições Iniciais e de Parâmetros	518



ESTE capítulo apresentaremos uma breve introdução à teoria das equações diferenciais ordinárias, abordando vários assuntos que serão aprofundados em outros capítulos. Na Física, equações diferenciais são representações matemáticas diretas ou indiretas de leis naturais e não é de surpreender, portanto, o papel central que as mesmas nela desempenham. Pode-se, sem medo de exagero, afirmar que o desenvolvimento da Física moderna pós-Newtoniana só se tornou possível quando se compreendeu a importância de se expressar as leis básicas da natureza em termos de equações diferenciais e quando se desenvolveram métodos de resolução das mesmas. Desde o século XVIII as equações diferenciais tornaram-se não apenas um dos principais instrumentos teóricos de trabalho dos físicos, mas a linguagem mesma pela qual as leis da Física se expressam.

Um exemplo básico é a segunda lei de Newton da Mecânica Clássica, que popularmente consiste na afirmação que para uma partícula de massa m (movendo-se em, digamos, uma dimensão, do ponto de vista de um referencial inercial) o produto de sua massa por sua aceleração é igual à força que age sobre ela. Se $y(t)$ é a posição da partícula (em um sistema de referência inercial) e a força F que age sobre ela em um instante de tempo t depender apenas do tempo t , da posição $y(t)$ no instante t e da velocidade $\dot{y}(t)$ no mesmo instante t , então a segunda lei de Newton assume a forma da equação diferencial ordinária de segunda ordem

$$m\ddot{y}(t) = F(t, y(t), \dot{y}(t)).$$

A Física apresenta outros exemplos de leis que se expressam em termos de equações diferenciais (parciais), tais como as leis do Eletromagnetismo (equações de Maxwell), da Mecânica dos Fluidos (equações de Euler e de Navier-Stokes), da Mecânica Quântica (equações de Schrödinger, de Klein-Gordon e de Dirac), da Teoria da Relatividade Geral (equação de Einstein) etc.

Atualmente, o estudo das equações diferenciais e suas aplicações estende-se a outras subáreas da Física, tais como a química, a biologia, a economia, finanças etc. © Para excelentes introduções, legíveis, profundas e abrangentes, à teoria das equações diferenciais ordinárias, recomendamos [14] e [155].

11.1 Definição e Alguns Exemplos

Vamos iniciar nossa discussão tentando, de um modo geral e abstrato, definir o que se entende por uma equação diferencial ordinária (que, seguindo a praxe, abreviaremos frequentemente por *EDO*).

• Definição geral de EDOs

Em termos simples, uma equação diferencial ordinária é uma relação a ser satisfeita em um determinado domínio por uma função de uma variável e um conjunto finito de suas derivadas. Vamos tentar formalizar essa ideia.

Seja $n \geq 1$ um número natural e seja $G(x_1, \dots, x_{n+2})$ uma função (real ou complexa) de $n + 2$ variáveis (reais ou complexas). Entende-se por uma *equação diferencial ordinária de ordem n* de uma função (incógnita) y de uma variável t associada à função G a equação

$$G(t, y(t), y'(t), \dots, y^{(n)}(t)) = 0. \tag{11.1}$$

Assim sendo, o número n é dito ser a *ordem da equação*. Como dissemos, apenas as derivadas de uma função incógnita em relação a uma das variáveis da qual eventualmente depende ocorrem em uma *equação diferencial ordinária*. Se ocorrerem derivadas em relação a várias variáveis, a equação é dita ser uma *equação diferencial parcial*. Equações diferenciais parciais serão discutidas em outros capítulos, adiante.

Um exemplo (escolhido arbitrariamente, sem aplicação prática conhecida) seria o caso da função de três variáveis

$$G(x_1, x_2, x_3) = x_1^2 + \text{sen}(x_2) - 3x_1 \cos(x_3). \tag{11.2}$$

A equação diferencial ordinária de primeira ordem associada a essa função seria

$$t^2 + \text{sen}(y(t)) - 3t \cos(y'(t)) = 0. \tag{11.3}$$

É evidente que só faz sentido associar uma equação diferencial a uma função G de $n + 2$ variáveis, como acima, se a mesma possuir zeros, ou seja, se a equação algébrica $G(x_1, \dots, x_{n+2}) = 0$ possuir soluções (reais ou complexas, dependendo do interesse). Por exemplo, se $G(x_1, x_2, x_3)$ é uma função de três variáveis reais ou complexas da forma $G(x_1, x_2, x_3) = |x_1|^2 + |x_2|^2 + |x_3|^2 + 1$ então não há nenhuma equação diferencial associada à mesma, já que não há números reais ou complexos tais que $G(x_1, x_2, x_3) = 0$ e, portanto, a equação $|t|^2 + |y(t)|^2 + |y'(t)|^2 + 1 = 0$, ainda que possa ser escrita, trivialmente não possui qualquer solução.

Em muitos casos a equação algébrica $G(x_1, \dots, x_{n+2}) = 0$ permite escrever de modo único (ao menos em uma região finita) a variável x_{n+2} em termos das demais:

$$x_{n+2} = F(x_1, \dots, x_{n+1}), \tag{11.4}$$

onde F é alguma função de $n + 1$ variáveis. Condições para isso são garantidas pelo importante *Teorema da Função Implícita* (vide Seção 28.3, página 1394, ou qualquer bom livro-texto sobre funções de várias variáveis). Nesses casos felizes, a equação diferencial para G equivale (ao menos localmente) à equação

$$y^{(n)}(t) = F(t, y(t), \dots, y^{(n-1)}(t)). \tag{11.5}$$

Nos casos em que G é tal que não permite a separação global da dependência de x_{n+2} como em (11.4) a equação diferencial é dita ser uma *equação diferencial implícita*. Equações implícitas são por vezes difíceis de lidar. Trataremos da solução de algumas delas no Capítulo 12, página 519. Um exemplo de uma equação implícita foi apresentado em (11.2)-(11.3). Outro exemplo é a equação diferencial (associada à conservação de energia mecânica de uma partícula de massa m se movendo em uma dimensão sob a ação de um potencial U):

$$\frac{m}{2}(\dot{y}(t))^2 + U(y(t)) = E,$$

onde E é uma constante.

Daqui por diante estaremos mais frequentemente interessados em equações diferenciais de ordem n da forma (11.5) para alguma função de $n + 1$ variáveis F . Para ilustrar equações do tipo (11.5), apresentemos mais alguns exemplos.

Exemplo 11.1 Sejam m, ρ e k constantes positivas e f uma função de uma variável. Seja G a função de quatro variáveis

$$G(x_1, x_2, x_3, x_4) = mx_4 + kx_2 + \rho x_3 - f(x_1).$$

É evidente que para a equação algébrica $G(x_1, x_2, x_3, x_4) = 0$ podemos escrever

$$x_4 = F(x_1, x_2, x_3),$$

onde

$$F(x_1, x_2, x_3) = -\frac{1}{m}(kx_2 + \rho x_3 - f(x_1)).$$

A equação diferencial (de segunda ordem) associada a essa função F é $\ddot{y}(t) = F(t, y(t), \dot{y}(t))$, ou seja

$$m\ddot{y}(t) + \rho\dot{y}(t) + ky(t) = f(t).$$

O estudante pode imediatamente reconhecer que se trata da equação do oscilador harmônico amortecido submetido a uma força dependente do tempo $f(t)$. □

Vamos a outros exemplos escritos diretamente em termos da função F .

Exemplo 11.2 Sejam g e l duas constantes positivas e seja F a função

$$F(x_1, x_2, x_3) = -\frac{g}{l} \text{sen}(x_2).$$

A equação diferencial (de segunda ordem) associada a essa função F é

$$\ddot{y}(t) = -\frac{g}{l} \text{sen}(y(t)).$$

O estudante pode imediatamente reconhecer que se trata da equação do pêndulo simples. □

Exemplo 11.3 (Equação de van der Pol) Sejam μ e k constantes e

$$F(x_1, x_2, x_3) = -\mu x_3(x_2^2 - 1) - kx_2.$$

A equação diferencial (de segunda ordem) associada a essa função F é

$$y''(t) + \mu y'(t)(y(t)^2 - 1) + ky(t) = 0.$$

Esta equação é conhecida como *equação de van der Pol*¹, em honra ao engenheiro que a propôs como a equação básica para o triodo (uma espécie de “avô” do transistor). □

Exemplo 11.4 Sejam α e β constantes e

$$F(x_1, x_2) = -\alpha x_2 + \beta x_2^2.$$

A equação diferencial (de primeira ordem) associada a essa função F é

$$y'(t) = -\alpha y(t) + \beta y(t)^2.$$

Essa equação aparece em vários problemas, por exemplo no estudo da evolução de populações. □

Vários outros exemplos serão apresentados adiante.

• A noção de solução clássica de uma EDO

Algumas palavras devem ser ditas sobre a noção de solução de uma equação diferencial ordinária. Uma *solução clássica* de uma equação diferencial ordinária de ordem m em um domínio $\Omega \subset \mathbb{R}$ ou $\Omega \subset \mathbb{C}$ (suposto conexo e de interior não-vazio) é uma função m -vezes diferenciável que satisfaz a equação em todos os pontos do interior de Ω . Existem também outras noções de solução, como a de solução fraca, de solução distribucional etc. Discutiremos por ora apenas as soluções clássicas e, por isso, abusando um pouco da linguagem, nos referiremos a elas simplesmente como “soluções”, sem pender o qualificativo “clássicas”.

11.1.1 Equações Diferenciais Ordinárias Lineares

No estudo das equações diferenciais é muito útil classificar equações que possuam certas propriedades comuns. Uma classificação muito importante é aquela que separa as equações diferenciais em *lineares* e *não-lineares* e as primeiras em *homogêneas* e *não-homogêneas*.

• Equações diferenciais ordinárias lineares

Seja a equação diferencial ordinária de ordem n

$$y^{(n)}(t) = F\left(t, y(t), \dots, y^{(n-1)}(t)\right). \tag{11.6}$$

¹Balthazar van der Pol (1889–1959). Os trabalhos originais de van der Pol sobre a equação que leva seu nome são: B. van der Pol, Radio Rev. **1**, 704–754, (1920) e B. van der Pol, “Forced oscillations in a circuit with non-linear resistance (reception with reactive triode)”, Phil. Mag. **3**, 65–80, (1927).

Se a função $F(x_1, \dots, x_{n+1})$ for uma função linear das variáveis x_2, \dots, x_{n+1} , então (11.6) é dita ser *linear*. Em um tal caso, $F(x_1, \dots, x_{n+1})$ é da forma

$$F(x_1, \dots, x_{n+1}) = f_1(x_1) + f_2(x_1)x_2 + \dots + f_{n+1}(x_1)x_{n+1},$$

para certas funções de uma variável f_1, \dots, f_{n+1} .

É fácil constatar que toda equação diferencial ordinária e linear de ordem n é da forma

$$y^{(n)}(t) + a_{n-1}(t)y^{(n-1)}(t) + \dots + a_1(t)y'(t) + a_0(t)y(t) = f(t), \tag{11.7}$$

para funções reais ou complexas a_0, \dots, a_{n-1} e f . Veremos inúmeros exemplos adiante (vide Seção 11.1.2).

Equações que não são lineares são (obviamente) ditas ser *não-lineares*. Exemplos são a equação do pêndulo simples

$$\ddot{x}(t) + \text{sen}(x(t)) = 0$$

e a de van der Pol

$$\ddot{y}(t) + \mu \dot{y}(t)(y(t)^2 - 1) + ky(t) = 0.$$

Equações não-lineares são em muitos sentidos mais “complexas” que equações lineares e têm sido objeto de intenso estudo nas últimas décadas, especialmente no que concerne ao comportamento “caótico” observado em muitas delas. Nos capítulos que seguem, nossa ênfase será o desenvolvimento de métodos de resolução de equações lineares, mas trataremos de métodos de resolução de algumas equações não-lineares no Capítulo 12, página 519, e também no Capítulo 28 quando desenvolvermos métodos recursivos no tratamento das equações integrais de Fredholm e de Volterra.

• **Equações diferenciais ordinárias lineares a coeficientes constantes**

Caso as funções a_0, \dots, a_{n-1} em (11.7) sejam constantes, a equação (11.7) é dita ser a *equação a coeficientes constantes*. Como discutiremos, há um método geral para obter soluções de equações diferenciais ordinárias lineares a coeficientes constantes (para qualquer ordem n).

• **Equações lineares homogêneas e não-homogêneas**

Caso a função f seja identicamente nula, a equação (11.7) é dita ser uma *equação diferencial homogênea*. De outra forma, se f não for identicamente nula, equação (11.7) é dita ser uma *equação diferencial não-homogênea*.

Equações lineares e homogêneas têm uma propriedade de grande importância, o chamado *princípio de sobreposição*, do qual trataremos agora.

• **O princípio de sobreposição para equações lineares homogêneas**

Seja uma equação diferencial ordinária linear e homogênea de ordem n

$$y^{(n)}(t) + a_{n-1}(t)y^{(n-1)}(t) + \dots + a_1(t)y'(t) + a_0(t)y(t) = 0. \tag{11.8}$$

O chamado *princípio de sobreposição* é a afirmativa que se y_a e y_b são duas soluções de (11.8) então combinações lineares arbitrárias $\alpha y_a + \beta y_b$ são também soluções de (11.8). Aqui α e β são números reais ou complexos arbitrários. A prova é simples. A k -ésima derivada de $\alpha y_a + \beta y_b$ é $\alpha y_a^{(k)} + \beta y_b^{(k)}$. Assim, substituindo-se y por $\alpha y_a + \beta y_b$ no lado esquerdo de (11.8), teremos

$$\begin{aligned} (\alpha y_a + \beta y_b)^{(n)} + a_{n-1}(t)(\alpha y_a + \beta y_b)^{(n-1)} + \dots + a_1(t)(\alpha y_a + \beta y_b)' + a_0(t)(\alpha y_a + \beta y_b) = \\ (\alpha y_a^{(n)} + \beta y_b^{(n)}) + a_{n-1}(t)(\alpha y_a^{(n-1)} + \beta y_b^{(n-1)}) + \dots + a_1(t)(\alpha y_a' + \beta y_b') + a_0(t)(\alpha y_a + \beta y_b) = \\ \alpha \left(\underbrace{y_a^{(n)} + a_{n-1}(t)y_a^{(n-1)} + \dots + a_1(t)y_a' + a_0(t)y_a}_{=0} \right) \\ + \beta \left(\underbrace{y_b^{(n)} + a_{n-1}(t)y_b^{(n-1)} + \dots + a_1(t)y_b' + a_0(t)y_b}_{=0} \right) = 0. \end{aligned}$$

Uma conclusão importante que se extrai do princípio de sobreposição é que o conjunto de todas as soluções de uma equação diferencial ordinária linear e homogênea é um espaço vetorial, real ou complexo, dependendo do caso.

Como o estudante facilmente percebe, o princípio de sobreposição vale também para sistemas de equações diferenciais ordinárias lineares e homogêneas, assim como para equações diferenciais parciais lineares e homogêneas, tais como as equações de difusão, de onda, de Laplace, as equações de Maxwell no vácuo, a equação de Schrödinger e muitas outras equações da Física. Nelas o princípio de sobreposição é amplamente empregado.

Historicamente, o princípio de sobreposição era conhecido desde os primeiros estudos sobre equações diferenciais no século XVIII, mas foi através dos trabalhos de Helmholtz² sobre acústica que sua importância foi inteiramente percebida na resolução de equações diferenciais (ordinárias e parciais) lineares de interesse físico. A influência de Helmholtz não pode ser subestimada, mesmo no que concerne a aplicações práticas: a leitura de Helmholtz, que também inventara um dispositivo eletromecânico para a produção artificial do som de vogais, inspirou Bell³ a realizar experiências de transmissão simultânea de múltiplos sinais de código Morse⁴ em uma única linha telegráfica, empregando frequências distintas para cada mensagem. Tais experiências conduziram Bell em 1876 à invenção do telefone.

• O caso de equações lineares não-homogêneas

Vamos colocar a seguinte questão. Vale o princípio de sobreposição para equações diferenciais ordinárias lineares não-homogêneas? Para tentar responder isso, considere-se a equação não-homogênea

$$y^{(n)}(t) + a_{n-1}(t)y^{(n-1)}(t) + \dots + a_1(t)y'(t) + a_0(t)y(t) = f(t) \tag{11.9}$$

e sejam y_a e y_b duas soluções. Como acima, consideremos uma combinação linear $\alpha y_a + \beta y_b$ e tentemos repetir o que fizemos no caso homogêneo. Assim, substituindo-se y por $\alpha y_a + \beta y_b$ no lado esquerdo de (11.9), teremos

$$\begin{aligned} &(\alpha y_a + \beta y_b)^{(n)} + a_{n-1}(t)(\alpha y_a + \beta y_b)^{(n-1)} + \dots + a_1(t)(\alpha y_a + \beta y_b)' + a_0(t)(\alpha y_a + \beta y_b) = \\ &(\alpha y_a^{(n)} + \beta y_b^{(n)}) + a_{n-1}(t)(\alpha y_a^{(n-1)} + \beta y_b^{(n-1)}) + \dots + a_1(t)(\alpha y_a' + \beta y_b') + a_0(t)(\alpha y_a + \beta y_b) = \\ &\alpha \left(\underbrace{y_a^{(n)} + a_{n-1}(t)y_a^{(n-1)} + \dots + a_1(t)y_a' + a_0(t)y_a}_{= f(t)} \right) \\ &\quad + \beta \left(\underbrace{y_b^{(n)} + a_{n-1}(t)y_b^{(n-1)} + \dots + a_1(t)y_b' + a_0(t)y_b}_{= f(t)} \right) = (\alpha + \beta)f(t). \end{aligned}$$

O que concluímos é que $\alpha y_a + \beta y_b$ somente é uma nova solução de (11.9) se $\alpha + \beta = 1$. Portanto, se y_a e y_b são soluções de (11.9) então $\alpha y_a + (1 - \alpha)y_b$ é também solução de (11.9) para qualquer α .

Vimos que o princípio de sobreposição para equações não-homogêneas não se dá para α e β arbitrários. Não se pode mais, portanto, dizer que o conjunto de soluções de uma equação não-homogênea como (11.9) é um espaço vetorial, mas sim um espaço convexo.

Há ainda uma outra propriedade importante satisfeita pelas soluções de equações não-homogêneas. Seja y_{nh} uma solução particular da equação não-homogênea (11.9) e y_h solução particular da equação homogênea (11.8), a qual difere de (11.9) apenas pelo fato de ter-se $f(t) = 0$. Então, tem-se que

$$y = \alpha y_h + y_{nh} \tag{11.10}$$

é também solução da equação não-homogênea (11.9) para qualquer constante α . Para ver isso, inserimos $y = \alpha y_h + y_{nh}$

²Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz (1821–1894).

³Alexander Graham Bell (1847–1922).

⁴Samuel Finley Breese Morse (1791–1872).

no lado esquerdo de (11.9) e teremos

$$\begin{aligned}
 (\alpha y_h + y_{nh})^{(n)} + a_{n-1}(t)(\alpha y_h + y_{nh})^{(n-1)} + \dots + a_1(t)(\alpha y_h + y_{nh})' + a_0(t)(\alpha y_h + y_{nh}) &= \\
 (\alpha y_h^{(n)} + y_{nh}^{(n)}) + a_{n-1}(t)(\alpha y_h^{(n-1)} + y_{nh}^{(n-1)}) + \dots + a_1(t)(\alpha y_h' + y_{nh}') + a_0(t)(\alpha y_h + y_{nh}) &= \\
 \alpha \left(\underbrace{y_h^{(n)} + a_{n-1}(t)y_h^{(n-1)} + \dots + a_1(t)y_h' + a_0(t)y_h}_{=0} \right) & \\
 + \left(\underbrace{y_{nh}^{(n)} + a_{n-1}(t)y_{nh}^{(n-1)} + \dots + a_1(t)y_{nh}' + a_0(t)y_{nh}}_{=f(t)} \right) &= f(t).
 \end{aligned}$$

O que aprendemos com isso é que se tivermos uma solução particular de uma equação linear não-homogênea obtemos uma outra solução mais geral adicionando a esta uma solução da equação linear homogênea associada. Essa propriedade é muito útil na solução de equações não-homogêneas, especialmente se forem também envolvidas condições iniciais ou de contorno.

• **Equações diferenciais ordinárias com retardo**

Apenas por curiosidade informamos que não apenas equações diferenciais do tipo (11.1) ou (11.5) são objeto de interesse e de pesquisa. Um outro tipo são as chamadas *equações com retardo*, as quais existem em diversas formas. Uma dessas formas é a seguinte. Sejam T_0, \dots, T_{n-1} constantes positivas. Uma equação com retardo (fixo) é uma equação da forma

$$y^{(n)}(t) = F\left(t, y(t - T_0), \dots, y^{(n-1)}(t - T_{n-1})\right). \tag{11.11}$$

A diferença com relação a (11.5) é que aqui $y^{(n)}$ no instante t não depende de $y, \dots, y^{(n-1)}$ no mesmo instante t , mas em instantes anteriores.

Um exemplo interessante é o seguinte. Suponha que $y(t)$ designe a população de uma espécie de seres vivos vivendo em um certo habitat. O número de falecimentos por causas naturais (como doenças) no intervalo t e $t + dt$ é tipicamente proporcional a $y(t)$ (justifique!). Assim, se a espécie não se reproduz, a variação dy da população no intervalo t e $t + dt$ será $dy = -\alpha y(t)dt$ para uma certa constante α , ou seja, y satisfará a equação diferencial $y'(t) = -\alpha y(t)$, que é uma equação de primeira ordem sem retardo. Agora, admitamos que a espécie se reproduz. O número de cruzamentos entre elementos da espécie no intervalo t e $t + dt$ é tipicamente proporcional a $y(t)^2$ (justifique!). Se admitirmos que o número de nascimentos no intervalo entre t e $t + dt$ é proporcional ao de cruzamentos ocorridos em $t - T_0$ (descontando assim o tempo de gestação T_0) a equação diferencial para y terá que ser modificada para

$$y'(t) = -\alpha y(t) + \beta(y(t - T_0))^2,$$

com uma nova constante β . Esta é uma equação de primeira ordem com retardo.

Há vários outros tipos de equações com retardo, por exemplo, aquelas onde os tempos de retardo T_i não são fixos, mas dependem de t ou mesmo de y , como por exemplo, a equação de primeira ordem

$$\dot{y}(t) = F\left(t, y\left(t - T(t, y(t))\right)\right),$$

onde $T(t, y)$ é uma função dada. Tais equações aparecem no Eletromagnetismo, onde o retardo é devido à finitude da velocidade da luz.

O estudo de equações com retardo requer outros métodos que não aqueles que discutiremos aqui e é assunto ativo de pesquisa atualmente, encontrando aplicações mesmo fora da Física, em áreas tais como a Epidemiologia - como o exemplo acima ilustra - onde os retardos são tipicamente consequência quer de tempos de gestação quer de tempos de latência (de doenças).

11.1.2 Equações Ordinárias de Segunda Ordem. Exemplos de Interesse

Para futura referência vamos aqui listar uma série de equações diferenciais lineares de segunda ordem de particular interesse.

1. A *Equação linear de segunda ordem e homogênea* (forma geral):

$$a(t)\ddot{y} + b(t)\dot{y} + c(t)y = 0,$$

com $a(t)$ não-identicamente nula.

2. *Equação linear de segunda ordem não-homogênea* (forma geral):

$$a(t)\ddot{y}(t) + b(t)\dot{y}(t) + c(t)y(t) = f(t),$$

com $a(t)$ e $f(t)$ não-identicamente nulas.

3. *Equação do oscilador harmônico forçado amortecido*:

$$m\ddot{x}(t) + \gamma\dot{x}(t) + kx(t) = f(t),$$

com $m > 0$, $\gamma > 0$ e $k > 0$.

4. *Equação do oscilador anarmônico amortecido*:

$$m\ddot{x}(t) + \gamma\dot{x}(t) + kx(t) + \lambda(x(t))^3 = 0,$$

com $m > 0$, $\gamma > 0$ e $k > 0$.

5. *Equação de Duffing*⁵:

$$m\ddot{x}(t) + \gamma\dot{x}(t) + kx(t) + \lambda(x(t))^3 = \alpha \cos(\omega t + \delta),$$

com $m > 0$, $\gamma > 0$ e $k > 0$.

6. *Equação de Langevin*⁶

$$m\ddot{x}(t) + \gamma\dot{x}(t) = f(t),$$

com $m > 0$ e $\gamma > 0$.

7. A *Equação de Euler*⁷:

$$t^2 \ddot{y}(t) + at \dot{y}(t) + by(t) = 0,$$

onde a e b são constantes.

8. A *Equação de Hill*⁸:

$$\ddot{y}(t) + (\lambda + P(t))y(t) = 0,$$

onde $P(t)$ é uma função periódica e λ constante. Um caso particular importante é o da equação de Mathieu:

9. A *Equação de Mathieu*⁹:

$$\ddot{y}(t) + (a + b \cos(\omega t))y(t) = 0,$$

com a , b e ω constantes.

⁵Georg Duffing (1861–1944). A referência onde a equação de Duffing foi originalmente apresentada e estudada é [86]. A equação de Duffing adquiriu alguma popularidade nos anos 70 do século XX com a emergência do estudo de sistemas que exibem comportamento caótico. Para uma referência geral sobre essa equação, vide [195].

⁶Paul Langevin (1872–1946). A equação de Langevin surgiu como equação estocástica em P. Langevin, “On the Theory of Brownian Motion”. C. R. Acad. Sci. (Paris) **146**, 530–533 (1908).

⁷Leonhard Euler (1707–1783).

⁸George William Hill (1838–1914).

⁹Emile-Léonard Mathieu (1835–1890).

10. A Equação de Bessel¹⁰:

$$x^2 y''(x) + xy'(x) + (x^2 - \nu^2)y(x) = 0,$$

$\nu \in \mathbb{R}$.

11. A Equação de Legendre¹¹:

$$(1 - x^2)y''(x) - 2xy'(x) + \lambda(\lambda + 1)y(x) = 0,$$

$\lambda \in \mathbb{R}$, e a equação de Legendre associada

$$(1 - x^2)y''(x) - 2xy'(x) + \lambda(\lambda + 1)y(x) - \frac{\mu^2}{1 - x^2}y(x) = 0,$$

$\lambda, \mu \in \mathbb{R}$.

12. A Equação de Hermite¹²:

$$y''(x) - 2xy'(x) + \lambda y(x) = 0,$$

$\lambda \in \mathbb{R}$.

13. A Equação de Airy¹³:

$$y''(x) - xy(x) = 0.$$

14. A Equação de Laguerre¹⁴:

$$xy''(x) + (1 - x)y'(x) + \lambda y(x) = 0,$$

$\lambda \in \mathbb{R}$, e a Equação de Laguerre associada:

$$xy'' + (m + 1 - x)y' + (n - m)y = 0,$$

m, n constantes.

15. A Equação de Tchebychev¹⁵:

$$(1 - x^2)y''(x) - xy'(x) + \lambda^2 y(x) = 0,$$

$\lambda \in \mathbb{R}$.

16. A Equação Hipergeométrica¹⁶, ou Equação de Gauss¹⁷:

$$z(1 - z)y''(z) + [c - (1 + a + b)z]y'(z) - aby(z) = 0,$$

a, b, c constantes.

17. A Equação Hipergeométrica Confluente, ou Equação de Kummer¹⁸:

$$zy''(z) + [c - z]y'(z) - ay(z) = 0,$$

a, c constantes.

18. A Equação de Heun¹⁹:

$$z(z - 1)(z - a)y''(z) + [\gamma(z - 1)(z - a) + \delta z(z - a) + \epsilon z(z - 1)]y'(z) + (\alpha\beta z - q)y(z) = 0,$$

onde $\alpha, \delta, \epsilon, q$ e a são constantes.

O leitor interessado poderá encontrar no Capítulo 21, página 903, problemas físicos dos quais emergem algumas das equações listadas acima.

¹⁰Friedrich Wilhelm Bessel (1784–1846).

¹¹Adrien-Marie Legendre (1752–1833).

¹²Charles Hermite (1822–1901).

¹³George Biddell Airy (1801–1892).

¹⁴Edmond Nicolas Laguerre (1834–1886).

¹⁵Pafnuty Lvovich Tchebychev (1821–1894).

¹⁶Assim denominada pois uma de suas soluções envolve uma generalização da série geométrica.

¹⁷Johann Carl Friedrich Gauß (1777–1855).

¹⁸Ernst Eduard Kummer (1810–1893).

¹⁹Karl Heun (1859–1929).

11.2 Sistemas de Equações Diferenciais Ordinárias

Um sistema de equações diferenciais ordinárias envolvendo m funções desconhecidas y_1, \dots, y_m de uma variável é um conjunto de equações do tipo

$$\begin{aligned} y_1^{(n_1)}(t) &= F_1\left(t; y_1, y_1', \dots, y_1^{(n_1-1)}; \dots; y_m, y_m', \dots, y_m^{(n_m-1)}\right), \\ y_2^{(n_2)}(t) &= F_2\left(t; y_1, y_1', \dots, y_1^{(n_1-1)}; \dots; y_m, y_m', \dots, y_m^{(n_m-1)}\right), \\ &\vdots \\ y_m^{(n_m)}(t) &= F_m\left(t; y_1, y_1', \dots, y_1^{(n_1-1)}; \dots; y_m, y_m', \dots, y_m^{(n_m-1)}\right), \end{aligned} \tag{11.12}$$

onde cada F_i é uma função de um certo número de variáveis e n_k são números inteiros maiores ou iguais a 1. Para cada y_j tem-se, portanto, uma equação de ordem n_j , na qual aparecem também as demais funções y_k e suas derivadas de ordem até $n_k - 1$.

Sistemas de equações diferenciais ordinárias são muito frequentes em Física. Considere-se, por exemplo, um sistema isolado de m partículas de massas M_i e coordenadas \vec{x}_i , $i = 1, \dots, m$, interagindo de forma que a partícula j exerce sobre a partícula i uma força $\vec{F}_{ij}(\vec{x}_i - \vec{x}_j)$. A segunda lei de Newton fica

$$M_i \ddot{\vec{x}}_i(t) = \sum_{j \neq i} \vec{F}_{ij}(\vec{x}_i(t) - \vec{x}_j(t)),$$

$i = 1, \dots, m$, que é um sistema de equações diferenciais ordinárias.

• O sistema de Lotka-Volterra

Um outro exemplo de sistema de equações diferenciais é o chamado *sistema de caça-presa* de Lotka²⁰ e Volterra²¹, empregado no estudo de evolução de populações²². Esse sistema é da forma

$$\begin{aligned} \dot{p}_1(t) &= -\alpha_1 p_1(t) + \beta_1 p_1(t) p_2(t), \\ \dot{p}_2(t) &= +\alpha_2 p_2(t) - \beta_2 p_1(t) p_2(t) \end{aligned}, \tag{11.13}$$

onde α_i e β_i , $i = 1, 2$ são constantes positivas. O sistema de Lotka-Volterra descreve a evolução de duas populações de acordo com um modelo de interação entre caça (a população p_1) e presa (a população p_2).

A ideia do modelo é a seguinte: p_1 representa uma população que se alimenta da população p_2 . Esta, alimenta-se de recursos do habitat. Tenha-se em mente, por exemplo, a situação onde p_1 representa uma população de raposas que se alimentam de coelhos, representados por p_2 . Estes, sendo herbívoros, alimentam-se de plantas de seu habitat. Se as duas populações estão isoladas, p_1 tende a desaparecer (por falta de alimento) exponencialmente com uma taxa α_1 . Já p_2 cresce exponencialmente com uma taxa α_2 , por não ter inimigos naturais. Assim, quando as duas populações estão isoladas, suas evoluções são descritas pelo sistema

$$\begin{aligned} \dot{p}_1(t) &= -\alpha_1 p_1(t) \\ \dot{p}_2(t) &= +\alpha_2 p_2(t) \end{aligned}. \tag{11.14}$$

Postas em contacto, as populações começam a interagir, e de modo que p_1 tem uma chance de sobrevivência por se alimentar de p_2 , que ganha agora um predador. As chances de sobrevivência de p_1 são proporcionais ao número de

²⁰ Alfred James Lotka (1880–1949).

²¹ Vito Volterra (1860–1940).

²² O modelo foi proposto em 1920 por Lotka para o estudo de certas reações químicas e em 1926 por Volterra, em uma tentativa de modelar a evolução de populações de peixes e tubarões do mar Adriático. Para uma referência histórica, vide V. Volterra “Leçons sur la Théorie Mathématique de la Lutte pour la Vie”. Gauthier-Villars et Cie., Paris, 1931. Os trabalhos originais de Volterra nesse campo são: V. Volterra. “Variazioni e fluttuazioni del numero d’individui in specie animali conviventi”. Mem. R. Accad. Naz. dei Lincei **2**, 31–113 (1926). V. Volterra. “Fluctuations in the abundance of a species considered mathematically”. Nature **118**, 558–560 (1926).

encontros entre elementos de p_1 e de p_2 no habitat, pois em um encontro um elemento de p_1 pode eventualmente matar um elemento de p_2 e, assim, alimentar-se. Esse número de encontros é grosseiramente proporcional ao produto das duas populações $p_1 p_2$ (por que?). Assim, a taxa de sobrevivência de p_1 deve ser acrescida de um termo como $\beta_1 p_1(t) p_2(t)$, enquanto que a taxa de sobrevivência de p_2 deve ser subtraída de um termo como $\beta_2 p_1(t) p_2(t)$. Esses termos levam ao sistema de Lotka-Volterra acima. O resultado da evolução de um tal sistema é ilustrado na Figura 11.1.

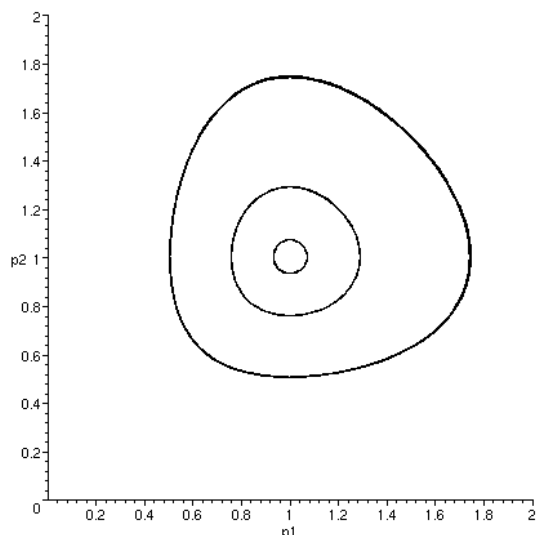


Figura 11.1: A evolução do sistema de Lotka-Volterra para três condições iniciais distintas. O eixo horizontal é a população p_1 e o vertical p_2 . Note que a evolução se dá em ciclos periódicos fechados, uma característica especial do sistema de Lotka-Volterra.

Também estudado em modelos de ecologia é o *modelo de competição de Lotka-Volterra*, descrito pelo sistema

$$\begin{aligned} \dot{p}_1(t) &= \alpha_1 p_1(t) - \beta_1 p_1(t)^2 - \gamma_1 p_1(t) p_2(t) \\ \dot{p}_2(t) &= \alpha_2 p_2(t) - \beta_2 p_2(t)^2 - \gamma_2 p_1(t) p_2(t) \end{aligned} \tag{11.15}$$

Acima β_i e γ_i são positivos, mas α_i podem ser positivos ou negativos. Na primeira equação, o termo $+\alpha_1 p_1(t)$ descreve o crescimento (ou decrescimento) da população p_1 por consumir recursos de seu habitat (supostamente ilimitados), se reproduzir e morrer. O termo $-\beta_1 p_1(t)^2$ descreve, por exemplo, a taxa de propagação de doenças fatais entre elementos da população p_1 , que é proporcional ao número de encontros de elementos da espécie p_1 com elementos da espécie p_1 . Esse número é grosseiramente proporcional a p_1^2 (por que?). O termo $-\gamma_1 p_1(t) p_2(t)$ descreve a competição entre as duas espécies cujas populações são p_1 e p_2 .

Também muito estudados²³ são os modelos do tipo Lotka-Volterra com n espécies, caracterizados pelo sistema de equações

$$\dot{p}_j(t) = \alpha_j p_j(t) + \sum_{k=1}^n \beta_{jk} p_j(t) p_k(t), \quad j = 1, \dots, n.$$

Mais generalidades sobre o modelo de Lotka-Volterra e sobre outras aplicações de equações diferenciais em modelos ecológicos e epidemiológicos podem ser encontradas, por exemplo, em [54] e [7]. Para outra referência sobre o modelo de Lotka-Volterra e assuntos correlatos, vide [159].

Comparados à realidade dos sistemas biológicos os modelos apresentados acima são bastante simplificados, deixando de lado vários efeitos possivelmente relevantes, tais como reprodução sexuada (machos só se reproduzem com fêmeas, não

²³Para um trabalho recente, vide P. Duarte R. L. Fernandez e W. M. Oliva “Dynamics on the attractor of the Lotka-Volterra equations”. J. Diff. Equations **149**, 143–189 (1998) e referências lá citadas.

com outros machos, fêmeas idem), imunidade ou não a doenças por parte das populações, tempos de gestação, ausência de reprodução durante a gestação, tempos de latência de doenças, limitação dos recursos do habitat, surgimento aleatório de mutações e vários outros fatores. Há toda uma área de pesquisa voltada à modelagem realista de sistemas biológicos e eco-sistemas. Alguns modelos estudados chegam a ser extremamente complexos, envolvendo dezenas de equações e de incógnitas. Para referências atualizadas sobre modelagem de sistemas biológicos, vide , [54], [159] ou [184].

• **Sistemas de primeira ordem**

O sistema de equações diferenciais ordinárias mais básico é o de primeira ordem:

$$\begin{aligned} \dot{y}_1(t) &= F_1(t, y_1, \dots, y_m), \\ \dot{y}_2(t) &= F_2(t, y_1, \dots, y_m), \\ &\vdots \\ \dot{y}_m(t) &= F_m(t, y_1, \dots, y_m), \end{aligned} \tag{11.16}$$

onde cada F_i é uma função de $m + 1$ variáveis. É conveniente simplificarmos um pouco a expressão (11.16). Introduzindo os vetores de m componentes

$$Y = \begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_m \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^m$$

e as funções $F : \mathbb{R}^{m+1} \rightarrow \mathbb{R}^m$

$$F(t, Y) = \begin{pmatrix} F_1(t, y_1, \dots, y_m) \\ \vdots \\ F_m(t, y_1, \dots, y_m) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_1(t, Y) \\ \vdots \\ F_m(t, Y) \end{pmatrix}$$

a expressão (11.16) fica

$$\dot{Y}(t) = F(t, Y(t)). \tag{11.17}$$

Como veremos logo adiante, todo sistema de equações diferenciais ordinárias pode ser escrito como um sistema de equações diferenciais ordinárias *de primeira ordem*, escrito quer na forma (11.16), quer na forma (11.17), para algum m e para alguma função $F : \mathbb{R}^{m+1} \rightarrow \mathbb{R}^m$.

• **Sistemas lineares de primeira ordem**

Muito importantes são os sistemas de m equações diferenciais ordinárias lineares de primeira ordem, os quais têm a forma

$$\begin{aligned} \dot{y}_1(t) &= a_{11}(t)y_1(t) + \dots + a_{1m}(t)y_m(t) + b_1(t), \\ \dot{y}_2(t) &= a_{21}(t)y_1(t) + \dots + a_{2m}(t)y_m(t) + b_2(t), \\ &\vdots \\ \dot{y}_m(t) &= a_{m1}(t)y_1(t) + \dots + a_{mm}(t)y_m(t) + b_m(t), \end{aligned} \tag{11.18}$$

para certas funções a_{ij} e b_j de t .

No casos em que as funções b_j acima são identicamente nulas o sistema é dito ser *homogêneo*. Caso contrário, é dito ser *não-homogêneo*.

• **Representação matricial de sistemas lineares**

Como veremos, é muito conveniente escrever o sistema linear (11.18) acima em *notação matricial*. De fato, definindo,

$$Y(t) = \begin{pmatrix} y_1(t) \\ \vdots \\ y_m(t) \end{pmatrix}, \quad A(t) := \begin{pmatrix} a_{11}(t) & \cdots & a_{1m}(t) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1}(t) & \cdots & a_{mm}(t) \end{pmatrix}, \quad B(t) = \begin{pmatrix} b_1(t) \\ \vdots \\ b_m(t) \end{pmatrix},$$

podemos escrever o sistema (11.18) como

$$\dot{Y}(t) = A(t)Y(t) + B(t),$$

como facilmente se vê. Sistemas lineares de primeira ordem serão estudados em detalhe no Capítulo 13 onde, em particular, faremos uso abundante da notação matricial acima.

• **Equivalência entre equações de ordem n e sistemas de EDOs**

Provaremos agora um fato simples, mas de grande relevância, tanto teórica quanto em aplicações (analíticas ou numéricas), a saber, que toda equação diferencial ordinária de ordem n é equivalente a um sistema de n equações de primeira ordem.

Seja a equação diferencial ordinária de ordem n

$$y^{(n)}(t) = F\left(t, y(t), \dots, y^{(n-1)}(t)\right). \tag{11.19}$$

Definindo $y_k(t) := y^{(k-1)}(t)$, para todo $k = 1, \dots, n$, teremos $y_1(t) = y(t)$ e

$$\begin{aligned} \dot{y}_1(t) &= y_2(t), \\ \dot{y}_2(t) &= y_3(t), \\ &\vdots \\ \dot{y}_{n-1}(t) &= y_n(t), \\ \dot{y}_n(t) &= F\left(t, y_1(t), \dots, y_n(t)\right). \end{aligned} \tag{11.20}$$

E. 11.1 *Exercício.* Verifique!

*

Este é um sistema como (11.16), onde, aqui,

$$\begin{aligned} F_1(t, y_1, \dots, y_n) &= y_2, \\ F_2(t, y_1, \dots, y_n) &= y_3, \\ &\vdots \\ F_{n-1}(t, y_1, \dots, y_n) &= y_n, \\ F_n(t, y_1, \dots, y_n) &= F\left(t, y_1(t), \dots, y_n(t)\right). \end{aligned}$$

Isso mostra que toda equação diferencial ordinária de ordem n , como (11.19), equivale a um sistema de n equações de primeira ordem, como (11.20).

E. 11.2 *Exercício importante.* Seja a equação diferencial ordinária linear de ordem n

$$y^{(n)}(t) + a_{n-1}(t)y^{(n-1)}(t) + \dots + a_1(t)y'(t) + a_0(t)y(t) = f(t).$$

Determine o sistema linear de n equações de primeira ordem equivalente e mostre que o mesmo pode ser escrito na forma matricial

$$\dot{Y}(t) = A(t)Y(t) + B(t),$$

onde

$$Y(t) := \begin{pmatrix} y(t) \\ y'(t) \\ \vdots \\ y^{(n-2)}(t) \\ y^{(n-1)}(t) \end{pmatrix}, \quad B(t) := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ f(t) \end{pmatrix}$$

e $A(t)$ é a matriz $n \times n$

$$A(t) := \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \ddots & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \\ -a_0(t) & -a_1(t) & -a_2(t) & \dots & -a_{n-2}(t) & -a_{n-1}(t) \end{pmatrix}.$$

Equação matriciais como acima serão estudadas com mais detalhe no Capítulo 13. ✱

E. 11.3 *Exercício.* Mostre que todo sistema de equações diferenciais ordinárias como (11.12) equivale a um sistema de equações de primeira ordem. *Sugestão:* use a mesma ideia acima, dando nomes às derivadas $y_i^{(n_j)}$ que aparecem no lado direito de (11.12). ✱

11.3 Discussão sobre Problemas de Valor Inicial

• Problemas de valor inicial

Como é bem sabido, a solução da equação diferencial $\dot{y}(t) = y(t)$ é dada por $y(t) = ce^t$, onde c é uma constante, a qual pode ser fixada, por exemplo, prescrevendo-se o valor da função y em $t = 0$: $y(0)$. Há outros exemplos simples em que a necessidade de fixação de certos valores para a função y pode ser vista de modo explícito. Considere-se a equação do oscilador harmônico simples $\ddot{x} + \omega_0^2 x = 0$. A solução geral dessa equação é $x(t) = A \cos(\omega_0 t) + B \sin(\omega_0 t)$, onde A

e B são duas constantes arbitrárias. Para determiná-las é preciso fornecer duas informações extras sobre a função, por exemplo, sua posição e sua velocidade em um instante de tempo. Se x_0 e v_0 forem a posição e velocidade no instante $t = 0$, então é fácil constatar que $A = x_0$ e $B = v_0/\omega_0$. Outro par de informações é também eventualmente possível. Por exemplo, podemos fornecer posição e velocidade em outro instante de tempo que não $t = 0$, ou em dois instantes de tempo distintos, um para a posição, outro para a velocidade. Em muitos casos é possível fixar a solução desejada informando apenas a posição em dois instantes de tempo distintos ou as velocidades em dois instantes de tempo distintos.

De modo geral, para a determinação completa da solução de uma equação diferencial ordinária de ordem n é preciso fornecer n informações sobre o valor da função e/ou suas derivadas em certos instantes²⁴.

O tipo de situação mais comum para a determinação completa da solução de uma equação diferencial ordinária de ordem n , especialmente em problemas da Mecânica, é aquele na qual são fornecidas informações sobre a função e suas $n - 1$ primeiras derivadas em um único instante de tempo, digamos $t = 0$. Tais problemas são conhecidos como *problemas de valor inicial*, ou *problemas de Cauchy*²⁵. O exemplo do oscilador harmônico acima é um típico problema de valor inicial: qual é a função que satisfaz a equação diferencial $\ddot{x} + \omega_0^2 x = 0$ e satisfaz $x(0) = x_0$ e $v(0) = v_0$, para certos números x_0 e v_0 dados? Resposta: $x(t) = x_0 \cos(\omega_0 t) + (v_0/\omega_0) \sin(\omega_0 t)$.

Assim, o problema de valor inicial associado à equação de ordem n

$$y^{(n)}(t) = F(t, y(t), \dots, y^{(n-1)}(t)) .$$

consiste em determinar a solução dessa equação que satisfaça

$$y(0) = y_1, \quad \dot{y}(0) = y_2, \quad \ddot{y}(0) = y_3, \dots, y^{(n-1)}(0) = y_n ,$$

para certos números dados y_1, \dots, y_n , os quais são denominados *condições iniciais* ou *dados iniciais*.

Após definirmos o que se entende por problema de valor inicial, uma série de questões se coloca. **1.** Todo problema de valor inicial tem solução? **2.** Se tiver, é única? **3.** Há condições suficientes para garantir que uma solução exista? **4.** E para que seja única? **5.** E se existir solução, será ela válida para todo t ? **6.** Há condições suficientes para garantir que uma solução exista para todo t ? **7.** Há condições suficientes para garantir continuidade da solução em relação às condições iniciais? **8.** Há condições suficientes para garantir continuidade da solução em relação aos parâmetros que ocorrem na equação?

Por várias razões as questões acima são muito importantes. Naturalmente, a melhor maneira de mostrar que um problema de valor inicial tem solução é exibindo a solução. Isso, porém, nem sempre é factível, pois muitas equações são difíceis, ou mesmo impossíveis, de se resolver de modo explícito. Por exemplo, a equação do pêndulo simples $\ddot{\theta} + \frac{g}{l} \sin(\theta) = 0$ tem solução para quaisquer condições iniciais, mas essa solução não pode ser apresentada de forma fechada em termos de funções elementares conhecidas, apenas em termos de expansões ou das chamadas funções elípticas. Vide, por exemplo, [201]. (Para um tratamento da equação do pêndulo em termos de equações integrais, vide Seção 28.2.3, página 1380, destas Notas). Daí a importância da questão **3**: é muitas vezes necessário saber *a priori* se uma solução existe antes de tentar encontrá-la.

Saber *a priori* se um problema de valor inicial tem solução e se essa solução é única pode ser importante para justificar métodos de solução. Muitas vezes, ao encontrarmos a solução de um problema de valor inicial perguntamo-nos se a solução encontrada é única. Por exemplo, pode-se facilmente constatar que as funções $x(t) = x_0 \cos(\omega_0 t) + (v_0/\omega_0) \sin(\omega_0 t)$ são soluções da equação do oscilador harmônico simples $\ddot{x} + \omega_0^2 x = 0$ com as condições iniciais $x(0) = x_0$ e $v(0) = v_0$. O que, porém, garante que não há outras funções que também sejam solução dessa equação para essas condições iniciais? Nisso reside a importância da questão **4**: em se sabendo *a priori* que a solução é única (esse é o caso para a equação do oscilador harmônico simples) não é necessário procurar outras soluções.

Equações diferenciais de interesse em Física tipicamente dependem de certos parâmetros. Por exemplo, a equação do oscilador harmônico simples, acima, depende do parâmetro ω_0 , a equação do pêndulo simples depende de g/l . Saber se uma solução depende continuamente de condições iniciais ou de parâmetros é importante em aplicações, por exemplo em Física, pois em problemas reais tais dados são frequentemente fornecidos com imprecisões e é, portanto, importante poder garantir que erros pequenos no conhecimento dessas grandezas têm efeitos igualmente pequenos nas soluções (ao menos para tempos não muito afastados do instante inicial).

Começemos por dizer que a resposta às questões **1** e **2** é negativa. Veremos exemplos logo adiante. Uma resposta às questões **3** e **4** será apresentada na forma de dois teoremas importantes, o de Peano (Teorema 11.1, página 514), que

²⁴Uma exceção notável é a equação de Clairaut, discutida na Seção 12.8, página 531, que possui uma solução, dita solução singular, não dependente de nenhum parâmetro livre.

²⁵Augustin Louis Cauchy (1789–1857).

fornece condições suficientes para garantir existência de soluções, e o de Picard-Lindelöf (Teorema 11.2, página 515. Vide também sua generalização para espaços de Banach, Teorema 28.4, página 1388), que fornece condições suficientes para garantir existência e unicidade de soluções. Mostraremos em exemplos que a resposta à questão 5 é também negativa. Uma resposta parcial à questão 6 (que é chamado de problema da existência de soluções globais) será discutida na Seção 11.3.3, página 516, e as demonstrações dos resultados lá apresentados encontram-se na Seção 28.2.4.2, página 1391. As questões 7 e 8 são discutidas à página 518 e, com mais detalhe, na Seção 28.2.4.3, página 1392. Vide Teorema 28.7, página 1392, sua demonstração e os comentários que se lhe seguem. Referências para várias dessas questões são [5], [104], [68], [37] e [148].

• **Problemas bem-postos**

Um comentário sobre nomenclatura. Na literatura sobre a teoria das equações diferenciais (ordinárias ou parciais), um problema no qual se possa garantir existência, unicidade e continuidade de soluções em relação a condições iniciais e de contorno em alguma topologia (estabilidade) é dito ser um *problema bem-posto*²⁶.

• **Outros problemas que não de valor inicial**

Como já mencionamos acima, há outros problemas que não o de valor inicial. Pode-se querer fixar a função em dois pontos, por exemplo. Problemas desse tipo são muito comuns em equações ordinárias obtidas pelo método de separação de variáveis em problemas de equações diferenciais parciais com certas condições de contorno. Trataremos abundantemente desse tipo de problema quando discutirmos o Problema de Sturm-Liouville no Capítulo 18, página 831.

Outros problemas envolvem outros tipos de exigência sobre a solução. Por exemplo, que ela seja finita em certos pontos, ou de quadrado integrável. Esse último caso é comumente encontrado na Mecânica Quântica.

11.3.1 Problemas de Valor Inicial. Patologias e Exemplos a se Ter em Mente

Nesta seção listaremos alguns exemplos instrutivos de problemas de valor inicial que exibem comportamento patológico, como inexistência ou não-unicidade de solução ou inexistência de solução global, ou seja, inexistência de solução válida em toda a reta real. É instrutivo ter alguns desses exemplos em mente. Na Seção 11.3.2, página 514, e na Seção 11.3.3, página 516, apresentaremos condições suficientes para evitar essas patologias.

• **Inexistência de solução**

Exemplo 11.5 (Inexistência de solução) Considere-se o problema de valor inicial no qual procura-se a solução da equação

$$\dot{y}(t) = \frac{1}{t}$$

que satisfaça a condição inicial $y(0) = 0$. Esse problema não possui nenhuma solução. □

E. 11.4 *Exercício.* Mostre isso. ✱

Exemplo 11.6 (Inexistência de solução) Considere-se o problema de valor inicial no qual procura-se a solução da equação

$$\dot{y}(t) = -\frac{1}{y(t)}$$

que satisfaça a condição inicial $y(0) = 0$. Esse problema não possui nenhuma solução que seja *real* para $t > 0$. □

E. 11.5 *Exercício.* Mostre isso. ✱

²⁶A noção de problema bem-posto foi introduzida por Jacques Salomon Hadamard (1865–1963) ao listar propriedades que modelos matemáticos de sistemas físicos devem idealmente possuir. Jaques Hadamard: “Sur les problèmes aux dérivées partielles et leur signification physique”. Princeton University Bulletin, 49–52 (1902).

Exemplo 11.7 (Inexistência de solução) Considere-se o problema de valor inicial no qual procura-se a solução da equação

$$\dot{y}(t) = \sqrt{1 - y(t)^2}$$

que satisfaça a condição inicial $y(0) = 2$. Esse problema não possui nenhuma solução real. \square

E. 11.6 *Exercício.* Mostre isso. \star

Exemplo 11.8 (Inexistência de solução) (De [155]) Considere-se o problema de valor inicial no qual procura-se a solução da equação

$$\dot{y}(t) = H(y(t)),$$

onde

$$H(y) := \begin{cases} 1, & y < 0 \\ -1, & y \geq 0 \end{cases},$$

com a condição inicial $y(0) = 0$. Esse problema não possui nenhuma solução. Para entender por que, observe que se $y(0) = 0$ então, pela equação diferencial, $y'(0) = -1$, o que implica $y(t)$ é decrescente para t próximo de 0, tornando-se negativa para t positivo próximo de 0. Mas para y negativo $\dot{y}(t)$ vale 1 e y é crescente, uma contradição. \square

E. 11.7 *Exercício.* Certo? \star

• Não-unicidade de soluções

Exemplo 11.9 (Não-unicidade de soluções) Considere-se o problema de valor inicial no qual procura-se a solução da equação

$$\dot{y}(t) = 3(y(t))^{2/3}$$

que satisfaça a condição inicial $y(0) = 0$. Esse problema não tem solução única. Por exemplo, as funções

$$y_1(t) \equiv 0 \quad \text{e} \quad y_2(t) = t^3$$

ambas satisfazem a equação diferencial e $y_1(0) = y_2(0) = 0$. \square

E. 11.8 *Exercício.* Verifique! \star

O Exemplo 11.9, acima, foi encontrado por Peano em 1890. Há várias outras soluções, como vemos na seguinte generalização.

Exemplo 11.10 (Não-unicidade de soluções) Seja $0 < \beta < 1$. Considere-se o problema de valor inicial no qual procura-se a solução da equação

$$\dot{y}(t) = \frac{1}{1-\beta} |y(t)|^\beta$$

que satisfaça a condição inicial $y(0) = 0$. Esse problema não tem solução única: a função $y(t) \equiv 0, \forall t \in \mathbb{R}$, assim como, para todos $c_1 \leq 0, c_2 \geq 0$, as funções

$$y_{c_1, c_2}(t) = \begin{cases} -(c_1 - t)^{\frac{1}{1-\beta}}, & t \leq c_1, \\ 0, & c_1 < t < c_2, \\ (t - c_2)^{\frac{1}{1-\beta}}, & t \geq c_2, \end{cases} \tag{11.21}$$

$$y_{c_1}(t) = \begin{cases} -(c_1 - t)^{\frac{1}{1-\beta}}, & t \leq c_1, \\ 0, & t > c_1, \end{cases} \quad y_{c_2}(t) = \begin{cases} 0, & t < c_2, \\ (t - c_2)^{\frac{1}{1-\beta}}, & t \geq c_2, \end{cases} \tag{11.22}$$

satisfazem a equação diferencial e anulam-se em $t = 0$. \square

E. 11.9 *Exercício.* Verifique! Desenhe gráficos de várias funções $y_{c_1, c_2}(t)$, $y_{c_1}(t)$ e $y_{c_2}(t)$ para vários valores de $c_1 \leq 0$, $c_2 \geq 0$. ✦

• Inexistência de soluções globais

Exemplo 11.11 (Solução que só existe em um intervalo finito) A equação diferencial é aquela apresentada no Exemplo 11.8, acima, com condição inicial $y(0) = y_0 > 0$. Para $-\infty < t < y_0$ a solução é $y(t) = y_0 - t$ mas para $t \geq y_0$ surge a contradição discutida no Exemplo 11.8 e a equação diferencial não mais possui solução. \square

Exemplo 11.12 (Solução que diverge em tempo finito) Considere-se o problema de valor inicial no qual procura-se a solução real da equação

$$\dot{y}(t) = y(t)^2,$$

$t \in \mathbb{R}$, que satisfaça a condição inicial $y(0) = y_0 \in \mathbb{R}$, $y_0 > 0$. A solução é

$$y(t) = \frac{1}{\frac{1}{y_0} - t}, \tag{11.23}$$

a qual diverge para $t = 1/y_0$. \square

Exemplo 11.13 (Solução que diverge em tempo finito) Considere-se a equação diferencial

$$\dot{y}(t) = 1 + y(t)^2,$$

$t \in \mathbb{R}$. Sua solução é $y(t) = \tan(t + k)$, onde k é fixada por uma condição inicial. Se, por exemplo, tomarmos $y(0) = y_0$, então $k = \arctan(y_0)$. Essa solução, porém, existe apenas no intervalo aberto $(-k - \frac{\pi}{2}, -k + \frac{\pi}{2})$, pois $\tan(t + k)$ diverge nos extremos. \square

Exemplo 11.14 (Solução que diverge em tempo finito) Os exemplos acima podem ser generalizados de uma forma importante. Considere-se a equação diferencial

$$\dot{y}(t) = F(t, y(t)),$$

para t e y reais, onde a função F satisfaz a desigualdade $F(a, b) \leq -b^2$ para todos $a, b \in \mathbb{R}$ (uma situação como essa ocorre na equação diferencial $\dot{y}(t) = -(y(t))^2 - f(t, y(t))$ caso f seja uma função não-negativa). Vale, portanto, a inequação diferencial $\dot{y}(t) \leq -(y(t))^2$, e como $(y(t))^2 \geq 0$ (pois y é uma função real), podemos escrever $\frac{\dot{y}(t)}{(y(t))^2} \leq -1$, o que implica, como facilmente

se vê, $\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{y(t)} \right) \geq 1$. Integrando-se ambos os lados entre 0 e t , obtemos

$$\frac{1}{y(t)} \geq t + \frac{1}{y(0)}. \tag{11.24}$$

Agora vejamos, se a condição inicial $y(0)$ for tal que $y(0) < 0$ então $1/y(t)$ começará negativa mas, de acordo com (11.24), passará a ser positiva o mais tardar no instante $t_0 = -\frac{1}{y(0)} > 0$. Consequentemente, devido à continuidade de $y(t)$, podemos afirmar que existe um instante $t_* \in (0, t_0]$ tal que $1/y(t_*) = 0$. Provamos, portanto, que sob as circunstâncias acima, a solução $y(t)$ existe apenas no intervalo $[0, t_*)$, divergindo em t_* .

Precisamente a situação acima descrita ocorre em um problema de suma importância na Teoria da Relatividade Geral, a saber, na demonstração de um célebre teorema, devido a Hawking²⁷, Penrose²⁸ e outros, da existência de singularidades espaço-temporais em modelos que satisfaçam uma condição denominada *condição forte de exergia*. A demonstração daquele teorema utiliza uma equação diferencial, denominada equação de Raychaudhuri²⁹, a qual tem a forma $\dot{y}(t) + (y(t))^2 + f(t, y(t)) = 0$ com f não-negativa. A divergência da solução y , em um tempo finito está naquele caso relacionada à impossibilidade de prolongar curvas geodésicas tipo-tempo além de um instante passado, fato diretamente interpretado como a presença do chamado “big bang” em certos modelos cosmológicos. \square

Exemplo 11.15 (Solução que diverge em tempo finito) Considere-se uma partícula de massa m que se move em uma dimensão sob a ação de um potencial repulsivo $U(x) = -\frac{k}{4}x^4$, com $k > 0$, com condição inicial $x(0) = 0$, $\dot{x}(0) = v_0 > 0$. Sua equação de movimento (a segunda lei de Newton) é

$$\ddot{x}(t) - k'x(t)^3 = 0,$$

²⁷Stephen William Hawking (1942–).

²⁸Sir Roger Penrose (1931–).

²⁹Amal Kumar Raychaudhuri (1923–2005).

onde $k' = k/m$. Qual o tempo que essa partícula leva para, partindo de $x(0) = 0$, chegar ao infinito? A resposta é

$$T_{0 \rightarrow \infty} = \int_0^\infty \frac{dx}{\sqrt{\frac{2}{m} (E + \frac{k}{4} x^4)}},$$

onde $E = \frac{mv_0^2}{2} > 0$ é a energia mecânica da partícula. □

E. 11.10 Exercício. Justifique a expressão dada acima para $T_{0 \rightarrow \infty}$. ✦

Para $E > 0$ a integral acima é finita (justifique!). Logo, a partícula leva um tempo finito para chegar ao infinito, ou seja, $x(t)$ diverge em tempo finito. Isso mostra que a solução da equação diferencial $\ddot{x}(t) - k'x(t)^3 = 0$, com $k' > 0$ e $v_0 > 0$, existe apenas em um intervalo finito de valores de t .

E. 11.11 Exercício. Mostre que o mesmo se passa com as equações diferenciais $\ddot{x}(t) - k'x(t)^d = 0$, para todo $d > 1$, desde que $k' > 0$. O que acontece se $k' < 0$? O que acontece se $k' > 0$ mas $d \geq 1$? ✦

11.3.2 Teoremas de Existência e Unicidade de Soluções

Os vários exemplos dados acima não devem causar uma impressão negativa sobre problemas de valor inicial pois, em verdade, os mesmos refletem patologias nem sempre encontradas na “prática” (entenda-se, na Física). No caso da Mecânica, por exemplo, assim como em outras áreas da Física, pode-se garantir existência e unicidade de solução da “maioria” dos problemas de valor inicial. Os exemplos acima advertem-nos, porém, da necessidade de alguns teoremas gerais que forneçam pelo menos condições suficientes para garantir existência e/ou unicidade de problemas de valor inicial. Na teoria das equações diferenciais ordinárias os mais importantes desses teoremas são os de Peano³⁰ e de Picard³¹-Lindelöf³², os quais enunciaremos agora.

Teorema 11.1 Teorema de Peano (Existência de Soluções). *Seja a equação diferencial ordinária real de primeira ordem*

$$\dot{y}(t) = F(t, y(t)) \tag{11.25}$$

($F : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ sendo não-identicamente nula) com a condição inicial

$$y(t_0) = y_0, \tag{11.26}$$

sendo $y_0 \in \mathbb{R}$. Seja $F : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ contínua no retângulo fechado

$$\mathcal{R} = \left\{ (t, y) : |t - t_0| \leq a, |y - y_0| \leq b \right\}, \tag{11.27}$$

com $a, b > 0$, sendo, portanto, limitada em \mathcal{R} . Seja

$$M := \max_{(t, y) \in \mathcal{R}} |F(t, y)|. \tag{11.28}$$

Então, o problema de valor inicial descrito pelas relações (11.25) e (11.26) apresenta pelo menos uma solução. Além disso, essa solução existe pelo menos no intervalo fechado $[t_0 - \beta, t_0 + \beta]$, onde

$$\beta := \min \left\{ a, \frac{b}{M} \right\}. \tag{11.29}$$

□

³⁰Giuseppe Peano (1858–1932). O Teorema de Peano data de 1886.
³¹Charles Émile Picard (1856–1941).
³²Ernst Leonard Lindelöf (1870–1946). Seus trabalhos sobre existência e unicidade de soluções de equações diferenciais ordinárias datam de 1890.

Em essência, o que esse teorema afirma é que se pode garantir a existência de soluções do problema de valor inicial descrito pelas relações (11.25) e (11.26) se pelo menos a função F for contínua em um retângulo centrado na condição inicial.

A prova do Teorema de Peano é baseada no importante Teorema de Ascoli discutido na Seção 34.3.4, página 1599 (vide Teoremas 34.18 e 34.19, páginas 1601 e 1603, respectivamente). A demonstração do Teorema de Peano é apresentada na Seção 34.3.4.3, página 1603, onde fazemos mais alguns comentários sobre o mesmo.

O estudante pode (deve) verificar que os Exemplos 11.5 a 11.7, página 511, não satisfazem as condições do Teorema de Peano, daí não haver solução naqueles casos.

O teorema de Peano garante condições suficientes para existência, mas não para unicidade de solução. O estudante também pode (deve) verificar que os Exemplos 11.9 e 11.10, página 512 acima, satisfazem as condições do teorema de Peano, mas para eles não vale a unicidade. É preciso requerer mais da função F para ter-se unicidade da solução. Isso é obtido com o próximo teorema.

Teorema 11.2 Teorema de Picard-Lindelöf (Existência e Unicidade de Soluções). *Seja a equação diferencial ordinária real de primeira ordem*

$$\dot{y}(t) = F(t, y(t)) \tag{11.30}$$

($F : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ sendo não-identicamente nula) com a condição inicial

$$y(t_0) = y_0, \tag{11.31}$$

com $y_0 \in \mathbb{R}$. Seja $F : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ contínua no retângulo fechado

$$\mathcal{R} = \left\{ (t, y) : |t - t_0| \leq a, |y - y_0| \leq b \right\}, \tag{11.32}$$

com $a, b > 0$, sendo, portanto, limitada em \mathcal{R} . Seja

$$M := \max_{(t, y) \in \mathcal{R}} |F(t, y)|. \tag{11.33}$$

Suponha ainda que F seja Lipschitz contínua em \mathcal{R} com relação ao seu segundo argumento, ou seja, existe uma constante k (denominada constante de Lipschitz) tal que para todos $(t, y), (t, v) \in \mathcal{R}$ valha

$$|F(t, y) - F(t, v)| \leq k|y - v|. \tag{11.34}$$

Então, o problema de valor inicial descrito pelas relações (11.30) e (11.31) apresenta uma única solução. Além disso, essa solução existe pelo menos no intervalo fechado $[t_0 - \beta, t_0 + \beta]$, onde

$$\beta := \min \left\{ a, \frac{b}{M} \right\}. \tag{11.35}$$

Uma condição suficiente para que a condição de Lipschitz acima se cumpra é que $\partial_y f(t, y)$ exista e seja limitada em todo \mathcal{R} , em cujo caso a constante de Lipschitz seria dada por $k := \sup_{(t, y) \in \mathcal{R}} |\partial_y f(t, y)|$. □

A prova do Teorema de Picard-Lindelöf será apresentada com bastante generalidade no Capítulo 28, página 1370. Vide Teorema 28.4, página 1388.

É importante notar que a condição de F ser Lipschitz³³ contínua em \mathcal{R} com relação ao seu segundo argumento pode ser obtida de uma condição mais forte, a saber, que a derivada parcial $\partial_y F(t, y)$ de F em relação ao segundo argumento seja contínua em \mathcal{R} . De fato, da relação

$$F(t, v) - F(t, u) = \int_u^v \partial_y F(t, y) dy,$$

segue facilmente que $|F(t, v) - F(t, u)| \leq k|v - u|$, onde $k := \max_{(t, y) \in \mathcal{R}} |\partial_y F(t, y)|$, que é uma constante finita se $\partial_y F(t, y)$ for contínua em \mathcal{R} . Assim, em essência, o que o Teorema de Picard-Lindelöf afirma é que se pode garantir a existência e

³³Rudolf Otto Sigmund Lipschitz (1832–1903).

a unicidade de soluções do problema de valor inicial descrito pelas relações (11.30) e (11.31) se pelo menos a função F e sua derivada parcial $\partial_y F(t, y)$ forem contínuas em um retângulo centrado na condição inicial.

Como comentário final, afirmamos que os teoremas de Peano e Picard-Lindelöf podem ser facilmente estendidos para sistemas de equações diferenciais de primeira ordem (em verdade, o Teorema 28.4, página 1388, já é enunciado com essa generalidade, o mesmo se dando com o Teorema de Peano, Teorema 34.21, página 1606). Como toda equação diferencial de ordem n é equivalente a um tal sistema, essas generalizações garantem condições suficientes para existência ou unicidade de solução de equações diferenciais ordinárias de qualquer ordem.

No caso de equações diferenciais parciais não existem teoremas tão fortes relativos à existência e unicidade de problemas de valor inicial como há no caso de equações diferenciais ordinárias. Um dos resultados mais importantes nessa direção, porém, é o Teorema de Cauchy-Kovalevskaya³⁴. Seu enunciado e sua demonstração podem ser encontrados, por exemplo, em [73, 74].

11.3.3 Soluções Globais

Vimos nos Exemplos 11.11 a 11.15 (página 513) que há equações diferenciais cujas soluções, ainda que existam e sejam eventualmente únicas, não são globais, ou seja, não podem ser definidas em toda reta real. A questão que naturalmente se coloca é a de encontrar condições suficientes para garantir a existência de soluções globais. Essa é uma vasta questão e nos limitaremos aqui a apresentar o resultado mais simples, o Teorema 11.3, abaixo. Igualmente importante é a questão de se demonstrar que uma determinada equação diferencial não possui soluções globais (se tal puder ser o caso). Um dos principais resultados da Teoria da Relatividade Geral e da Cosmologia, a existência do chamado “big bang” em uma classe bastante grande de modelos para o universo, foi tratado como um problema de não-existência de soluções globais de determinadas equações diferenciais. Vide [139].

O seguinte teorema, cuja demonstração é apresentada com mais generalidade na Seção 28.2.4.2, página 1391, apresenta condições suficientes para a existência de soluções globais.

Teorema 11.3 (Existência e unicidade de soluções globais) *Seja $F : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ contínua em todo \mathbb{R}^2 . Suponhamos também que para todo $a > 0$, a função F seja Lipschitz contínua em relação ao seu segundo argumento na faixa*

$$\mathcal{F}_{a, t_0} = \left\{ (t, y) \in \mathbb{R}^2 : |t - t_0| \leq a, y \in \mathbb{R} \text{ arbitrário} \right\},$$

ou seja, para cada $a > 0$ existe uma constante k_a (eventualmente dependente de a e denominada constante de Lipschitz) tal que para todos $(t, y), (t, v) \in \mathcal{F}_{a, t_0}$ vale $|F(t, y) - F(t, v)| \leq k_a |y - v|$. Então, para qualquer $x_0 \in \mathbb{R}$, o problema de valor inicial $\dot{x}(t) = F(t, x(t))$ com $x(t_0) = x_0$ apresenta uma solução única válida para todo $t \in \mathbb{R}$.

Uma condição suficiente para que a condição de Lipschitz acima se cumpra é que $\partial_y F(t, y)$ exista em todo \mathbb{R}^2 e seja limitada em cada faixa \mathcal{F}_{a, t_0} , em cujo caso as constantes de Lipschitz podem ser escolhidas como $k_a := \sup_{(t, y) \in \mathcal{F}_{a, t_0}} |\partial_y F(t, y)|$. □

E. 11.12 Exercício. Mostre que a equação diferencial não-linear $\dot{x} = \cos(x)$ satisfaz as condições do Teorema 11.3 e, portanto, possui soluções globais. Mostre explicitamente, por integração, que as soluções são dadas por $x(t) = \arctan(\sinh(t + c))$, onde c é uma constante a ser fixada pela condição inicial. Por meio dessa expressão explícita constata-se claramente que as soluções existem para todo $t \in \mathbb{R}$. ✦

E. 11.13 Exercício(de [67]). Mostre que a equação diferencial não-linear

$$\dot{x} = \frac{x^3 e^t}{1 + x^2} + t^2 \cos(x)$$

satisfaz as condições do Teorema 11.3. Sugestão: mostre que para esse caso

$$\frac{\partial F}{\partial y}(t, y) = \frac{(y^4 + 3y^2)}{(1 + y^2)} e^t - t^2 \sin(y) \text{ e, portanto, em cada faixa } \mathcal{F}_{a, t_0}, \left| \frac{\partial F}{\partial y}(t, y) \right| \leq 3e^a + a^2,$$

e podemos adotar $k_a = 3e^a + a^2$ para cada $a > 0$. ✦

³⁴Sofia Vasilyevna Kovalevskaya (1850–1891).

E. 11.14 *Exercício.* A equação diferencial não-linear $\dot{x} = x^2$ não satisfaz as condições do Teorema 11.3, pois a condição de Lipschitz requerida não é satisfeita em nenhuma faixa \mathcal{F}_{a, t_0} . Mostre isso. Com efeito, vimos no Exemplo 11.12, da página 513, que essa equação não possui soluções globais. Vide também os comentários da página 517 sobre esse problema. \spadesuit

E. 11.15 *Exercício.* Faça o mesmo para o Exemplo 11.13, página 513. \spadesuit

• Comentários sobre soluções globais. O Exemplo 11.9

Analisemos agora o Exemplo 11.9, página 512 sob a luz dos Teoremas de Peano e de Picard-Lindelöf. Aqui, $F(t, y) = 3y^{2/3}$, $t_0 = 0$, $y_0 = 0$. Tomando-se um retângulo fechado centrado em $(t_0, y_0) = (0, 0)$, ou seja, $\mathcal{R} = \{ (t, y) : |t| \leq a, |y| \leq b \}$, constata-se elementarmente que F é contínua e que

$$M := \max_{(t, y) \in \mathcal{R}} |F(t, y)| = \max_{y \in [-b, b]} 3y^{2/3} = 3b^{2/3}.$$

Assim, o Teorema de Peano garante a existência de solução para o intervalo fechado $[-\beta, \beta]$, onde $\beta := \min \{ a, \frac{b}{M} \} = \min \{ a, \frac{b^{1/3}}{3} \}$ (vide (11.29)). Os valores de a e de b podem ser escolhidos arbitrariamente grandes, sem violar a condição de continuidade de F . Conclui-se disso que podemos tomar β arbitrariamente grande. Assim, nesse particular exemplo, o Teorema de Peano garante-nos a existência de uma solução global, para todo t . Isso condiz com a observação que a solução identicamente nula, bem como as soluções (11.21) e (11.22) existem para todo t .

Por fim, é fácil verificar que a função $F(t, y) = 3y^{2/3}$ não satisfaz a condição de Lipschitz $|F(t, y) - F(t, v)| \leq k|y - v|$ para nenhum k em nenhum retângulo centrado em $(0, 0)$. Para isso observe que se tomássemos $v = 0$ e $y \geq 0$, a condição de Lipschitz diria que $3y^{2/3} \leq ky$, ou seja, $3y^{-1/3} \leq k$. Mas uma tal desigualdade é impossível, pois para $y \rightarrow 0$ o lado esquerdo diverge!

Isso justifica por que não se pode aplicar Picard-Lindelöf nesse caso (e a solução, de fato, não é única).

• Comentários sobre soluções globais. O Exemplo 11.12

O fato de o Teorema de Peano em princípio garantir apenas uma região conservadora de validade de solução, a saber o intervalo $[t_0 - \beta, t_0 + \beta]$, onde β é dado pela expressão (11.29), não está em desacordo com os exemplos: há sistemas satisfazendo as condições do Teorema de Peano para os quais não há soluções globais, ou seja, soluções que existem para todo $t \in \mathbb{R}$. O Exemplo 11.12, página 513, é um tal caso. Vamos reanalisá-lo sob a luz dos Teoremas de Peano e Picard-Lindelöf, estudando particularmente o que o Teorema de Peano nos diz sobre a região de existência de solução.

É bastante claro que no Exemplo 11.12 tem-se $F(t, y) = y^2$, e $t_0 = 0$ com $y_0 > 0$. Tomando-se um retângulo fechado centrado em $(t_0, y_0) = (0, y_0)$, ou seja, $\mathcal{R} = \{ (t, y) : |t| \leq a, |y - y_0| \leq b \}$, constata-se elementarmente que F é contínua e que

$$M := \max_{(t, y) \in \mathcal{R}} |F(t, y)| = \max_{y \in [y_0 - b, y_0 + b]} y^2 = (y_0 + b)^2.$$

O Teorema de Peano garante a existência de solução para o intervalo fechado $[-\beta, \beta]$, onde $\beta := \min \{ a, \frac{b}{M} \} = \min \{ a, \frac{b}{(y_0 + b)^2} \}$. O valor de a pode ser escolhido arbitrariamente grande, sem alterar o valor de M e sem violar a condição de continuidade de F . Conclui-se disso que podemos tomar $\beta = \frac{b}{(y_0 + b)^2}$. Para qual escolha de b a constante β assume seu maior valor? É um exercício fácil (faça-o!) mostrar que o lado direito da última expressão assume seu máximo em $b = y_0$, em cujo caso $\beta = \frac{1}{4y_0}$. Assim, o Teorema de Peano garante existência de solução no intervalo $[-\frac{1}{4y_0}, \frac{1}{4y_0}]$. Sabemos, porém que a solução (11.23) existe em um intervalo maior (e que contenha $t = t_0 = 0$), a saber $(-\infty, \frac{1}{y_0})$.

O que se aprende disso é que o intervalo de solução obtido pela estimativa (11.29) nem sempre é maximal, mas nem por isso contradiz-se o fato de nesse caso não haver solução válida para todo t .

Para sabermos se a solução é única, devemos estudar as condições do Teorema de Picard-Lindelöf. Sabemos que $F(t, y) - F(t, v) = y^2 - v^2 = (y + v)(y - v)$. Logo, $|F(t, y) - F(t, v)| = |y + v||y - v|$ e, para y e v no intervalo $[y_0 - b, y_0 + b]$, tem-se $|y + v| \leq 2(y_0 + b)$. Assim, adotando-se $k = 2(y_0 + b)$, vale a condição de Lipschitz

$$|F(t, y) - F(t, v)| \leq k|y - v|$$

para todos $(t, y), (t, v) \in \mathcal{R}$. Assim, a solução do problema do Exemplo 11.12 será única para quaisquer a e b que se tome.

11.3.4 Dependência Contínua de Condições Iniciais e de Parâmetros

Conforme mencionamos na página 510, é importante determinarmos condições sob as quais a solução de um problema de valor inicial é contínua em relação às condições iniciais e a parâmetros que ocorram na equação diferencial. Essas questões são respondidas com bastante generalidade e detalhe na Seção 28.2.4.3, página 1392. Vide Teorema 28.7, página 1392, sua demonstração e comentários que se lhe seguem. Os resultados encontram-se resumidos nos dois teoremas abaixo, os quais valem também para sistemas de equações diferenciais ordinárias.

Teorema 11.4 *Seja a equação diferencial ordinária real de primeira ordem $\dot{y}(t) = F(t, y(t))$ com a condição inicial $y(t_0) = y_0$, com $y_0 \in \mathbb{R}$, e suponhamos que sejam satisfeitas as condições descritas no Teorema 11.2, página 515, de modo que se garanta a existência de uma solução única $y(t, y_0)$ do problema de valor inicial em um intervalo $[t_0 - \beta, t_0 + \beta]$. Então, existe uma vizinhança J de $y_0 \in \mathbb{R}$ onde a solução $y(t, y_0)$ depende continuamente de y_0 . Mais precisamente, existe uma constante $\kappa > 0$ e uma vizinhança T de t_0 contida em $[t_0 - \beta, t_0 + \beta]$ tal que vale $|y(t, y_0) - y(t, y'_0)| \leq \kappa|y_0 - y'_0|e^{\kappa|t-t_0|}$ para todo $y'_0 \in J$ e todo $t \in T$. \square*

Teorema 11.5 *Seja a equação diferencial ordinária real de primeira ordem e dependente de um parâmetro p : $\dot{y}(t) = F(t, y(t), p)$ com a condição inicial $y(t_0) = y_0$, com $y_0 \in \mathbb{R}$, e suponhamos que sejam satisfeitas as condições descritas no Teorema 11.2, página 515, de modo que se garanta a existência de uma solução única $y(t, p)$ do problema de valor inicial em um intervalo $[t_0 - \beta, t_0 + \beta]$. Suponhamos também que F seja contínua e continuamente diferenciável em relação a p em alguma vizinhança. Então, $y(t, p)$ depende continuamente de p nessa vizinhança. \square*