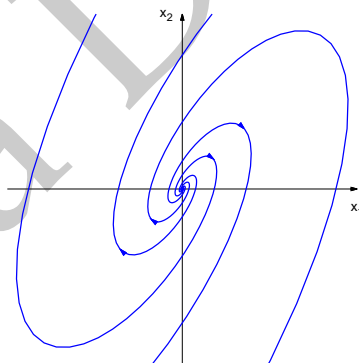


INTRODUÇÃO ÀS EQUAÇÕES DIFERENCIAIS ORDINÁRIAS

Reginaldo J. Santos

Departamento de Matemática-ICEx
Universidade Federal de Minas Gerais

<https://regijs.github.io>



Imprensa Universitária da UFMG - Belo Horizonte
Julho 2016

Introdução às Equações Diferenciais Ordinárias
Copyright © 2022 by **Reginaldo J. Santos** (2022.11.2)

Nenhuma parte desta publicação poderá ser reproduzida por qualquer meio sem a prévia autorização, por escrito, do autor.

Editor, Coordenador de Revisão, Supervisor de Produção, Capa e Ilustrações:
Reginaldo J. Santos

ISBN 978-85-7470-021-2

Ficha Catalográfica

S237i Santos, Reginaldo J.
Introdução às Equações Diferenciais Ordinárias / **Reginaldo J. Santos**
- Belo Horizonte: Imprensa Universitária da UFMG, 2022.

1. Equações Diferenciais I. Título

CDD: 515.3

SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO	viii
1 EQUAÇÕES DIFERENCIAIS DE 1ª ORDEM	1
1.1 Introdução às Equações Diferenciais	1
1.1.1 Classificação	7
1.1.2 Soluções de Equações Ordinárias	8
1.1.3 Equações Ordinárias de 1ª Ordem	12
Exercícios	14
1.2 Equações Lineares de 1ª Ordem	15
1.2.1 Equações em que $p(t) = 0$	15
1.2.2 Equações Lineares - Caso Geral	18
1.2.3 Como chegar ao fator integrante $\mu(t) = e^{\int p(t)dt}$?	24
Exercícios	26
1.3 Equações Separáveis	28
Exercícios	37
1.4 Equações Exatas	39
1.4.1 Fatores Integrantes	46
Exercícios	50
1.5 Substituições em Equações de 1ª Ordem	54
1.5.1 Equações Homogêneas de 1ª Ordem	54

1.5.2	Equações de Bernoulli	57
1.5.3	Equações de Ricatti	59
1.5.4	Equações da forma $y' = F(ax + by)$	62
	Exercícios	65
1.6	Aplicações	66
1.6.1	Dinâmica Populacional	66
1.6.2	Decaimento Radioativo	74
1.6.3	Misturas	78
1.6.4	Lei de Resfriamento de Newton	83
1.6.5	Lei de Torricelli	86
1.6.6	Velocidade de Escape	90
1.6.7	Resistência em Fluidos	92
1.6.8	Circuitos Elétricos	97
1.6.9	Juros	100
1.6.10	Reações Químicas de 2ª Ordem	110
1.6.11	Trajelórias Ortogonais	116
	Exercícios	120
1.7	Análise Qualitativa	129
1.7.1	Equações Autônomas	129
1.7.2	Campo de Direções	148
	Exercícios	150
1.8	Existência e Unicidade de Soluções	152
1.8.1	Demonstração do Teorema de Existência e Unicidade	158
	Exercícios	163
1.9	Respostas dos Exercícios	165
2	EQUAÇÕES DIFERENCIAIS LINEARES DE 2ª ORDEM	273
2.1	Equações Homôgneas - Parte I	275
2.1.1	Soluções Fundamentais	276
2.1.2	Fórmula de Euler	285
	Exercícios	287

2.2	Equações Homogêneas - Parte II	291
2.2.1	Obtendo-se uma Segunda Solução (Redução de Ordem)	291
2.2.2	Equações Homogêneas com Coeficientes Constantes	295
	Exercícios	307
2.3	Equações Não Homogêneas	309
2.3.1	Método de Variação dos Parâmetros	313
2.3.2	Método dos Coeficientes a Determinar para Equações com Coeficientes Constantes	320
	Exercícios	331
2.4	Oscilações Livres	332
2.4.1	Sem Amortecimento	335
2.4.2	Com Amortecimento	340
	Exercícios	350
2.5	Oscilações Forçadas	352
2.5.1	Sem Amortecimento	352
2.5.2	Com Amortecimento	359
2.5.3	Circuitos Elétricos	365
	Exercícios	368
2.6	Soluções em Séries de Potências	371
2.6.1	Demonstração do Teorema de Existência de Soluções em Séries	389
2.6.2	Demonstração das Propriedades de Séries de Potências	394
	Exercícios	397
2.7	Mudanças de Variáveis	404
2.7.1	Equações que não Contém y	404
2.7.2	Equações que não Contém t	405
2.7.3	Equações de Euler	407
2.7.4	Outras Mudanças	409
	Exercícios	411
2.8	Respostas dos Exercícios	412
3	TRANSFORMADA DE LAPLACE	489
3.1	Introdução	489

3.1.1	Demonstração da Injetividade da Transformada de Laplace	502
	Exercícios	506
3.2	Problemas de Valor Inicial	508
	Exercícios	519
3.3	Função de Heaviside e Equações com Termo Não Homogêneo Descontínuo	521
	Exercícios	540
3.4	Delta de Dirac ou Impulso Unitário	543
	Exercícios	551
3.5	Convolução	553
	Exercícios	565
3.6	Tabela de Transformadas de Laplace	566
3.7	Respostas dos Exercícios	567
4	SISTEMAS DE EQUAÇÕES DIFERENCIAIS LINEARES	610
4.1	A Matriz A é Diagonalizável em \mathbb{R}	619
4.1.1	Sistema com 2 Equações e 2 Incógnitas	619
4.1.2	Sistema com n Equações e n Incógnitas	621
4.1.3	Como Encontrar as Matrizes P e D	623
	Exercícios	638
4.2	A Matriz A é Diagonalizável em \mathbb{C}	642
4.2.1	Sistema com 2 Equações e 2 Incógnitas	642
4.2.2	Sistema com n Equações e n Incógnitas	645
4.2.3	Como Encontrar as Matrizes P e D	647
	Exercícios	657
4.3	A Matriz A não é Diagonalizável	659
4.3.1	Sistema com 2 Equações e 2 Incógnitas	659
4.3.2	Sistema com n Equações e n Incógnitas	661
4.3.3	Como Encontrar as Matrizes P e J	663
	Exercícios	671
4.4	Sistemas Não-Homogêneos (opcional)	672
4.4.1	A Matriz A é Diagonalizável em \mathbb{R}	673

4.4.2	A Matriz A é Diagonalizável em \mathbb{C}	678
4.4.3	A Matriz A não é Diagonalizável	682
4.4.4	Demonstração do Teorema de Existência e Unicidade	686
	Exercícios	690
4.5	Respostas dos Exercícios	691
BIBLIOGRAFIA		739
ÍNDICE ALFABÉTICO		741

APRESENTAÇÃO

Esse é um texto alternativo ao excelente livro Boyce-DiPrima [2] para a parte de equações diferenciais ordinárias, sendo mais objetivo e mais elementar. Entretanto aqui estão apresentadas provas elementares de resultados como os teoremas de existência e unicidade para equações diferenciais e para sistemas de equações diferenciais, o teorema sobre a existência de soluções em série de potências para equações lineares de 2ª ordem, a injetividade da transformada de Laplace e outros. O conteúdo corresponde ao programa da disciplina 'Equações Diferenciais A' que é ministrado para os alunos da área de ciências exatas na Universidade Federal de Minas Gerais.

O texto é dividido em quatro capítulos. No Capítulo 1 apesar do título ser 'Equações Diferenciais de 1ª Ordem' é feita uma introdução às equações diferenciais em geral e entre as equações de 1ª ordem são estudadas as equações lineares, as separáveis e as exatas. Tem uma seção sobre substituições em equações de 1ª ordem onde são estudadas entre outras, as equações homogêneas, as de Bernoulli e as de Ricatti. Terminamos o capítulo com aplicações das equações de 1ª ordem, análise qualitativa das equações autônomas e existência e unicidade de soluções.

As equações lineares de 2ª ordem é o assunto do Capítulo 2. Aqui o estudo tanto das equações homogêneas como das equações não homogêneas é feito inicialmente no caso geral e depois no caso particular em que os coeficientes são constantes. O capítulo contém também oscilações. O capítulo termina com soluções em série de potências em torno de $t_0 = 0$ no caso em que este ponto é ordinário e mudanças de variáveis em equações de 2ª ordem.

O Capítulo 3 trata da transformada de Laplace. O objetivo é resolver problemas de valor inicial para equações lineares de 2ª ordem tanto com o termo não homogêneo contínuo, quanto descontínuo. Terminamos o capítulo com a transformada de Laplace do delta de Dirac e com a convolução.

No Capítulo 4 o estudo de sistemas de equações diferenciais lineares é feito usando diagonalização de matrizes. O caso 2×2 é tratado em separado com detalhe. O capítulo termina com os sistemas não homogêneos.

Todos os exercícios estão resolvidos no final do capítulo correspondente. Uma coisa que acho importante é somente ler a solução de um exercício depois de ter tentado verdadeiramente resolvê-lo. É como quando lhe dão um enigma para decifrar. Se lhe contarem logo a solução, você a esquecerá logo depois. Quanto mais tempo você ficar tentando decifrar antes de lhe contarem a solução, tanto mais tempo você se lembrará da solução.

Os desenhos e gráficos foram feitos usando o MATLAB®* com o pacote GAAL e o Maxima também com o pacote GAAL disponíveis no site do autor (<http://www.mat.ufmg.br/~regi>). Neste site também estão disponíveis páginas interativas para o estudo de oscilações, equações parciais, séries de Fourier e outros.

Gostaria de agradecer ao professor Helder C. Rodrigues pelas frutíferas discussões, aos professores Rogério S. Mol, Antônio Gaspar Ruas, Francisco Dutenhefner, Grey Ercole, Hamilton P. Bueno, Antônio Zumpano, Marcelo T. Cunha, Jorge Sabatucci, Regina Radich, Marcelo Marchesin, Ricardo Takahashi, Lúcia Brasil, Armando G. M. Neves e Carlos A. Arteaga pelas críticas e sugestões que possibilitaram o aperfeiçoamento do presente texto.

*MATLAB é marca registrada de The Mathworks, Inc.

Sugestão de Cronograma

Capítulo 1	20 aulas
Capítulo 2	20 aulas
Capítulo 3	10 aulas
Capítulo 4	10 aulas
Total	60 aulas

1

EQUAÇÕES DIFERENCIAIS DE 1ª ORDEM

1.1 Introdução às Equações Diferenciais

Uma equação algébrica é uma equação em que as incógnitas são números, enquanto uma **equação diferencial** é uma equação em que as incógnitas são funções e a equação envolve derivadas destas funções. Apenas no último capítulo trataremos equações com mais de uma incógnita, nos outros as equações diferenciais têm somente uma incógnita. Numa equação diferencial em que a incógnita é uma função $y(t)$, t é a variável independente e y é a variável dependente. Vejamos alguns exemplos.

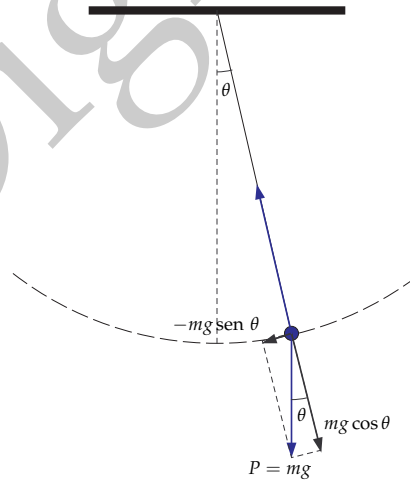


Figura 1.1. Pêndulo Simples

Exemplo 1.1. O movimento de um pêndulo simples de massa m e comprimento l é descrito pela função $\theta(t)$ que satisfaz a equação diferencial

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{g}{l} \sin \theta = 0.$$

Nesta equação a incógnita é a função $\theta(t)$. Assim, θ é a variável dependente e t é a variável independente.

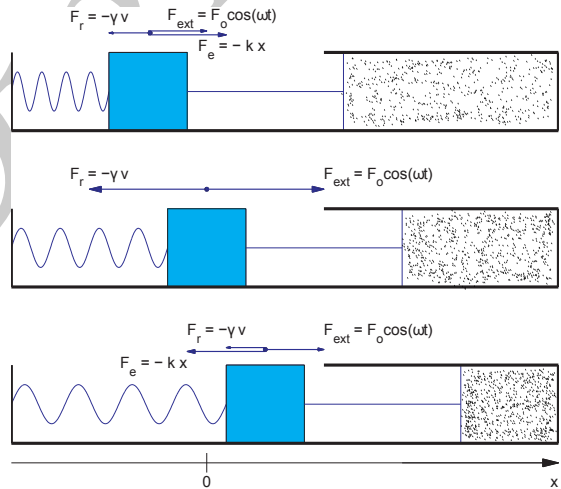


Figura 1.2. Sistema massa-mola

Exemplo 1.2. Em um sistema massa-mola composto de um corpo de massa m preso a uma mola com constante elástica k , sujeita a uma força de resistência $F_r = -\gamma v = -\gamma \frac{dx}{dt}$ e uma força externa $F_{\text{ext}}(t) = F_0 \cos(\omega t)$ o deslocamento da massa $x(t)$ satisfaz a equação diferencial

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + \gamma \frac{dx}{dt} + kx = F_0 \cos(\omega t).$$

Nesta equação a incógnita é a função $x(t)$. Assim, x é a variável dependente e t é a variável independente.

Exemplo 1.3. Numa região do plano em que não há cargas elétricas o potencial elétrico $u(x, y)$ em cada ponto (x, y) da região satisfaz a equação diferencial

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0,$$

chamada **equação de Laplace**. Nesta equação a incógnita é a função $u(x, y)$. Assim, u é a variável dependente e x e y são as variáveis independentes.

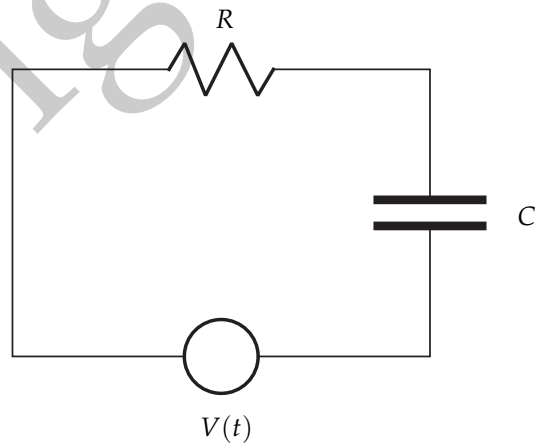


Figura 1.3. Circuito RC

Exemplo 1.4. Um circuito RC é um circuito que tem um resistor de resistência R , um capacitor de capacitância C e um gerador que gera uma diferença de potencial $V(t)$ ligados em série. A carga $Q(t)$ no capacitor satisfaz a equação diferencial

$$R \frac{dQ}{dt} + \frac{1}{C} Q = V(t).$$

Nesta equação a incógnita é a função $Q(t)$. Assim, Q é a variável dependente e t é a variável independente.

1.1.1 Classificação

As equações são classificadas quanto ao **tipo**, a **ordem** e a **linearidade**.

- (a) Quanto ao tipo uma equação diferencial pode ser **ordinária** ou **parcial**. Ela é ordinária se as funções incógnitas forem funções de somente uma variável. Caso contrário ela é parcial. Portanto, uma equação diferencial é ordinária se as derivadas que aparecem na equação são derivadas ordinárias. Por exemplo, as equações que podem ser escritas na forma

$$F(t, y, y', y'', \dots) = 0,$$

em que y é função apenas de t , são equações diferenciais ordinárias, como as equações dos [Exemplos 1.1](#), [1.2](#) e [1.4](#). A equação do [Exemplo 1.3](#) é parcial.

- (b) Quanto à ordem, uma equação diferencial pode ser de **1ª**, de **2ª**, ..., de **n -ésima ordem**, dependendo da derivada de maior ordem presente na equação. Uma equação diferencial ordinária de ordem n é uma equação que pode ser escrita na forma

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

As equações dos Exemplos 1.1, 1.2 e 1.3 são de 2ª ordem e a equação do Exemplo 1.4 é de 1ª ordem.

- (c) Quanto a linearidade uma equação diferencial pode ser **linear** ou **não linear**. Ela é linear se as incógnitas e suas derivadas aparecem de forma linear na equação, isto é, as incógnitas e suas derivadas aparecem em uma soma em que cada parcela ou é um produto de uma incógnita por uma função que não depende das incógnitas ou é um produto de uma derivada de alguma ordem de uma incógnita por uma função que não depende das incógnitas. Caso contrário ela é não linear. Por exemplo, uma equação diferencial ordinária linear de ordem n é uma equação que pode ser escrita como

$$a_0(t)y + a_1(t)\frac{dy}{dt} + a_2(t)\frac{d^2y}{dt^2} + \dots + a_n(t)\frac{d^ny}{dt^n} = f(t).$$

As equações diferenciais ordinárias que não podem ser colocadas nesta forma são não lineares. As equações dos Exemplos 1.2, 1.3 e 1.4 são lineares e a equação do Exemplo 1.1 é não linear.

1.1.2 Soluções de Equações Ordinárias

Uma **solução (particular) de uma equação diferencial ordinária de ordem n em um intervalo I** é uma função $y(t)$ definida no intervalo I tal que as suas derivadas de ordem até n estão definidas no intervalo I e satisfazem a equação neste intervalo. A solução de uma equação diferencial é também chamada **curva integral** da equação.

Exemplo 1.5. Considere a equação

$$ay'' + by' + cy = 0, \quad \text{com } a, b, c \in \mathbb{R}, a \neq 0 \text{ tais que } b^2 - 4ac = 0.$$

Vamos mostrar que $y(t) = e^{-\frac{b}{2a}t}$ é solução desta equação para $t \in \mathbb{R}$.

$$y'(t) = -\frac{b}{2a}e^{-\frac{b}{2a}t}, \quad y''(t) = \frac{b^2}{4a^2}e^{-\frac{b}{2a}t}$$

Substituindo-se $y(t)$, $y'(t)$ e $y''(t)$ no primeiro membro da equação obtemos

$$\begin{aligned} ay'' + by' + cy &= a \frac{b^2}{4a^2} e^{-\frac{b}{2a}t} + b \left(-\frac{b}{2a} e^{-\frac{b}{2a}t} \right) + c e^{-\frac{b}{2a}t} \\ &= \left(\frac{b^2}{4a} - \frac{b^2}{2a} + c \right) e^{-\frac{b}{2a}t} \\ &= \frac{-b^2 + 4ac}{4a} e^{-\frac{b}{2a}t} = 0, \end{aligned}$$

pois por hipótese $b^2 - 4ac = 0$. Assim, $y(t) = e^{-\frac{b}{2a}t}$ é solução da equação.

A solução geral de uma equação diferencial ordinária de ordem n em um intervalo I é uma família de soluções $y(t)$ no intervalo I , dependendo de n constantes arbitrárias, tal que qualquer solução particular pode ser obtida da solução geral atribuindo-se valores às constantes.

Exemplo 1.6. A solução geral da equação diferencial

$$\frac{dy}{dt} = e^{3t}$$

é o conjunto de todas as primitivas da função $f(t) = e^{3t}$, ou seja,

$$y(t) = \int e^{3t} dt + c = \frac{e^{3t}}{3} + c,$$

que é válida para $-\infty < t < \infty$, pois este é o maior intervalo em que a solução e sua derivada estão definidas.

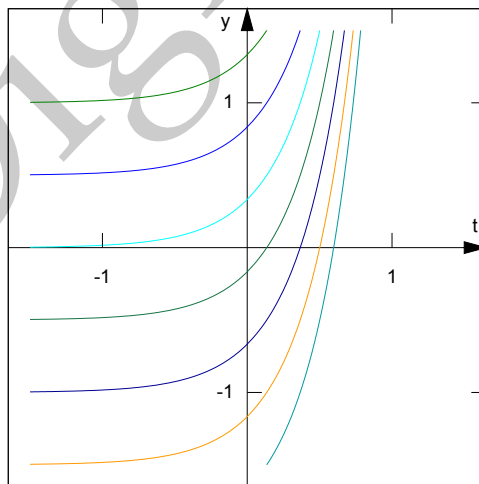


Figura 1.4. Soluções da equação do Exemplo 1.6

1.1.3 Equações Ordinárias de 1ª Ordem

As equações diferenciais ordinárias de 1ª ordem são equações que podem ser escritas como

$$F(t, y, y') = 0.$$

Vamos estudar equações de primeira ordem que podem ser escritas na forma

$$\frac{dy}{dt} = f(t, y). \quad (1.1)$$

Uma **solução (particular) de uma equação diferencial (1.1) em um intervalo I** é uma função $y(t)$ definida no intervalo I tal que a sua derivada $y'(t)$ está definida no intervalo I e satisfaz a equação (1.1) neste intervalo.

O problema

$$\begin{cases} \frac{dy}{dt} = f(t, y) \\ y(t_0) = y_0 \end{cases} \quad (1.2)$$

é chamado **problema de valor inicial (PVI)**. Uma **solução do problema de valor inicial (1.2) em um intervalo I** contendo t_0 é uma função $y(t)$ que está definida neste intervalo, tal que a sua derivada também está definida neste intervalo e satisfaz (1.2).

Exemplo 1.7. Vamos encontrar a solução do PVI

$$\begin{cases} \frac{dy}{dt} = e^{3t} \\ y(1/3) = e/3. \end{cases}$$

A solução geral da equação

$$\frac{dy}{dt} = e^{3t}$$

é o conjunto de todas as primitivas da função $f(t) = e^{3t}$, ou seja,

$$y(t) = \int e^{3t} dt + c = \frac{e^{3t}}{3} + c,$$

que é válida para $-\infty < t < \infty$.

Substituindo-se $t = 1/3$ e $y = e/3$ na solução geral encontrada obtemos $c = 0$. Assim, a solução do PVI é

$$y(t) = \frac{e^{3t}}{3}$$

válida para $-\infty < t < \infty$, que é o maior intervalo contendo $t_0 = 1/3$ em que a solução e sua derivada estão definidas.

Exercícios (respostas na página 165)

1.1. Classifique as equações abaixo quanto ao tipo, a ordem e a linearidade:

(a) $yy' + t = 0$.

(b) $x^2y'' + bxy' + cy = 0$.

1.2. Determine qual ou quais das funções $y_1(x) = x^2$, $y_2(x) = x^3$ e $y_3(x) = e^{-x}$ são soluções da equação

$$(x+3)y'' + (x+2)y' - y = 0.$$

1.3. Sejam $a, b, c \in \mathbb{R}$. Mostre que

(a) $y(t) = e^{rt}$, com r satisfazendo $ar + b = 0$, é solução da equação $ay' + by = 0$.

(b) $y(t) = e^{rt}$, com r satisfazendo $ar^2 + br + c = 0$, é solução da equação $ay'' + by' + cy = 0$.

(c) $y(x) = x^r$, com r satisfazendo $r^2 + (b-1)r + c = 0$, é solução da equação $x^2y'' + bxy' + cy = 0$.

1.4. Determine os valores de r para os quais a função $y(t)$ é solução da equação:

(a) $y(t) = \frac{r}{t^2-3}$ e $y' + ty^2 = 0$.

(c) $y(t) = \frac{r}{t^2+1}$ e $y' - 6ty^2 = 0$.

(b) $y(t) = \frac{r}{t^2+1}$ e $y' - 2ty^2 = 0$.

(d) $y(t) = \frac{r}{t^2+2}$ e $y' - ty^2 = 0$.

1.5. Determine todas as soluções da equação diferencial

$$ty'' + (t-1)y' - y = 0$$

que são funções de 1º grau, ou seja, da forma $y(t) = at + b$, para a e b constantes.

1.2 Equações Lineares de 1ª Ordem

As **equações (diferenciais ordinárias) lineares de 1ª ordem** são equações que podem ser escritas como

$$a(t) \frac{dy}{dt} + b(t)y = c(t).$$

Vamos considerar equações lineares de 1ª ordem na forma

$$\frac{dy}{dt} + p(t)y = q(t). \quad (1.3)$$

1.2.1 Equações em que $p(t) = 0$

Se a função $p(t) = 0$ a equação (1.3) torna-se

$$\frac{dy}{dt} = q(t), \quad (1.4)$$

que é facilmente resolvida integrando-se os dois lados. Assim, a solução geral desta equação é dada por

$$y(t) = \int q(t)dt + c.$$

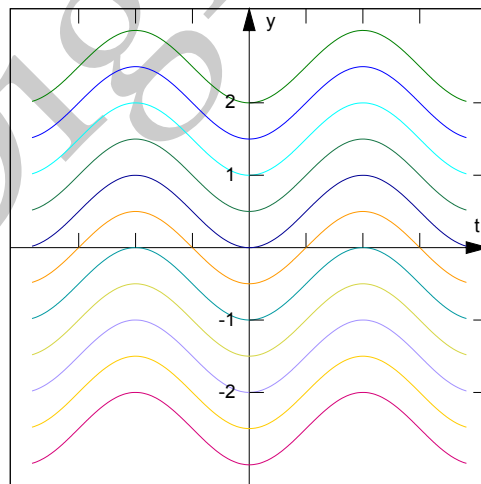
Exemplo 1.8. A solução geral da equação diferencial

$$\frac{dy}{dt} = \text{sen}(2t)$$

é o conjunto de todas as primitivas de $f(t) = \sin(2t)$, ou seja,

$$y(t) = \int \sin(2t) dt + c = -\frac{\cos(2t)}{2} + c.$$

Figura 1.5. Soluções da equação do Exemplo 1.8



Na subseção 1.2.2 e na seção 1.3 veremos técnicas de se encontrar soluções de equações de 1ª ordem que se baseiam em transformar a equação inicial em uma equação do tipo (1.4).

1.2.2 Equações Lineares - Caso Geral

Vamos considerar equações da forma

$$\frac{dy}{dt} + p(t)y = q(t), \quad (1.5)$$

em um intervalo em que $p(t)$ e $q(t)$ são contínuas.

Vamos definir uma função auxiliar, $\mu(t)$, de forma que ao multiplicarmos a equação (1.5) por esta função a equação obtida é uma equação linear com $p(t) = 0$, ou seja, do tipo (1.4), que já resolvemos anteriormente. Uma função com esta propriedade é chamada **fator integrante da equação linear**.

Seja

$$\mu(t) = e^{\int p(t)dt}.$$

Vamos mostrar agora que $\mu(t) = e^{\int p(t)dt}$ é um fator integrante da equação (1.5).

Observe em primeiro lugar que

$$\frac{d\mu}{dt} = e^{\int p(t)dt} \frac{d}{dt} \left(\int p(t)dt \right) = e^{\int p(t)dt} p(t) = \mu(t)p(t). \quad (1.6)$$

Assim, multiplicando-se (1.5) por $\mu(t)$, obtemos

$$\mu(t) \frac{dy}{dt} + \mu(t)p(t)y = \mu(t)q(t) \quad (1.7)$$

mas como por (1.6), $\mu(t)p(t) = \frac{d\mu}{dt}$, então (1.7) pode ser reescrita como

$$\mu(t) \frac{dy}{dt} + \frac{d\mu}{dt} y = \mu(t)q(t). \quad (1.8)$$

Mas o lado esquerdo dessa equação é a derivada de um produto o que faz com que ela possa ser reescrita na forma

$$\frac{d}{dt} (\mu(t)y(t)) = \mu(t)q(t) \quad (1.9)$$

A equação (1.9) é uma equação do tipo (1.4), ou seja,

$$\frac{dY}{dt} = f(t)$$

em que $Y(t) = \mu(t)y(t)$ e $f(t) = \mu(t)q(t)$. Assim, integrando-se ambos os membros de (1.9) temos que a solução geral de (1.9) é dada por

$$\mu(t)y(t) = \int \mu(t)q(t)dt + c.$$

Como $\mu(t) \neq 0$, para todo $t \in \mathbb{R}$, dividindo-se a equação anterior por $\mu(t)$ obtemos que a solução geral de (1.5) é dada por

$$y(t) = \frac{1}{\mu(t)} \left(\int \mu(t)q(t)dt + c \right)$$

Mostraremos na Subseção 1.2.3 como podemos chegar a $\mu(t) = e^{\int p(t)dt}$ como fator integrante da equação (1.5).

Atenção: Não se deve memorizar a fórmula obtida no final. O que fizemos aqui foi mostrar o caminho que deve ser seguido para resolver uma equação linear de 1ª ordem.

No próximo exemplo vamos seguir os mesmos passos que seguimos no caso geral.

Exemplo 1.9. Vamos encontrar a solução geral da equação diferencial

$$t \frac{dy}{dt} + 4y = 5t$$

e fazer esboços de algumas de suas soluções. Multiplicando-se a equação acima por $1/t$ obtemos a equação

$$\frac{dy}{dt} + \frac{4}{t}y = 5$$

O fator integrante é

$$\mu(t) = e^{\int \frac{4}{t} dt} = e^{4 \ln |t|} = e^{\ln t^4} = t^4.$$

Multiplicando-se a equação diferencial acima por $\mu(t)$ obtemos:

$$t^4 \frac{dy}{dt} + 4t^3 y = 5t^4.$$

O lado esquerdo é igual a derivada do produto $t^4 y(t)$. Logo, a equação acima é equivalente a

$$\frac{d}{dt} (t^4 y(t)) = 5t^4.$$

Integrando-se obtemos

$$t^4 y(t) = t^5 + c$$

Explicitando $y(t)$ temos que a solução geral da equação diferencial é

$$y(t) = t + \frac{c}{t^4}. \quad (1.10)$$

Vamos esboçar as soluções desta equação diferencial. Para $c = 0$ a solução é a reta

$$y_0(t) = t.$$

Para $c \neq 0$, temos que o domínio de $y(t)$ é o conjunto dos números reais tais que $t \neq 0$.

$$\lim_{t \rightarrow +\infty} y(t) = +\infty, \quad \text{se } c \neq 0$$

e

$$\lim_{t \rightarrow -\infty} y(t) = -\infty, \quad \text{se } c \neq 0.$$

Observamos da expressão da solução geral que para valores de $|t|$ muito grandes as soluções com $c \neq 0$ são próximas da solução com $c = 0$ que é $y_0(t) = t$. Sendo que se $c > 0$, elas estão acima de $y_0(t)$ e se $c < 0$ elas estão abaixo de $y_0(t)$.

Além disso,

$$\lim_{t \rightarrow 0^+} y(t) = +\infty, \quad \text{se } c > 0$$

e

$$\lim_{t \rightarrow 0^-} y(t) = -\infty, \quad \text{se } c < 0.$$

Vamos analisar o crescimento e decrescimento das soluções. A derivada da solução fornece informação sobre o crescimento e decrescimento da solução e sobre seus pontos críticos.

$$\frac{dy}{dt} = 1 - \frac{4c}{t^5} = 0$$

se, e somente se,

$$t^5 = 4c.$$

Assim, se $c \neq 0$ as soluções têm somente pontos críticos em $t = \sqrt[5]{4c}$. Portanto, concluímos que as soluções com $c > 0$ crescem no intervalo $(-\infty, 0)$, decrescem no intervalo $(0, \sqrt[5]{4c})$ e crescem no intervalo $(\sqrt[5]{4c}, +\infty)$. Enquanto as soluções com $c < 0$ crescem no intervalo $(-\infty, \sqrt[5]{4c})$, decrescem no intervalo $(\sqrt[5]{4c}, 0)$ e crescem de $(0, +\infty)$.

Observamos que para cada valor de $c \neq 0$ temos duas soluções com intervalos de validade $(-\infty, 0)$ e $(0, +\infty)$ e para $c = 0$ a solução $y_0(t) = t$ é válida no intervalo $(-\infty, +\infty) = \mathbb{R}$.

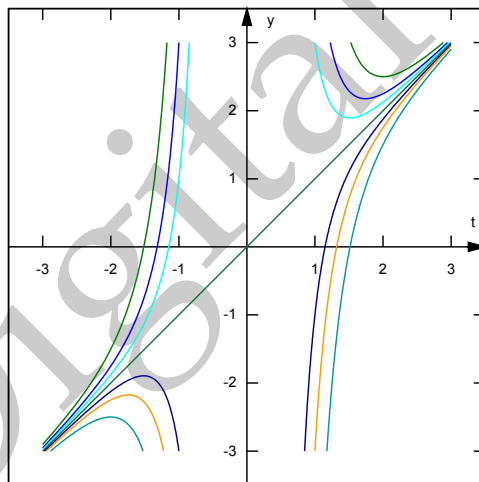


Figura 1.6. Soluções da equação do Exemplo 1.9

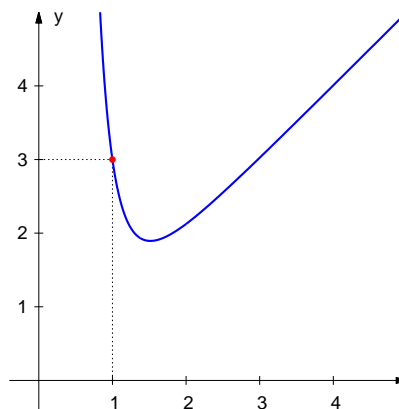


Figura 1.7. Solução do problema de valor inicial do Exemplo 1.10

Exemplo 1.10. Vamos encontrar a solução do problema de valor inicial

$$\begin{cases} t \frac{dy}{dt} + 4y = 5t, \\ y(1) = 3. \end{cases}$$

A equação é a mesma do **Exemplo 1.9**. Substituindo-se $t = 1$ e $y = 3$ na solução geral (1.10) obtemos

$$3 = 1 + \frac{c}{1}.$$

De onde obtemos que $c = 2$. Portanto, a solução do problema de valor inicial é

$$y(t) = t + \frac{2}{t^4}.$$

Observe que a solução deste problema de valor inicial é válida no intervalo $(0, +\infty)$, que é o maior intervalo contendo o ponto inicial $t_0 = 1$, (pois a condição inicial é $y(1) = 3$) em que a solução e sua derivada estão definidas.

Se o PVI fosse

$$\begin{cases} t \frac{dy}{dt} + 4y = 5t, \\ y(-1) = 1. \end{cases}$$

a solução teria a mesma expressão, mas o intervalo de validade da solução seria $(-\infty, 0)$.

1.2.3 Como chegar ao fator integrante $\mu(t) = e^{\int p(t)dt}$?

Vamos mostrar como podemos chegar ao fator integrante $\mu(t) = e^{\int p(t)dt}$. Comparando se as equações (1.7) e (1.8) na página 18 vemos que o fator integrante $\mu(t)$ deve ser

uma função que satisfaz a equação diferencial

$$\frac{d\mu}{dt} = p(t)\mu(t).$$

Esta é também uma equação linear, mas com $q(t) = 0$. Supondo-se $\mu(t) \neq 0$, vamos multiplicar esta equação por $1/\mu(t)$ obtendo a equação

$$\frac{1}{\mu(t)} \frac{d\mu}{dt} = p(t).$$

Como $\frac{1}{\mu(t)} = \frac{d}{d\mu} (\ln |\mu(t)|)$ a equação anterior pode ser reescrita como

$$\frac{d}{d\mu} (\ln |\mu(t)|) \frac{d\mu}{dt} = p(t).$$

Mas pela regra da cadeia, esta equação é equivalente a

$$\frac{d}{dt} (\ln |\mu(t)|) = p(t)$$

que é uma equação do tipo (1.4) que pode ser resolvida simplesmente integrando-se ambos os membros obtendo

$$\ln |\mu(t)| = \int p(t)dt + c_1.$$

Aplicando-se a exponencial a ambos os membros e eliminando-se o valor absoluto obtemos

$$\mu(t) = \pm e^{c_1} e^{\int p(t)dt} = c e^{\int p(t)dt}.$$

Como estamos interessados em apenas um fator integrante podemos tomar $c = 1$ e obtermos

$$\mu(t) = e^{\int p(t)dt}.$$

Exercícios (respostas na página 167)

2.1. Resolva os problemas de valor inicial:

(a) $\begin{cases} y' + (1 - 2x)y = xe^{-x} \\ y(0) = 2 \end{cases}$

(b) $\begin{cases} y' + 3t^2y = e^{-t^3+t} \\ y(0) = 2 \end{cases}$

(c) $\begin{cases} y' - \cos t y = te^{t^2+\sin t} \\ y(0) = 2 \end{cases}$

(d) $\begin{cases} y' + x^4y = x^4e^{\frac{4x^5}{5}} \\ y(0) = 1 \end{cases}$

2.2. Resolva as equações:

(a) $y' - \frac{4}{x}y = -\frac{2}{x^3}.$

(b) $y' - \frac{1}{x}y = -x.$

(c) $y' - \frac{4}{x}y = x^5e^x.$

2.3. (a) Resolva o problema de valor inicial: $\begin{cases} y' + 5x^4y = x^4 \\ y(0) = y_0 \end{cases}$

(b) Para quais valores de y_0 a solução é crescente e para quais valores de y_0 a solução é decrescente.

(c) Qual o limite de $y(x)$ quando x tende a $+\infty$. O limite depende de y_0 ?

2.4. (a) Resolva o problema de valor inicial: $\begin{cases} (x^2 - 9)y' + xy = 0 \\ y(5) = y_0 \end{cases}$

(b) Qual o intervalo de validade da solução?

(c) Qual o limite de $y(x)$ quando x tende a $+\infty$. O limite depende de y_0 ?

2.5. Considere a equação

$$\frac{dy}{dt} + p(t)y = 0$$

(a) Mostre que se $y_1(t)$ e $y_2(t)$ são soluções da equação, então $y(t) = y_1(t) + y_2(t)$ também o é.

(b) Mostre que se $y_1(t)$ é solução da equação, então, para qualquer constante c , $y(t) = cy_1(t)$ também o é.

2.6. Considere as equações

$$\frac{dy}{dt} + p(t)y = 0 \quad (1.11)$$

$$\frac{dy}{dt} + p(t)y = q(t) \quad (1.12)$$

Mostre que se $y_1(t)$ é solução da equação (1.11) e $y_2(t)$ é solução da equação (1.12), então $y(t) = cy_1(t) + y_2(t)$ é solução de (1.12), para qualquer constante c .

2.7. (a) Encontre a solução geral da equação diferencial $t \frac{dy}{dt} + 2y = t^2$ e faça um esboço do gráfico de algumas soluções.

(b) Resolva o PVI $\begin{cases} t \frac{dy}{dt} + 2y = t^2, \\ y(2) = 3 \end{cases}$ e faça um esboço do gráfico da solução.

2.8. Resolva o PVI $\begin{cases} (1+x^2)y' + 2xy = f(x), \\ y(0) = 0, \end{cases}$ em que $f(x) = \begin{cases} x, & \text{se } 0 \leq x < 1 \\ -x, & \text{se } x \geq 1. \end{cases}$

2.9. Considere o problema de valor inicial $\begin{cases} y' + y = 1 - t, \\ y(0) = y_0. \end{cases}$

Determine para qual valor de y_0 a solução do PVI tem um máximo local no eixo t .

1.3 Equações Separáveis

As **equações (diferenciais ordinárias) separáveis** são equações que podem ser escritas na forma

$$g(y) \frac{dy}{dx} = f(x). \quad (1.13)$$

Seja

$$h(y) = \int g(y) dy.$$

Então,

$$\frac{dh}{dy} = g(y).$$

Substituindo-se $g(y)$ por $\frac{dh}{dy}$ na equação (1.13), obtemos

$$\frac{dh}{dy} \frac{dy}{dx} = f(x). \quad (1.14)$$

Mas, pela regra da cadeia

$$\frac{d}{dx} h(y(x)) = \frac{dh}{dy} \frac{dy}{dx},$$

o que implica que (1.14) pode ser escrita como

$$\frac{d}{dx} h(y(x)) = f(x). \quad (1.15)$$

A equação (1.15) é do tipo (1.4) na página 15, ou seja, é da forma

$$\frac{dY}{dx} = f(x),$$

em que $Y(x) = h(y(x))$. Assim, integrando-se (1.15) dos dois lados obtemos que a solução geral de (1.13) é dada **implicitamente** por

$$h(y) = \int f(x)dx + c.$$

Também podemos obter a solução da maneira mostrada a seguir. Integrando-se em relação a x ambos os membros de (1.13) obtemos

$$\int g(y) \frac{dy}{dx} dx = \int f(x)dx + c,$$

que pode ser reescrita como

$$\int g(y)y' dx = \int f(x)dx + c.$$

Fazendo a substituição $y' dx = dy$ obtemos

$$\int g(y) dy = \int f(x)dx + c.$$

Atenção: Não se deve memorizar a fórmula obtida no final. O que fizemos aqui foi mostrar o caminho que deve ser seguido para resolver uma equação separável.

As curvas que são soluções de uma equação separável podem ser vistas como curvas de nível da função

$$z = F(x, y) = h(y) - \int f(x)dx.$$

Exemplo 1.11. Vamos, agora, encontrar a solução geral da equação diferencial

$$2y \frac{dy}{dx} = -4x \quad \text{ou} \quad 2yy' = -4x.$$

Integrando-se em relação a x ambos os membros, obtemos

$$\int 2yy' dx = - \int 4x dx + c.$$

Fazendo a substituição $y'dx = dy$, obtemos

$$\int 2y dy = - \int 4x dx + c.$$

Assim, a solução geral é dada implicitamente por

$$y^2 = -2x^2 + c.$$

Estas são equações de elipses ([Figura 1.8](#)) que são as curvas de nível da função

$$z = f(x, y) = y^2 + 2x^2.$$

O gráfico da função $f(x, y) = y^2 + 2x^2$ é um parabolóide elíptico ([Figura 1.9](#)).

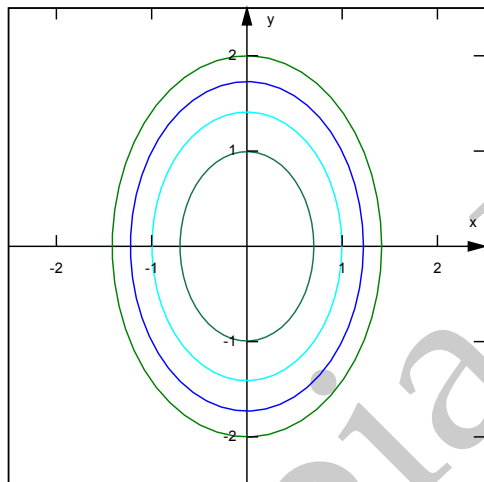


Figura 1.8. Soluções da equação diferencial do Exemplo 1.11

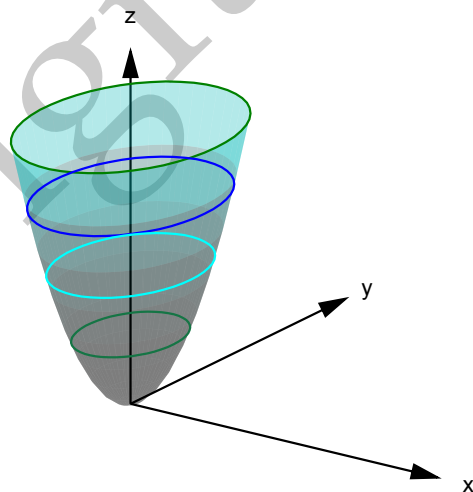


Figura 1.9. Soluções da equação diferencial do Exemplo 1.11 como curvas de nível do parabolóide elíptico $z = F(x, y) = 2x^2 + y^2$

Exemplo 1.12. (a) Encontre a solução do problema de valor inicial

$$\begin{cases} \frac{dy}{dx} = \frac{2x-1}{3y^2-3} \\ y(1) = 0. \end{cases}$$

- (b) Determine o **intervalo de validade da solução**, ou seja, o maior intervalo contendo $x_0 = 1$ para o qual a solução $y(x)$ e sua derivada $\frac{dy}{dx}$ estão definidas.
- (c) Determine os pontos onde a solução tem um máximo local.
- (d) Faça um esboço do gráfico da solução.

Solução:

- (a) Multiplicando-se a equação diferencial por $3y^2 - 3$ obtemos

$$(3y^2 - 3)y' = 2x - 1.$$

Integrando-se em relação a x ambos os membros obtemos

$$\int (3y^2 - 3)y' dx = \int (2x - 1)dx + c.$$

Fazendo-se a substituição $y'dx = dy$ obtemos

$$\int (3y^2 - 3) dy = \int (2x - 1)dx + c.$$

Assim, a solução geral é dada implicitamente por

$$y^3 - 3y = x^2 - x + c.$$

Para encontrar a solução que satisfaz a condição inicial $y(1) = 0$ substituímos $x = 1$ e $y = 0$ na solução geral obtendo $c = 0$. Assim, a solução do problema de valor inicial é dada implicitamente por

$$y^3 - 3y - x^2 + x = 0.$$

- (b) Para determinar o intervalo de validade da solução do PVI vamos determinar o maior intervalo que contém $x_0 = 1$ em que a solução e sua derivada estão definidas. Pela equação $\frac{dy}{dx} = \frac{2x-1}{3y^2-3}$, temos que os pontos onde a derivada não está definida são aqueles tais que $3y^2 - 3 = 0$, ou seja, $y = \pm 1$. Como o ponto inicial é $(1, 0)$, então a solução do PVI está contida na região do plano $-1 < y < 1$. Substituindo-se $y = -1$ na equação que define a solução, obtemos a equação $x^2 - x - 2 = 0$, que tem solução $x = -1$ e $x = 2$. Substituindo-se $y = 1$ na equação que define a solução $y^3 - 3y - x^2 + x = 0$, obtemos a equação $x^2 - x + 2 = 0$, que não tem solução real.

Como a derivada não está definida para $x = -1$ e $x = 2$ e o ponto inicial $x_0 = 1$ está entre estes valores, concluímos que o intervalo de validade da solução do PVI é o intervalo $(-1, 2)$, que é o maior intervalo em que a solução do PVI, $y = y(x)$, e a sua derivada estão definidas.

- (c) Nos pontos onde a solução tem máximo local a reta tangente à curva é horizontal, ou seja, pontos onde $\frac{dy}{dx} = 0$. Neste caso não precisamos calcular a derivada da solução, pois a derivada já está dada pela equação diferencial, ou seja,

$$\frac{dy}{dx} = \frac{2x-1}{3y^2-3}$$

Assim, a reta tangente é horizontal para x tal que $2x - 1 = 0$, ou seja, somente para $x = 1/2$ que é ponto de máximo local, pois como a solução está limitada

à região $-1 < y < 1$, então da equação diferencial vemos que $\frac{dy}{dx} > 0$, para $x < 1/2$ e $\frac{dy}{dx} < 0$, para $x > 1/2$.

- (d) Nos pontos $x = -1$ e $x = 2$ a reta tangente à curva solução $y^3 - 3y - x^2 + x = 0$ é vertical, ou seja, $\frac{dx}{dy} = 0$, pois pela equação diferencial,

$$\frac{dx}{dy} = \frac{1}{\frac{dy}{dx}} = \frac{3y^2 - 3}{2x - 1},$$

para $x \neq 1/2$. Assim, já sabemos pelo item (b) que a solução está contida em uma curva que passa pelos pontos $(-1, -1)$ e $(2, -1)$ onde a tangente é vertical, e que passa pelo ponto inicial $(1, 0)$. Neste ponto a inclinação da tangente é $-1/3$, pois substituindo-se $x = 1$ e $y = 0$ na equação diferencial, obtemos $\frac{dy}{dx} = -1/3$. Além disso, sabemos que o único ponto em que a tangente é horizontal ocorre para $x = 1/2$ e como a solução está limitada à região $-1 < y < 1$, então da equação diferencial vemos que $\frac{dy}{dx} > 0$, para $x < 1/2$ e $\frac{dy}{dx} < 0$, para $x > 1/2$. Deduzimos daí que a solução é crescente até $x = 1/2$ depois começa a decrescer.

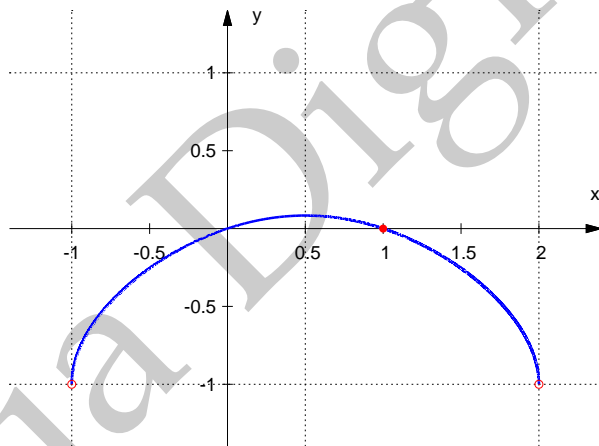


Figura 1.10. Solução do problema de valor inicial do Exemplo 1.12

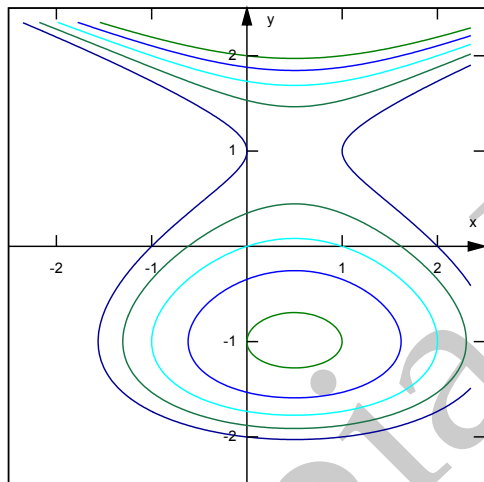


Figura 1.11. Soluções da equação diferencial do Exemplo 1.12

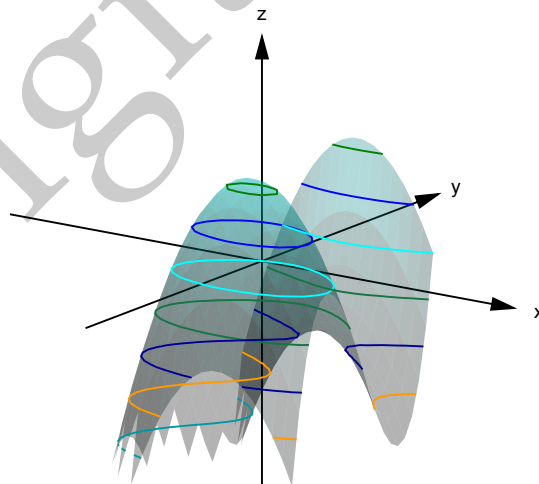


Figura 1.12. Soluções da equação diferencial do Exemplo 1.12 como curvas de nível de uma função de duas variáveis $z = f(x, y) = y^3 - 3y - x^2 + x$

Exercícios (respostas na página 180)

3.1. Resolva as equações:

- (a) $(1 + x^2)y' - xy = 0$.
- (b) $y^2 - 1 - (2y + xy)y' = 0$.
- (c) $(ayx^2 + by)y' - x = 0$ para $a, b \in \mathbb{R}, a \neq 0$.
- (d) $(ax^2 + b)^{1/2}y' - xy^3 = 0$ para $a, b \in \mathbb{R}, a \neq 0$.
- (e) $(ay^2 + b)^{1/2} - xyy' = 0$ para $a, b \in \mathbb{R}, a \neq 0$.
- (f) $ay^2 + b - x^2yy' = 0$ para $a, b \in \mathbb{R}, a \neq 0$.

3.2. (a) Encontre a solução do problema de valor inicial

$$\begin{cases} \frac{dy}{dx} = \frac{2x+1}{3y^2-3} \\ y(0) = 0 \end{cases}$$

- (b) Determine o intervalo de validade da solução.
- (c) Determine os pontos onde a solução tem um máximo local.
- (d) Faça um esboço do gráfico da solução.

3.3. Mostre que a equação linear $y' + p(t)y = q(t)$ é equivalente a uma equação separável se

- (a) $p(t) = a$ e $q(t) = b$, para $a, b \in \mathbb{R}$;
- (b) $p(t) = q(t)$;
- (c) $q(t) = 0$.

3.4. Resolva o PVI

$$\begin{cases} \frac{dy}{dt} = y(100 - y), \\ y(0) = 1 \end{cases}$$

e faça um esboço do gráfico da solução.

3.5. Considere o problema de valor inicial

$$\begin{cases} \frac{dy}{dx} = \frac{3 \operatorname{sen}(3x)}{2 \cos(4y)}, \\ y(-\frac{\pi}{3}) = \frac{\pi}{4}. \end{cases}$$

- (a) Determine a solução do PVI.
- (b) Determine o intervalo de validade da solução do PVI.

1.4 Equações Exatas

As **equações exatas** são equações que podem ser escritas na forma

$$M(x, y) + N(x, y) \frac{dy}{dx} = 0 \quad (1.16)$$

em que as funções $M(x, y)$ e $N(x, y)$ satisfazem

$$\frac{\partial M}{\partial y} = \frac{\partial N}{\partial x}, \quad (1.17)$$

em um retângulo

$$\{(x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid \alpha < x < \beta, \gamma < y < \theta\},$$

em que $M(x, y)$, $N(x, y)$, $\frac{\partial M}{\partial y}$ e $\frac{\partial N}{\partial x}$ são contínuas.

Nestas condições mostraremos depois que existe uma função $\psi(x, y)$ tal que

$$M(x, y) = \frac{\partial \psi}{\partial x} \quad \text{e} \quad N(x, y) = \frac{\partial \psi}{\partial y}. \quad (1.18)$$

Substituindo-se estes valores de $M(x, y)$ e de $N(x, y)$ em (1.16) obtemos

$$\frac{\partial \psi}{\partial x} + \frac{\partial \psi}{\partial y} \frac{dy}{dx} = 0. \quad (1.19)$$

Mas, pela regra da cadeia

$$\frac{d}{dx} (\psi(x, y(x))) = \frac{\partial \psi}{\partial x} + \frac{\partial \psi}{\partial y} \frac{dy}{dx}.$$

Então, (1.19) pode ser escrita como

$$\frac{d}{dx} (\psi(x, y(x))) = 0. \quad (1.20)$$

A equação (1.20) é do tipo (1.4), ou seja,

$$\frac{dY}{dx} = f(x),$$

em que $Y(x) = \psi(x, y(x))$ e $f(x) = 0$. Assim, a solução geral de (1.20) e portanto de (1.16) é dada por

$$\psi(x, y(x)) = c. \quad (1.21)$$

Vamos, agora, ver como encontrar a função $\psi(x, y)$. Integrando-se a 1ª equação de (1.18) em relação a x obtemos

$$\psi(x, y) = \int M(x, y) dx + h(y), \quad (1.22)$$

em que $h(y)$ é uma função a ser determinada. $\psi(x, y)$ dada por (1.22) é solução da 1ª equação de (1.18) pois derivando a equação (1.22) em relação a x obtemos a 1ª equação de (1.18). Substituindo-se a função $\psi(x, y)$ encontrada em (1.22) na 2ª equação de (1.18) obtemos

$$N(x, y) = \frac{\partial \psi}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\int M(x, y) dx \right) + \frac{dh}{dy} = \int \frac{\partial M}{\partial y} dx + \frac{dh}{dy}.$$

Daí obtemos uma equação diferencial para $h(y)$:

$$\frac{dh}{dy} = N(x, y) - \int \frac{\partial M}{\partial y} dx. \quad (1.23)$$

Se a equação (1.16) é exata o lado esquerdo de (1.23) não depende de x , pois usando (1.17) obtemos

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(N(x, y) - \int \frac{\partial M}{\partial y} dx \right) = \frac{\partial N}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\int \frac{\partial M}{\partial y} dx \right) = \frac{\partial N}{\partial x} - \frac{\partial M}{\partial y} = 0.$$

A equação (1.23) é do tipo (1.4) na página 15, ou seja,

$$\frac{dZ}{dy} = f(y)$$

em que $Z(y) = h(y)$ e $f(y) = N(x, y) - \int \frac{\partial M}{\partial y} dx$. Assim, uma solução é dada por

$$h(y) = \int N(x, y) dy - \int \left(\int \frac{\partial M}{\partial y} dx \right) dy.$$

Substituindo-se este valor de $h(y)$ em (1.22) obtemos

$$\psi(x, y) = \int M(x, y) dx + \int N(x, y) dy - \int \left(\int \frac{\partial M}{\partial y} dx \right) dy.$$

Portanto, a solução geral da equação exata (1.16) é, por (1.21),

$$\psi(x, y) = \int M(x, y) dx + \int N(x, y) dy - \int \left(\int \frac{\partial M}{\partial y} dx \right) dy = c.$$

Atenção: Não se deve memorizar a fórmula obtida no final. O que fizemos aqui foi mostrar o caminho que deve ser seguido para resolver uma equação exata.

Exemplo 1.13. Considere a equação diferencial

$$\frac{2y(1+x^2)}{1+2x^2}y' - \frac{2xy^2}{(1+2x^2)^2} = 1.$$

Para esta equação,

$$M(x, y) = -\frac{2xy^2}{(1+2x^2)^2} - 1 \quad \text{e} \quad N(x, y) = \frac{2y(1+x^2)}{1+2x^2}.$$

Assim,

$$\begin{aligned}\frac{\partial M}{\partial y} &= \frac{-4xy}{(1+2x^2)^2} \\ \frac{\partial N}{\partial x} &= y \frac{(-1)(4x)}{(1+2x^2)^2} = \frac{-4xy}{(1+2x^2)^2}\end{aligned}$$

Como $\frac{\partial M}{\partial y} = \frac{\partial N}{\partial x}$, para todo par $(x, y) \in \mathbb{R}^2$, então a equação é exata. Vamos encontrar uma função $\psi(x, y)$ tal que

$$\frac{\partial \psi}{\partial x} = M(x, y) = -\frac{2xy^2}{(1+2x^2)^2} - 1 \quad \text{e} \quad \frac{\partial \psi}{\partial y} = N(x, y) = \frac{2y(1+x^2)}{1+2x^2}$$

Integrando-se a 1ª equação em relação a x obtemos

$$\psi(x, y) = \int \left(\frac{-2xy^2}{(1+2x^2)^2} - 1 \right) dx = y^2 \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{1+2x^2} - x + h(y) = \frac{y^2}{2(1+2x^2)} - x + h(y)$$

Substituindo-se a função $\psi(x, y)$ encontrada na equação $\frac{\partial \psi}{\partial y} = N(x, y) = \frac{2y(1+x^2)}{1+2x^2}$ obtemos

$$\frac{y}{1+2x^2} + \frac{dh}{dy} = \frac{2y(1+x^2)}{1+2x^2}.$$

Esta equação pode ser reescrita como

$$\frac{dh}{dy} = \frac{2y(1+x^2)}{1+2x^2} - \frac{y}{1+2x^2} = \frac{y+2x^2y}{1+2x^2} = y$$

que tem solução geral $h(y) = \frac{y^2}{2} + c_1$. Assim, a solução geral da equação é dada implicitamente por

$$\psi(x, y) = \frac{y^2}{2(1+2x^2)} - x + \frac{y^2}{2} = c$$

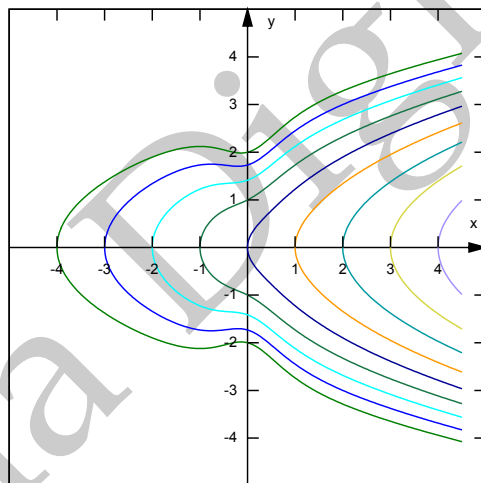


Figura 1.13. Soluções da equação diferencial do Exemplo 1.13

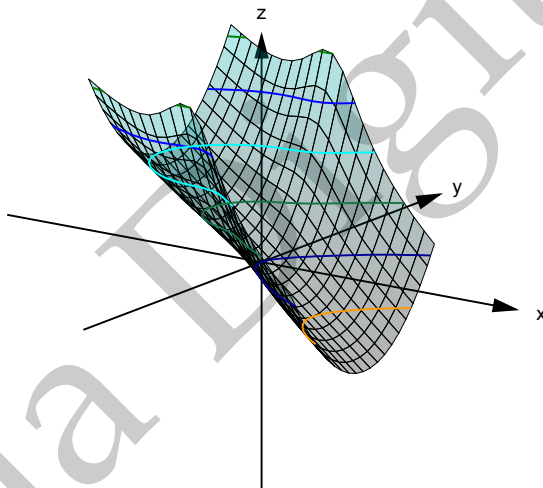


Figura 1.14. Soluções da equação diferencial do Exemplo 1.13 como curvas de nível de uma função de duas variáveis $z = \psi(x, y) = \frac{y^2}{2(1+2x^2)} - x + \frac{y^2}{2}$

1.4.1 Fatores Integrantes

Quando multiplicamos uma equação da forma

$$M(x, y) + N(x, y) \frac{dy}{dx} = 0, \quad (1.24)$$

que não é exata por uma função $\mu(x, y)$ de forma que a nova equação seja exata, chamamos a função $\mu(x, y)$ de **fator integrante para equação exata**.

Exemplo 1.14. Considere a equação

$$2y(1+x^2)y' - \frac{2xy^2}{1+2x^2} = 1 + 2x^2. \quad (1.25)$$

Para esta equação

$$M(x, y) = -\frac{2xy^2}{1+2x^2} - 1 - 2x^2 \quad \text{e} \quad N(x, y) = 2y(1+x^2)$$

Assim,

$$\frac{\partial M}{\partial y} = \frac{-4xy}{1+2x^2} \quad \text{e} \quad \frac{\partial N}{\partial x} = 4xy$$

e portanto a equação não é exata. Agora, multiplicando a equação (1.25) por

$$\mu(x) = \frac{1}{1+2x^2}$$

obtemos

$$\frac{2y(1+x^2)}{1+2x^2} y' - \frac{2xy^2}{(1+2x^2)^2} = 1.$$

A nova equação é a do [Exemplo 1.13](#) que, como já mostramos, é exata.

Quando a equação tem um fator integrante que depende apenas de uma das variáveis x ou y , podemos determiná-lo da forma como é mostrado no exemplo a seguir (para o caso em que $\mu(x)$) e nos Exercícios 4.3 e 4.4 na página 51 (para o caso em que $\mu(y)$).

Exemplo 1.15. Considere a equação do Exemplo 1.14

$$2y(1+x^2)y' - \frac{2xy^2}{1+2x^2} = 1 + 2x^2.$$

Vamos supor, apenas, que exista uma função $\mu(x)$ tal que ao multiplicarmos a equação por $\mu(x)$ a nova equação seja exata. Então,

$$\frac{\partial}{\partial y}(\mu M) = \frac{\partial}{\partial x}(\mu N)$$

ou seja,

$$\mu \frac{\partial M}{\partial y} = \frac{d\mu}{dx} N + \mu \frac{\partial N}{\partial x}$$

Assim, $\mu(x)$ deve satisfazer a equação diferencial

$$\frac{d\mu}{dx} = \frac{\frac{\partial M}{\partial y} - \frac{\partial N}{\partial x}}{N} \mu$$

Assim, reciprocamente, se

$$\frac{\frac{\partial M(x,y)}{\partial y} - \frac{\partial N(x,y)}{\partial x}}{N(x,y)}$$

é uma função apenas de x , então uma solução da equação diferencial

$$\frac{d\mu}{dx} = \frac{\frac{\partial M}{\partial y} - \frac{\partial N}{\partial x}}{N} \mu \quad (1.26)$$

é um fator integrante para a equação diferencial.

Para a equação

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

temos que

$$\frac{\frac{\partial M(x,y)}{\partial y} - \frac{\partial N(x,y)}{\partial x}}{N(x,y)} = \frac{\frac{-4xy}{1+2x^2} - 4xy}{2y(1+x^2)} = \frac{-4x}{1+2x^2}$$

Assim, a equação (1.26) torna-se

$$\frac{d\mu}{dx} = -\frac{4x}{1+2x^2} \mu \quad (1.27)$$

que é uma equação separável que deve satisfazer o fator integrante $\mu(x)$ para a equação (1.25). Multiplicando a equação (1.27) por $1/\mu$ obtemos

$$\frac{1}{\mu} \mu' = -\frac{4x}{1+2x^2}$$

integrando-se em relação a x obtemos

$$\int \frac{1}{\mu} \mu' dx = - \int \frac{4x}{1+2x^2} dx + c$$

Fazendo-se a substituição $\mu' dx = d\mu$ obtemos

$$\int \frac{1}{\mu} d\mu = - \int \frac{4x}{1+2x^2} dx + c,$$

ou seja,

$$\ln |\mu(x)| = \int -\frac{4x}{1+2x^2} dx = -\ln |1+2x^2| + c_1.$$

Usando-se propriedades do logaritmo obtemos

$$\ln |\mu(x)(1+2x^2)| = c_1.$$

Aplicando-se a exponencial obtemos a solução geral para a equação (1.27)

$$\mu(x) = \frac{\pm e^{c_1}}{1+2x^2} = \frac{c}{1+2x^2}.$$

que inclui o fator integrante usado no [Exemplo 1.14](#).

Exercícios (respostas na página 188)

4.1. Resolva as equações:

(a) $2xy - \sin x + (x^2 + e^y) \frac{dy}{dx} = 0$

(b) $y^2 + \cos x + (2xy + e^y) \frac{dy}{dx} = 0.$

(c) $2xy^2 + \cos x + (2x^2y + \frac{1}{y}) \frac{dy}{dx} = 0.$

(d) $2 \left(xy^2 - \frac{1}{x^3} \right) + \left(2x^2y - \frac{1}{y^2} \right) \frac{dy}{dx} = 0.$

(e) $x + y + x \ln x \frac{dy}{dx} = 0.$ Sugestão: multiplique a equação por $1/x$.

(f) $2 \left(xy^3 - \frac{1}{x^3} \right) + \left(3x^2y^2 - \frac{1}{y^2} \right) \frac{dy}{dx} = 0.$

(g) $xy^4 + (2x^2y^3 + 3y^5 - 20y^3) \frac{dy}{dx} = 0.$

4.2. (a) Encontre a solução geral da equação e a solução do problema de valor inicial

$$\begin{cases} \frac{dy}{dx} = \frac{2x - y}{x - 2y} \\ y(1) = 3 \end{cases}$$

(b) Determine o intervalo de validade da solução.

(c) Determine os pontos onde a solução tem um máximo local.

(d) Esboce o gráfico da solução.

- 4.3. (a) Encontre um fator de integração $\mu(y)$ para a equação

$$xy + (2x^2 + 3y^2 - 20) \frac{dy}{dx} = 0$$

de forma a transformá-la numa equação exata.

- (b) Verifique que a função $\mu(y)$ encontrada é realmente um fator integrante.

- 4.4. (a) Encontre um fator de integração $\mu(y)$ para a equação

$$x + (x^2y + 4y) \frac{dy}{dx} = 0$$

de forma a transformá-la numa equação exata.

- (b) Verifique que a função $\mu(y)$ encontrada é realmente um fator integrante.

- 4.5. Considere a seguinte equação diferencial:

$$2y^2 + \frac{2y}{x} + \left(2xy + 2 + \frac{y}{x}\right) y' = 0. \quad (1.28)$$

- (a) Mostre que a equação diferencial (1.28) não é exata e que $\mu(x) = x$ é um fator integrante da mesma.

- (b) Encontre a solução geral de (1.28).

- (c) Encontre a solução de (1.28) que satisfaz $y(1) = 1$.

- 4.6. Considere a seguinte equação diferencial:

$$\frac{1}{x^3} + \frac{e^y}{x} + \left(e^y + \frac{1}{xy}\right) y' = 0. \quad (1.29)$$

- (a) Mostre que a equação diferencial (1.29) não é exata e que $\mu(x) = x$ é um fator integrante da mesma.

- (b) Encontre a solução geral de (1.29).

(c) Encontre a solução de (1.29) que satisfaz $y(1) = 1$.

4.7. Considere a seguinte equação diferencial:

$$-2y + \left(x + \frac{y^3}{x}\right) y' = 0. \quad (1.30)$$

(a) Mostre que a equação diferencial (1.30) não é exata e que $\mu(x, y) = \frac{x}{y^2}$ é um fator integrante da mesma.

(b) Encontre a solução geral de (1.30).

(c) Encontre a solução de (1.30) que satisfaz $y(1) = 1$.

4.8. Considere a seguinte equação diferencial:

$$e^{x^3} + \sin y + \frac{x}{3} \cos y y' = 0. \quad (1.31)$$

(a) Mostre que a equação diferencial (1.31) não é exata e que $\mu(x) = x^2$ é um fator integrante da mesma.

(b) Encontre a solução geral de (1.31).

(c) Encontre a solução de (1.31) que passa pelo ponto $(0, 0)$.

4.9. Considere a seguinte equação diferencial:

$$2 + \frac{e^y}{x} + (e^y + \frac{y}{x}) y' = 0. \quad (1.32)$$

(a) Mostre que a equação diferencial (1.32) não é exata e que $\mu(x) = x$ é um fator integrante da mesma.

(b) Encontre a solução geral de (1.32).

(c) Encontre a solução de (1.32) que satisfaz $y(1) = 1$.

4.10. Mostre que toda equação diferencial separável

$$g(y) \frac{dy}{dx} = f(x)$$

é também exata.

4.11. Considere a seguinte equação diferencial

$$\frac{dy}{dx} = \frac{2 - 2xy}{(y^2/3) + x^2}.$$

- (a) Encontre a solução geral para a EDO.
- (b) Determine a solução que passa pelo ponto $(1 + \frac{\sqrt{8}}{3}, 1)$ explicitando o seu intervalo de validade.
- (c) Faça um esboço da solução do item anterior.

4.12. Mostre que uma equação linear

$$a(x) \frac{dy}{dx} + b(x)y = c(x)$$

é exata se $a'(x) = b(x)$.

1.5 Substituições em Equações de 1ª Ordem

Vamos estudar algumas equações de 1ª ordem que podem ser transformadas em equações já estudadas em seções anteriores fazendo-se uma mudança de variáveis adequada.

1.5.1 Equações Homogêneas de 1ª Ordem

As **equações homogêneas de 1ª ordem** são equações que podem ser escritas como

$$\frac{dy}{dx} = F(y/x) \quad (1.33)$$

Ou seja, o lado direito da equação (1.33) apesar de depender de x e de y , depende apenas do quociente y/x . Seja

$$v = y/x.$$

Então,

$$y = vx$$

e derivando o produto vx em relação a x obtemos

$$\frac{dy}{dx} = x \frac{dv}{dx} + v.$$

Substituindo-se este valor de $\frac{dy}{dx}$ e $y/x = v$ na equação (1.33) obtemos a equação

$$x \frac{dv}{dx} + v = F(v)$$

ou

$$x \frac{dv}{dx} = F(v) - v.$$

Multiplicando-se por $\frac{1}{x(F(v) - v)}$ esta equação se torna

$$\frac{1}{F(v) - v} \frac{dv}{dx} = \frac{1}{x'} \quad (1.34)$$

que é uma equação separável. Podemos encontrar a solução geral desta equação usando a técnica apresentada na [Seção 1.3, página 28](#). Depois de encontrada a solução geral da equação (1.34) devemos substituir

$$v = y/x$$

para encontrar a solução geral de (1.33).

Exemplo 1.16. Considere a equação

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

Dividindo numerador e denominador por x obtemos

$$\frac{dy}{dx} = \frac{\frac{y}{x} - 1}{\frac{y}{x} + 1}.$$

Seja $v = \frac{y}{x}$. Então, $y = vx$ e derivando o produto vx em relação a x obtemos pela regra da cadeia

$$\frac{dy}{dx} = x \frac{dv}{dx} + v.$$

Substituindo-se este valor de $\frac{dy}{dx}$ e $\frac{y}{x} = v$ na equação obtemos

$$x \frac{dv}{dx} + v = \frac{v - 1}{v + 1}$$

ou

$$x \frac{dv}{dx} = \frac{v-1}{v+1} - v = \frac{v^2+1}{-1-v}.$$

Multiplicando-se por $\frac{v+1}{x(v^2+1)}$ esta equação se torna

$$\frac{v+1}{v^2+1} \frac{dv}{dx} = -\frac{1}{x}.$$

Como

$$\int \frac{v+1}{v^2+1} dv = \int \frac{v}{v^2+1} dv + \int \frac{1}{v^2+1} dv = \frac{1}{2} \ln(v^2+1) + \arctan v,$$

então a equação diferencial tem solução

$$\frac{1}{2} \ln(v^2+1) + \arctan v = -\ln|x| + c,$$

ou

$$\ln \left| (v^2+1)^{1/2} x \right| + \arctan v = c.$$

Substituindo-se $v = \frac{y}{x}$ obtemos a solução

$$\ln \left| ((y/x)^2+1)^{1/2} x \right| + \arctan(y/x) = c,$$

que pode ainda ser escrita como

$$\ln(y^2+x^2)^{1/2} + \arctan(y/x) = c.$$

1.5.2 Equações de Bernoulli

As **equações de Bernoulli** são equações da forma

$$\frac{dy}{dx} + p(x)y = q(x)y^n \quad (1.35)$$

em que n é um número real qualquer. Para $n = 0$ e $n = 1$ esta equação é linear. Para $n \neq 0$ e $n \neq 1$, fazemos a mudança de variáveis $v = y^{1-n}$.

Multiplicando-se a equação de Bernoulli (1.35) por y^{-n} obtemos

$$y^{-n} \frac{dy}{dx} + p(x)y^{1-n} = q(x) \quad (1.36)$$

Derivando $v = y^{1-n}$ em relação a x obtemos pela regra da cadeia

$$\frac{dv}{dx} = (1-n)y^{-n} \frac{dy}{dx},$$

de onde obtemos que

$$y^{-n} \frac{dy}{dx} = \frac{1}{1-n} \frac{dv}{dx}.$$

Fazendo as substituições $y^{-n} \frac{dy}{dx} = \frac{1}{1-n} \frac{dv}{dx}$ e $y^{1-n} = v$ em (1.36) obtemos

$$\frac{1}{1-n} \frac{dv}{dx} + p(x)v = q(x)$$

que é uma equação linear. Depois de encontrada a solução geral desta equação, devemos substituir

$$v = y^{1-n}$$

para encontrar a solução geral de (1.35).

Exemplo 1.17. Vamos encontrar a solução geral da equação

$$y' + \frac{1}{x}y = xy^2$$

fazendo a mudança de variáveis $v = y^{-1}$.

Se $v = y^{-1}$, então

$$\frac{dv}{dx} = -y^{-2} \frac{dy}{dx}.$$

Multiplicando-se a equação diferencial por y^{-2} obtemos

$$y^{-2} \frac{dy}{dx} + \frac{1}{x} y^{-1} = x.$$

Fazendo as substituições $y^{-2} \frac{dy}{dx} = -\frac{dv}{dx}$ e $y^{-1} = v$ obtemos

$$-\frac{dv}{dx} + \frac{1}{x}v = x.$$

Multiplicando esta equação por -1 obtemos

$$\frac{dv}{dx} - \frac{1}{x}v = -x$$

que é uma equação linear e tem solução

$$v(x) = -x^2 + cx.$$

Assim, a solução da equação dada é

$$y(x) = \frac{1}{-x^2 + cx}.$$

1.5.3 Equações de Ricatti

As **equações de Ricatti** são equações da forma

$$\frac{dy}{dx} = p(x) + q(x)y + r(x)y^2. \quad (1.37)$$

Sendo conhecida uma solução particular da equação $y_1(x)$, a equação de Ricatti pode ser resolvida fazendo a substituição

$$y(x) = y_1(x) + v(x). \quad (1.38)$$

Então,

$$\frac{dy}{dx} = \frac{dy_1}{dx} + \frac{dv}{dx}. \quad (1.39)$$

Substituindo-se (1.38) e (1.39) em (1.37) obtemos

$$\frac{dy_1}{dx} + \frac{dv}{dx} = p(x) + q(x)(y_1 + v) + r(x)(y_1 + v)^2.$$

Usando o fato de que $y_1(x)$ é solução da equação obtemos

$$\frac{dv}{dx} - (q(x) + 2y_1(x)r(x))v = r(x)v^2,$$

que é uma equação de Bernoulli com $n = 2$.

Exemplo 1.18. Considere a equação

$$\frac{dy}{dx} = e^{2x} + (1 + 2e^x)y + y^2.$$

Deixamos como exercício para o leitor verificar que $y_1(x) = -e^x$ é uma solução desta equação. Fazendo a substituição

$$y(x) = -e^x + v(x),$$

obtemos a equação

$$\frac{dv}{dx} - v = v^2.$$

que pode ser resolvida como uma equação separável

$$\frac{1}{v^2 + v} \frac{dv}{dx} = 1. \quad (1.40)$$

Decompondo $\frac{1}{v^2+v}$ em frações parciais obtemos

$$\frac{1}{v^2 + v} = \frac{1}{v(v+1)} = \frac{A}{v} + \frac{B}{v+1}$$

Multiplicando-se por $v(v+1)$ obtemos

$$1 = A(v+1) + Bv.$$

Substituindo-se $v = 0, -1$ obtemos $A = 1$ e $B = -1$. Assim, a equação (1.40) pode ser escrita como

$$\frac{d}{dx} (\ln |v| - \ln |v+1|) = 1.$$

Integrando-se obtemos

$$\ln \left| \frac{v}{v+1} \right| = x + c_1$$

Aplicando-se a exponencial obtemos

$$\frac{v}{v+1} = \pm e^{c_1} e^x = c e^x.$$

Substituindo-se $v = y + e^x$ obtemos que a solução da equação é dada implicitamente por

$$\frac{y + e^x}{y + 1 + e^x} = ce^x.$$

1.5.4 Equações da forma $y' = F(ax + by)$

As equações da forma $y' = F(ax + by)$, com a e b não nulos, podem ser resolvidas fazendo-se a mudança de variáveis $v = ax + by$. Logo,

$$\frac{dv}{dx} = a + b \frac{dy}{dx} \implies \frac{dy}{dx} = \frac{1}{b} \frac{dv}{dx} - \frac{a}{b}.$$

Substituindo-se $ax + by = v$ e $\frac{dy}{dx} = \frac{1}{b} \frac{dv}{dx} - \frac{a}{b}$ na equação diferencial obtemos

$$\frac{1}{b} \frac{dv}{dx} - \frac{a}{b} = F(v).$$

Somando-se $\frac{a}{b}$ e multiplicando-se por b :

$$\frac{dv}{dx} = bF(v) + a.$$

Dividindo-se por $bF(v) + a$ obtemos a equação

$$\frac{1}{bF(v) + a} \frac{dv}{dx} = 1,$$

que é uma equação separável.

Exemplo 1.19. Considere a equação

$$\frac{dy}{dx} = \frac{y - x}{y - x - 1}.$$

Vamos resolvê-la fazendo a substituição $v = y - x$. Logo,

$$\frac{dv}{dx} = \frac{dy}{dx} - 1 \implies \frac{dy}{dx} = \frac{dv}{dx} + 1.$$

Substituindo-se $y - x = v$ e $\frac{dy}{dx} = \frac{dv}{dx} + 1$ na equação diferencial obtemos

$$\frac{dv}{dx} + 1 = \frac{v}{v-1},$$

$$\frac{dv}{dx} = \frac{1}{v-1},$$

$$(v-1) \frac{dv}{dx} = 1,$$

que é uma equação separável cuja solução é

$$\frac{v^2}{2} - v = x + c.$$

Substituindo-se de volta $v = y - x$ obtemos que a solução da equação é dada implicitamente por

$$\frac{(y-x)^2}{2} - y = c.$$

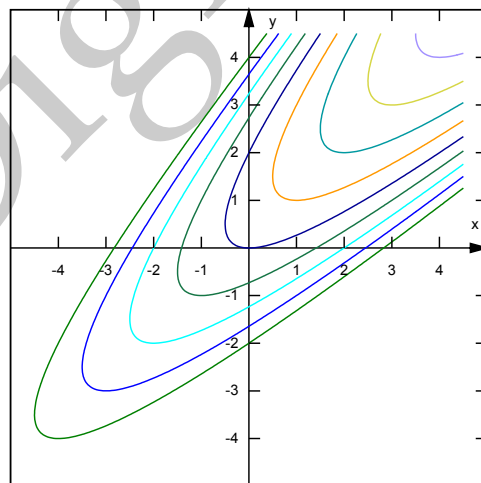


Figura 1.15. Soluções da equação do Exemplo 1.19

Exercícios (respostas na página 208)

5.1. Resolva as equações seguintes fazendo a mudança de variáveis $v = y/x$:

(a) $\frac{dy}{dx} = \frac{3y + x}{3x + y}.$

(b) $\frac{dy}{dx} = \frac{2x^2 + 5y^2}{2xy}.$

(c) $(x + \sqrt{xy}) \frac{dy}{dx} + x - y = x^{-1/2} y^{3/2}.$

5.2. Resolva as equações fazendo as mudanças de variáveis sugeridas:

(a) $y' + \frac{2}{x}y = \frac{y^3}{x^3}, v = y^{-2}.$

(b) $y' + \frac{4}{x}y = -x^5 e^x y^2, v = y^{-1}.$

(c) $y' = -\frac{4}{x^2} - \frac{1}{x}y + y^2, y = 2x^{-1} + u.$

(d) $y' = (y - x)^2, v = y - x.$

(e) $xy' = e^{-xy} - y, v = xy.$

(f) $\sqrt{y}y' + \sqrt{y^3} = 1, v = y^{3/2}.$

(g) $y' = (9x + 16y)^2, v = 9x + 16y.$

1.6 Aplicações

1.6.1 Dinâmica Populacional

Crescimento Exponencial

O modelo mais simples de **crescimento populacional** é aquele em que se supõe que a taxa de crescimento de uma população $\frac{dy}{dt}$ é proporcional à população presente naquele instante $y(t)$. Podemos descrever o problema de encontrar $y(t)$ como o problema de valor inicial

$$\begin{cases} \frac{dy}{dt} = ky \\ y(0) = y_0 \end{cases}$$

A equação é linear e pode ser reescrita como

$$\frac{dy}{dt} - ky = 0. \quad (1.41)$$

Para resolvê-la vamos determinar o fator integrante

$$\mu(t) = e^{\int -k dt} = e^{-kt}.$$

Multiplicando-se a equação (1.41) por $\mu(t) = e^{-kt}$ obtemos

$$\frac{d}{dt}(e^{-kt}y) = 0.$$

Integrando-se ambos os membros obtemos

$$e^{-kt}y(t) = c \quad \text{ou} \quad y(t) = ce^{kt}.$$

Substituindo-se $t = 0$ e $y = y_0$ obtemos

$$y_0 = ce^{k \cdot 0} = c.$$

Ou seja, a solução do problema de valor inicial é

$$y(t) = y_0 e^{kt}.$$

Exemplo 1.20. Consideremos uma situação formada por uma população de organismos zooplancônicos. São colocadas em um béquer 3 fêmeas partenogenéticas grávidas (não há necessidade de fecundação pelo macho) de um microcrustáceo chamado cladóceros em condições ideais de alimentação, temperatura, aeração e iluminação e ausência de predadores. Sabendo-se que em 10 dias havia 240 indivíduos determine a população em função do tempo supondo-se que a taxa de crescimento da população é proporcional à população atual (crescimento exponencial).

A população, $y(t)$, é a solução do problema de valor inicial

$$\begin{cases} \frac{dy}{dt} = ky \\ y(0) = 3 \end{cases}$$

que como vimos acima tem solução

$$y(t) = y_0 e^{kt} = 3e^{kt}.$$

Como em 10 dias a população é de 240 indivíduos, então substituindo-se $t = 10$ e $y = 240$ obtemos

$$240 = 3e^{10k} \quad \Rightarrow \quad k = \frac{\ln 80}{10}.$$

Assim, a função que descreve como a população de bactérias varia com o tempo é

$$y(t) = 3e^{\frac{\ln 80}{10}t} = 3 \cdot 80^{t/10}.$$

Figura 1.16. Solução do problema do Exemplo 1.20 e dados obtidos experimentalmente

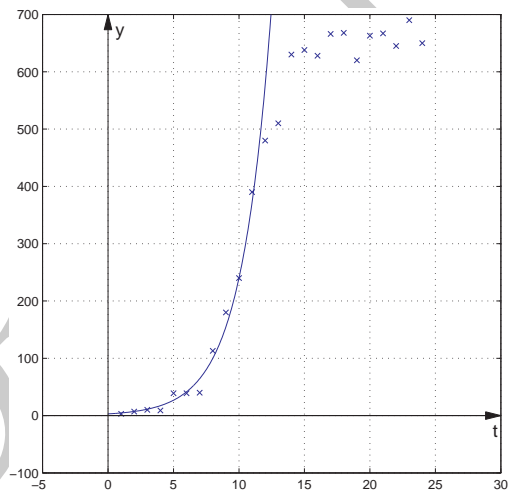


Figura 1.17. Solução do problema de valor inicial do Exemplo 1.21 e dados obtidos experimentalmente

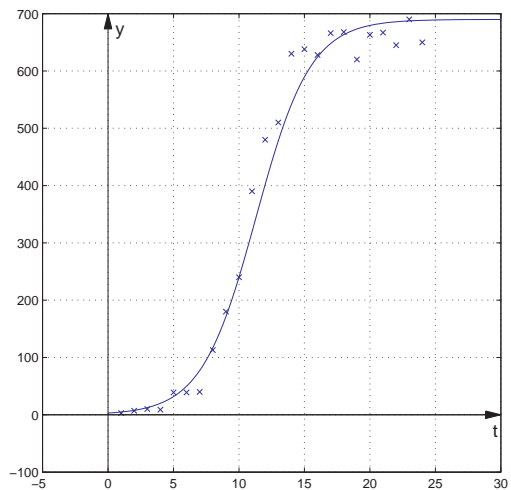


Tabela 1.1. Número de indivíduos por litro de uma população de cladóceros (*Daphnia laevis*) em experimento de laboratório (dados obtidos de [4])

Dias	População	Dias	População
1	3	13	510
2	7	14	630
3	10	15	638
4	9	16	628
5	39	17	666
6	39	18	668
7	40	19	620
8	113	20	663
9	180	21	667
10	240	22	645
11	390	23	690
12	480	24	650

Crescimento Logístico

Para levar em conta que a população $y(t)$ tem um valor máximo sustentável y_M , podemos supor que a taxa de crescimento, além de ser proporcional à população atual, é proporcional também à diferença entre y_M e a população presente. Neste caso, a população como função do tempo, $y(t)$, é a solução do problema de valor inicial

$$\begin{cases} \frac{dy}{dt} = ky(y_M - y) \\ y(t_0) = y_0 \end{cases}$$

Multiplicando-se a equação diferencial por $\frac{1}{y(y_M - y)}$ obtemos a equação separável

$$\frac{1}{y(y_M - y)} y' = k$$

Integrando-se em relação a t obtemos

$$\int \frac{1}{y(y_M - y)} y' dt = \int k dt + c_1.$$

Fazendo-se a substituição $y' dt = dy$ obtemos

$$\int \frac{1}{y(y_M - y)} dy = \int k dt + c_1.$$

Para calcular a integral do lado esquerdo, vamos decompor $\frac{1}{y(y_M - y)}$ em frações parciais:

$$\frac{1}{y(y_M - y)} = \frac{A}{y} + \frac{B}{y_M - y}$$

Multiplicando-se a equação acima por $y(y_M - y)$ obtemos

$$1 = A(y_M - y) + By$$

Substituindo-se $y = 0$ e $y = y_M$ obtemos $A = 1/y_M$ e $B = 1/y_M$. Assim,

$$\int \frac{1}{y(y_M - y)} dy = \frac{1}{y_M} \left(\int \frac{1}{y} dy + \int \frac{1}{y_M - y} dy \right) = \frac{1}{y_M} (\ln |y| - \ln |y_M - y|)$$

Logo, a solução da equação diferencial é dada implicitamente por

$$\ln |y| - \ln |y_M - y| = ky_M t + c_1.$$

Usando propriedades do logaritmo podemos reescrever como

$$\ln \left| \frac{y}{y_M - y} \right| = c_1 + ky_M t.$$

Aplicando a exponencial a ambos os membros e eliminando-se o valor absoluto obtemos

$$\frac{y}{y_M - y} = \pm e^{c_1} e^{y_M k t} = c e^{y_M k t}$$

Observe que como c_1 é uma constante, então $\pm e^{c_1}$ também é uma constante que chamamos de c . Substituindo-se $t = t_0$ e $y = y_0$ na equação acima obtemos

$$c = \frac{y_0}{y_M - y_0} e^{-y_M k t_0}.$$

Vamos explicitar $y(t)$:

$$y = (y_M - y) c e^{y_M k t} \Rightarrow y + c e^{y_M k t} y = y_M c e^{y_M k t}$$

Portanto, a solução do problema de valor inicial é

$$y(t) = \frac{c y_M e^{y_M k t}}{1 + c e^{y_M k t}} = \frac{\frac{y_0 y_M}{y_M - y_0} e^{y_M k (t - t_0)}}{1 + \frac{y_0}{y_M - y_0} e^{y_M k (t - t_0)}} = \frac{y_0 y_M e^{y_M k (t - t_0)}}{y_M - y_0 + y_0 e^{y_M k (t - t_0)}}$$

Dividindo-se numerador e denominador por $e^{y_M k t}$ obtemos

$$y(t) = \frac{y_0 y_M}{y_0 + (y_M - y_0) e^{-y_M k (t - t_0)}}$$

Observe que

$$\lim_{t \rightarrow \infty} y(t) = y_M.$$

Exemplo 1.21. Consideremos a mesma situação do [Exemplo 1.20](#), ou seja, são colocadas em um béquer 3 fêmeas partenogenéticas grávidas (não há necessidade de fecundação pelo macho) de um microcrustáceo chamado cladóceros em condições

ideais de alimentação, temperatura, aeração e iluminação, e ausência de predadores. Sabendo-se que essa população atinge o máximo de 690 indivíduos e que em 10 dias havia 240 indivíduos, determine a população em função do tempo supondo-se que a taxa de crescimento da população é proporcional tanto à população atual quanto à diferença entre a população máxima e a população atual (crescimento logístico).

A população como função do tempo, $y(t)$, é a solução do problema

$$\begin{cases} \frac{dy}{dt} = ky(690 - y) \\ y(0) = 3, y(10) = 240. \end{cases}$$

Multiplicando-se a equação diferencial por $\frac{1}{y(690-y)}$ obtemos a equação separável

$$\frac{1}{y(690 - y)} y' = k \quad (1.42)$$

Integrando-se em relação a t obtemos

$$\int \frac{1}{y(690 - y)} y' dt = \int k dt + c.$$

Fazendo-se a substituição $y' dt = dy$ obtemos

$$\int \frac{1}{y(690 - y)} dy = \int k dt + c.$$

Para calcular a integral do lado esquerdo vamos decompor $\frac{1}{y(690-y)}$ em frações parciais:

$$\frac{1}{y(690 - y)} = \frac{A}{y} + \frac{B}{690 - y}$$

Multiplicando-se a equação acima por $y(690 - y)$, obtemos

$$1 = A(690 - y) + By$$

Substituindo-se $y = 0$ e $y = 690$ obtemos $A = 1/690$ e $B = 1/690$. Assim,

$$\int \frac{1}{y(690-y)} dy = \frac{1}{690} \left(\int \frac{1}{y} dy + \int \frac{1}{690-y} dy \right) = \frac{1}{690} (\ln |y| - \ln |690-y|)$$

Logo, a equação (1.42) tem solução dada implicitamente por

$$\ln |y| - \ln |690-y| = 690kt + c_1.$$

Usando propriedades do logaritmo podemos reescrever como

$$\ln \left| \frac{y}{690-y} \right| = c_1 + 690kt.$$

Aplicando-se a exponencial a ambos os membros obtemos

$$\frac{y}{690-y} = \pm e^{c_1} e^{690kt} = ce^{690kt}. \quad (1.43)$$

Observe que como c_1 é uma constante, então $\pm e^{c_1}$ também é uma constante que chamamos de c . Substituindo-se $t = 0$ e $y = 3$ na equação (1.43) obtemos

$$c = \frac{3}{690-3} = \frac{3}{687} = \frac{1}{229}.$$

Para determinar o valor de k , vamos usar o fato de que em 10 dias havia 240 indivíduos. Substituindo-se $t = 10$ e $y = 240$ na solução geral implícita (1.43) e usando-se o valor de c encontrado acima obtemos

$$\frac{240}{450} = \frac{1}{229} e^{6900k} \Rightarrow e^{6900k} = \frac{1832}{15} \Rightarrow 690k = \frac{\ln \frac{1832}{15}}{10}.$$

Vamos explicitar $y(t)$: Da solução geral implícita (1.43) obtemos

$$y = (690-y)ce^{690kt} \Rightarrow y + ce^{690kt}y = 690ce^{690kt} \Rightarrow y(1 + e^{690kt}) = 690ce^{690kt}.$$

Portanto, a solução do problema de valor inicial que dá a população de cladóceros em função do tempo é

$$y(t) = \frac{690ce^{690kt}}{1 + ce^{690kt}} = \frac{690e^{690kt}}{229 + e^{690kt}} = \frac{690}{229e^{-690kt} + 1} = \frac{690}{229e^{\frac{-\ln \frac{1832}{15}}{10}t} + 1} = \frac{690}{229 \left(\frac{1832}{15} \right)^{-\frac{t}{10}} + 1}$$

1.6.2 Decaimento Radioativo

A proporção de carbono 14 (radioativo) em relação ao carbono 12 presente nos seres vivos é constante. Quando um organismo morre a absorção de carbono 14 cessa e a partir de então o carbono 14 vai se transformando em carbono 12 a uma taxa que é proporcional à quantidade presente. Podemos descrever o problema de encontrar a quantidade de carbono 14 em função do tempo, $y(t)$, como o problema de valor inicial

$$\begin{cases} \frac{dy}{dt} = ky. \\ y(0) = y_0 \end{cases}$$

A equação é a mesma do crescimento exponencial, mas vamos resolver, agora, como uma equação separável, ou seja, a equação é equivalente a

$$\frac{1}{y}y' = k.$$

Integrando-se em relação a t , lembrando-se que $y'dt = dy$, obtemos

$$\ln |y| = kt + c_1.$$

Aplicando-se a exponencial, obtemos

$$y(t) = \pm e^{c_1} e^{kt} = ce^{kt}.$$

Substituindo-se $t = 0$ e $y = y_0$, obtemos $c = y_0$. Logo, a solução do PVI é

$$y(t) = y_0 e^{kt}.$$

Exemplo 1.22. Em um pedaço de madeira é encontrado $1/500$ da quantidade original de carbono 14. Sabe-se que a meia-vida do carbono 14 é de 5600 anos, ou seja, que em 5600 anos metade do carbono 14 presente transformou-se em carbono 12. Vamos determinar a idade deste pedaço de madeira.

O problema de valor inicial que descreve esta situação é

$$\begin{cases} \frac{dy}{dt} = ky. \\ y(0) = y_0 \end{cases}$$

que tem solução

$$y(t) = y_0 e^{kt}$$

Substituindo-se $t = 5600$ e $y = y_0/2$ (meia-vida) obtemos

$$y_0/2 = y_0 e^{k \cdot 5600} \Rightarrow k = -\frac{\ln 2}{5600}$$

Agora substituindo-se $y = y_0/500$ obtemos

$$\frac{y_0}{500} = y_0 e^{kt} \Rightarrow t = -\frac{\ln 500}{k} = \frac{5600 \ln 500}{\ln 2} \approx 50200 \text{ anos}$$

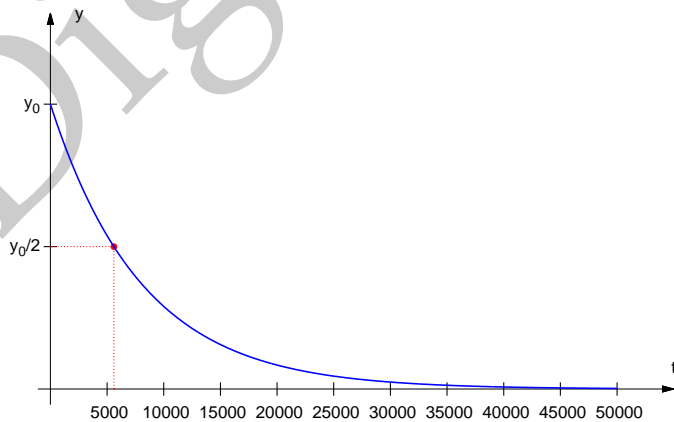


Figura 1.18. Solução do problema de valor inicial do Exemplo 1.22

Cópia Digital

1.6.3 Misturas

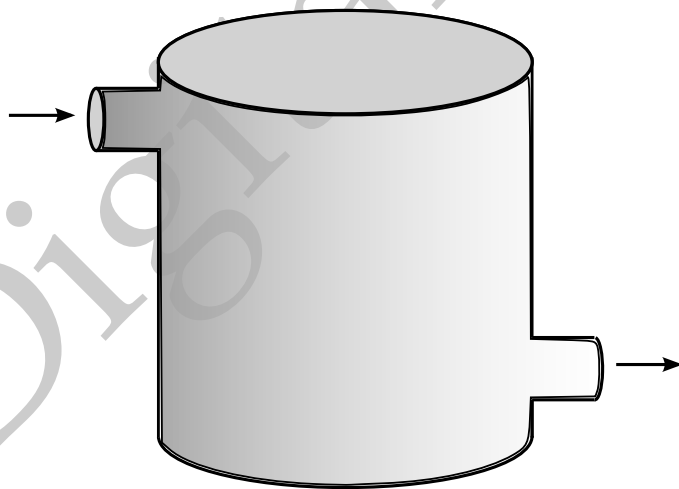


Figura 1.19. Tanque

Vamos supor que um tanque contenha uma mistura de água e sal com um volume inicial de V_0 litros e Q_0 gramas de sal e que uma solução salina seja bombeada para dentro do tanque a uma taxa constante de T_e litros por minuto, possuindo uma concentração de C_e gramas de sal por litro. Suponha que a solução bem misturada sai a uma taxa constante de T_s litros por minuto.

A taxa de variação da quantidade de sal no tanque é igual à taxa com que entra sal no tanque menos a taxa com que sai sal do tanque.

A taxa com que entra sal no tanque é igual à taxa com que entra a mistura, T_e , vezes a concentração de entrada, C_e . E a taxa com que sai sal do tanque é igual à taxa com que sai a mistura do tanque, T_s , vezes a concentração de sal que sai do tanque, C_s . Como a solução é bem misturada, esta concentração é igual à concentração de sal no tanque, ou seja,

$$C_s(t) = \frac{Q(t)}{V(t)}.$$

Como o volume no tanque, $V(t)$, é igual ao volume inicial, V_0 , somado ao volume que entra no tanque subtraído ao volume que sai do tanque, então se as taxas de entrada e de saída forem constantes temos que

$$V(t) = V_0 + T_e t - T_s t = V_0 + (T_e - T_s)t.$$

Assim, a quantidade de sal no tanque, $Q(t)$, é a solução do problema de valor inicial

$$\begin{cases} \frac{dQ}{dt} = T_e C_e - T_s \frac{Q}{V_0 + (T_e - T_s)t} \\ Q(0) = Q_0. \end{cases}$$

Exemplo 1.23. Num tanque há 100 litros de salmoura contendo 30 gramas de sal em solução. Água (sem sal) entra no tanque à razão de 6 litros por minuto e a mistura

se escoa à razão de 4 litros por minuto, conservando-se a concentração uniforme por agitação. Vamos determinar qual a concentração de sal no tanque ao fim de 50 minutos.

O problema pode ser modelado pelo seguinte problema de valor inicial:

$$\begin{cases} \frac{dQ}{dt} = -4 \frac{Q}{100+2t} \\ Q(0) = 30. \end{cases}$$

A equação é linear e pode ser escrita como

$$\frac{dQ}{dt} + 4 \frac{Q}{100+2t} = 0$$

Um fator integrante é neste caso

$$\mu(t) = e^{\int \frac{4}{100+2t} dt} = e^{2 \ln(100+2t)} = e^{\ln((100+2t)^2)} = (100+2t)^2.$$

Multiplicando-se a equação por $\mu(t) = e^{\int \frac{4}{100+2t} dt} = (100+2t)^2$ obtemos

$$\frac{d}{dt} \left((100+2t)^2 Q \right) = 0.$$

Integrando-se obtemos

$$(100+2t)^2 Q(t) = c$$

ou seja,

$$Q(t) = \frac{c}{(100+2t)^2}.$$

Substituindo-se $t = 0$ e $Q = 30$:

$$c = 30 \cdot 100^2 = 3 \cdot 10^5$$

Substituindo-se o valor de c encontrado:

$$Q(t) = \frac{3 \cdot 10^5}{(100 + 2t)^2}$$

A concentração é o quociente da quantidade de sal pelo volume que é igual a

$$V(t) = 100 + 2t.$$

Assim,

$$C(t) = \frac{3 \cdot 10^5}{(100 + 2t)^3}$$

e após 50 minutos

$$C(50) = \frac{3 \cdot 10^5}{(200)^3} = \frac{3}{80} = 0,0375 \text{ gramas/litro}$$

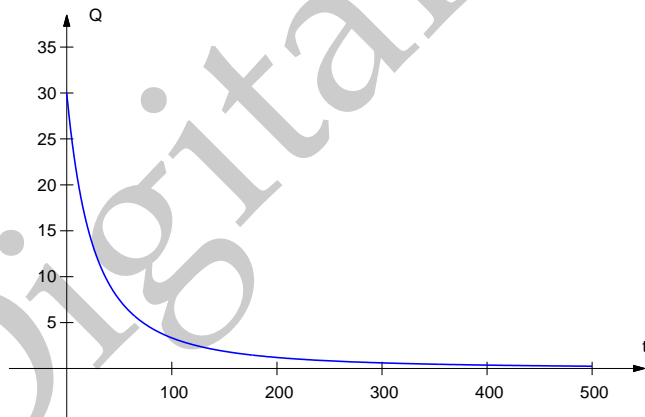


Figura 1.20. Solução do problema de valor inicial do Exemplo 1.23

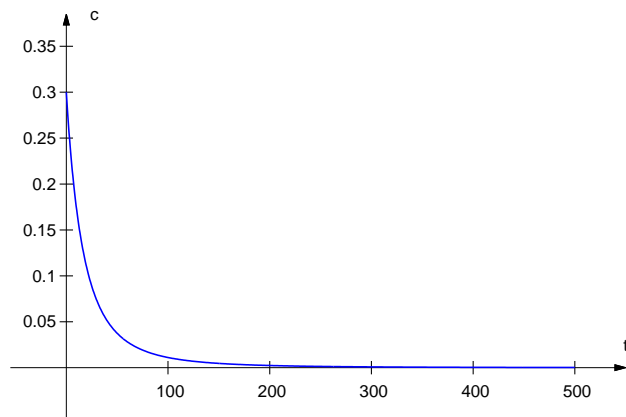


Figura 1.21. Concentração como função do tempo para o problema do Exemplo 1.23

1.6.4 Lei de Resfriamento de Newton

A **lei de resfriamento de Newton** diz que a taxa de variação da temperatura $T(t)$ de um corpo é proporcional à diferença entre a temperatura atual do corpo $T(t)$ e a temperatura constante do meio ambiente T_a , ou seja, a temperatura do corpo, $T(t)$ é a solução do problema de valor inicial

$$\begin{cases} \frac{dT}{dt} = k(T - T_a) \\ T(0) = T_0 \end{cases}$$

Exemplo 1.24. O café está a 90°C logo depois de coado e, um minuto depois, passa para 85°C , em uma cozinha a 25°C . Vamos determinar a temperatura do café em função do tempo e o tempo que levará para o café chegar a 60°C .

$$\begin{cases} \frac{dT}{dt} = k(T - 25) \\ T(0) = 90, T(1) = 85 \end{cases}$$

Dividindo-se a equação por $T - 25$:

$$\frac{1}{T - 25} T' = k$$

Integrando-se em relação a t :

$$\int \frac{1}{T - 25} T' dt = \int k dt + c_1,$$

$$\int \frac{1}{T - 25} dT = \int k dt + c_1,$$

$$\ln |T - 25| = kt + c_1,$$

$$T(t) = 25 \pm e^{c_1} e^{kt} = 25 + ce^{kt}.$$

Substituindo $t = 0$ e $T = 90$:

$$90 = 25 + c \Rightarrow c = 65$$

$$T(t) = 25 + 65e^{kt}.$$

Substituindo-se $t = 1$ e $T = 85$:

$$85 = 25 + 65e^k \Rightarrow k = \ln\left(\frac{60}{65}\right).$$

Assim, a temperatura do café em função do tempo é dada por

$$T(t) = 25 + 65e^{\ln(\frac{60}{65})t} = 25 + 65\left(\frac{60}{65}\right)^t.$$

Substituindo $T = 60$:

$$60 = 25 + 65e^{\ln(\frac{60}{65})t}$$

Logo, o tempo necessário para que o café atinja 60° é de:

$$t = \frac{\ln(35/65)}{\ln(60/65)} \approx 8 \text{ min.}$$

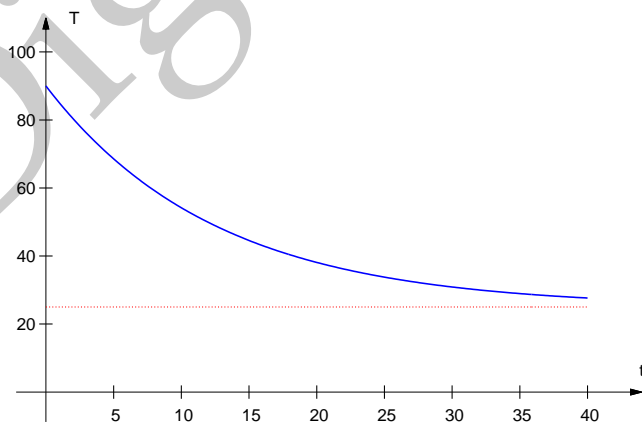


Figura 1.22. Solução do problema de valor inicial do Exemplo 1.24

1.6.5 Lei de Torricelli

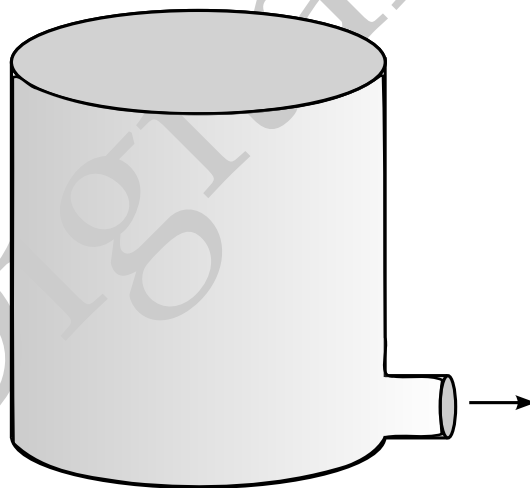


Figura 1.23. Tanque com um orifício

A **lei de Torricelli** diz que a taxa com que um líquido escoar por um orifício situado a uma profundidade h é proporcional a \sqrt{h} . Ou seja,

$$\frac{dV}{dt} = k\sqrt{h}.$$

Existe uma relação entre V e h , $V = V(h)$, que depende da forma do tanque. Como

$$\frac{dV}{dt} = \frac{dV}{dh} \frac{dh}{dt},$$

então a altura, $h(t)$, é a solução do problema de valor inicial

$$\begin{cases} \frac{dh}{dt} = k \frac{\sqrt{h}}{\frac{dV}{dh}} \\ h(0) = h_0 \end{cases}$$

Exemplo 1.25. Um tambor cilíndrico, de 2 metros de altura e base circular de raio 1 metro, está cheio de água. Se fizermos um furo no fundo e em 30 minutos a água cair pela metade vamos determinar a altura h da água dentro do tambor em função do tempo e em quanto tempo o tanque esvazia.

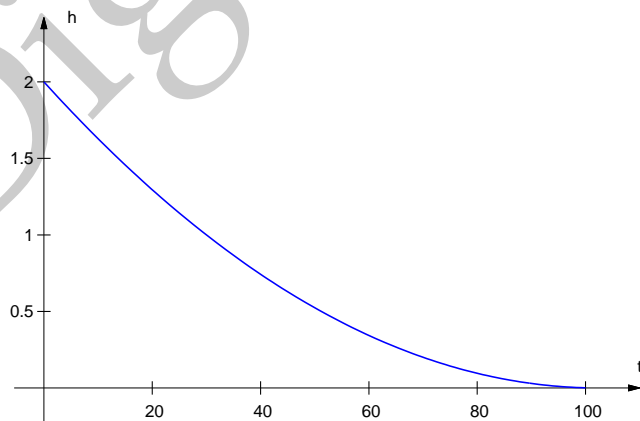


Figura 1.24. Solução do problema do Exemplo 1.25

Como para o cilindro

$$V(h) = \pi R^2 h = \pi h$$

então

$$\frac{dV}{dh} = \pi.$$

Como uma constante sobre π é também uma constante, então o problema pode ser modelado por

$$\begin{cases} \frac{dh}{dt} = k\sqrt{h} \\ h(0) = 2, h(30) = 1. \end{cases}$$

Multiplicando-se a equação por $\frac{1}{\sqrt{h}}$ obtemos

$$\frac{1}{\sqrt{h}} h' = k.$$

Integrando-se ambos os membros em relação a t obtemos

$$\int \frac{1}{\sqrt{h}} h' dt = \int k dt + c.$$

Fazendo-se a substituição $h' dt = dh$ obtemos

$$\int \frac{1}{\sqrt{h}} dh = \int k dt + c.$$

$$2\sqrt{h} = kt + c \quad (1.44)$$

ou explicitando-se a solução:

$$h(t) = \left(\frac{c + kt}{2}\right)^2.$$

Substituindo-se $t = 0$ e $h = 2$ em (1.44): $2\sqrt{2} = c$.

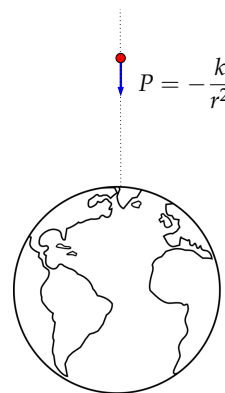
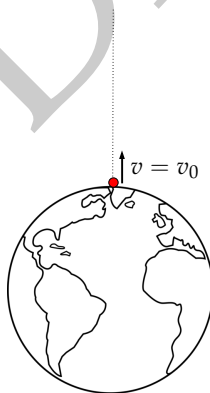
Substituindo-se $t = 30$ e $h = 1$ em (1.44): $c + 30k = 2 \Rightarrow k = \frac{2-c}{30} = \frac{1-\sqrt{2}}{15}$.

Assim,

$$h(t) = \left(\frac{c+kt}{2}\right)^2 = \left(\sqrt{2} + \frac{1-\sqrt{2}}{30}t\right)^2.$$

Substituindo-se $h = 0$: $t = -\frac{c}{k} = \frac{30\sqrt{2}}{\sqrt{2}-1} \approx 102 \text{ min.}$

1.6.6 Velocidade de Escape



Um corpo é lançado da superfície da Terra com velocidade v_0 de forma que a única força que age sobre ele é a força gravitacional, que é proporcional ao inverso do quadrado da distância ao centro da Terra, ou seja,

$$m \frac{dv}{dt} = -\frac{k}{r^2}, \quad k > 0.$$

Como na superfície da Terra, $r = R$, a força gravitacional é igual ao peso do corpo na superfície da Terra, mg , então

$$\frac{k}{R^2} = mg \Rightarrow k = mgR^2.$$

Assim,

$$\begin{cases} m \frac{dv}{dt} = -\frac{mgR^2}{r^2}, \\ v(0) = v_0. \end{cases}$$

Como

$$\frac{dv}{dt} = \frac{dv}{dr} \frac{dr}{dt} = \frac{dv}{dr} v,$$

então

$$v \frac{dv}{dr} = -\frac{gR^2}{r^2}.$$

Integrando-se em relação a r obtemos

$$\int vv' dr = - \int \frac{gR^2}{r^2} dr + c.$$

Substituindo-se $v' dr = dv$ e calculando as integrais obtemos

$$\frac{v^2}{2} = \frac{gR^2}{r} + c.$$

Substituindo-se $v = v_0$ e $r = R$ obtemos

$$\frac{v_0^2}{2} = gR + c \Rightarrow c = \frac{v_0^2}{2} - gR.$$

Assim, a solução do PVI é dada implicitamente por

$$\frac{v^2}{2} = \frac{gR^2}{r} + \frac{v_0^2}{2} - gR.$$

A velocidade é igual a zero apenas para $r = r_{max}$. Ou seja,

$$0 = \frac{gR^2}{r_{max}} + \frac{v_0^2}{2} - gR.$$

Assim, a velocidade de escape é dada por

$$v_{esc} = \lim_{r_{max} \rightarrow +\infty} v_0 = \lim_{r_{max} \rightarrow +\infty} \sqrt{2gR(1 - \frac{R}{r_{max}})} = \sqrt{2gR} \approx 11.290 \text{ m/s}.$$

1.6.7 Resistência em Fluidos

Um corpo que se desloca em um meio fluido sofre uma força de resistência que é proporcional a velocidade do corpo. A velocidade, $v(t)$, é a solução do problema de valor inicial

$$\begin{cases} m \frac{dv}{dt} = F - kv \\ v(0) = 0. \end{cases}$$

Para um corpo que cai a força F é igual ao peso do corpo. Para um barco que se desloca na água ou um carro em movimento a força F é igual à força do motor.



Exemplo 1.26. Um paraquedista com o seu paraquedas pesa 70 quilogramas e salta de uma altura de 1400 metros. O paraquedas abre automaticamente após 5 segundos de queda. Sabe-se que a velocidade limite é de 5 metros por segundo. Vamos determinar a velocidade que o paraquedista atinge no momento que o paraquedas abre, quanto tempo demora para a velocidade chegar a 5,1 metros por segundo e como varia a altura em função do tempo.

Vamos convencionar que o sentido positivo é para cima e que a origem está na superfície da Terra. Até o momento em que o paraquedas abre a velocidade é a solução do problema de valor inicial

$$\begin{cases} m \frac{dv}{dt} = P = -mg \\ v(0) = 0, \end{cases}$$

ou seja,

$$\begin{cases} \frac{dv}{dt} = -10 \\ v(0) = 0. \end{cases}$$

O que leva a solução

$$v(t) = -10t.$$

Quando o paraquedas abre a velocidade é então de

$$v(5) = -50 \text{ m/s.}$$

Até este momento a altura do paraquedista em função do tempo é a solução do problema de valor inicial

$$\begin{cases} \frac{dh}{dt} = v(t) = -10t \\ h(0) = 1400. \end{cases}$$

cuja solução é

$$h(t) = 1400 - 5t^2.$$

Assim, até o momento que o paraquedas abre o paraquedista caiu

$$1400 - h(5) = 125 \text{ m}$$

Daí em diante a velocidade do paraquedista é a solução do problema de valor inicial

$$\begin{cases} m \frac{dv}{dt} = -mg - kv \\ v(5) = -50. \end{cases}$$

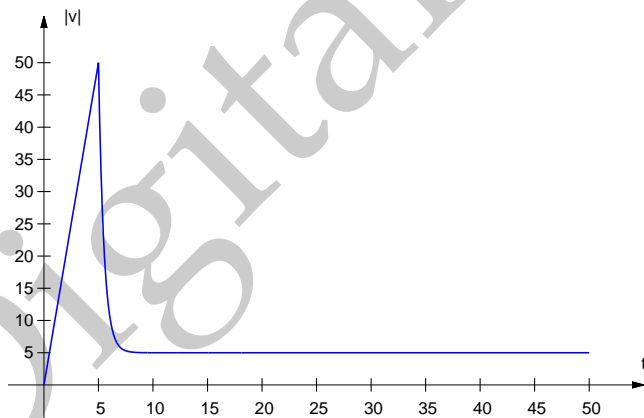


Figura 1.25. Módulo da velocidade do Exemplo 1.26

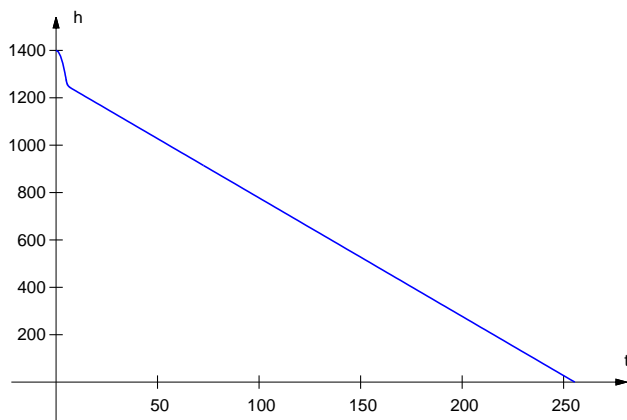


Figura 1.26. Altura do Exemplo 1.26

A força de resistência é igual a $-kv$, o sinal menos com uma constante positiva indica que a força de resistência é no sentido contrário ao da velocidade. Observe que a velocidade é negativa o que faz com que a força de resistência seja positiva, ou seja, para cima como convencionamos no início.

$$\begin{cases} \frac{dv}{dt} = -10 - \frac{k}{70}v = -10 - Kv, & K = k/70 \\ v(5) = -50. \end{cases}$$

A equação

$$\frac{dv}{dt} = -10 - Kv$$

pode ser reescrita como

$$\frac{1}{10 + Kv} v' = -1$$

Integrando-se

$$\ln |10 + Kv| = -Kt + c_1$$

$$10 + Kv = \pm e^{c_1} e^{-Kt}$$

$$v(t) = -\frac{10}{K} + ce^{-Kt}$$

A velocidade limite é de -5 m/s, logo

$$\lim_{t \rightarrow \infty} v(t) = -\frac{10}{K} = -5 \Rightarrow K = 2.$$

Substituindo-se $t = 5$ e $v = -50$ em $v(t) = -\frac{10}{K} + ce^{-Kt}$:

$$-50 = -5 + ce^{-5K} \Rightarrow c = -45e^{5K}$$

ou seja, a solução do problema de valor inicial é

$$v(t) = -5 - 45e^{-2(t-5)}.$$

Substituindo-se $v = -5,1$ (lembre-se que é negativo por que é para baixo!) obtemos

$$-5,1 = -5 - 45e^{-2(t-5)} \Rightarrow t - 5 = \frac{\ln 450}{2} \approx 3 \text{ segundos},$$

ou seja, 3 segundos depois do paraquedas aberto a velocidade já é de 5,1 m/s. Depois que o paraquedas abre a altura em função do tempo é a solução do problema de valor inicial

$$\begin{cases} \frac{dh}{dt} = v(t) = -5 - 45e^{-2(t-5)} \\ h(5) = 1400 - 125 = 1275. \end{cases}$$

a solução geral da equação é

$$h(t) = -5(t-5) + \frac{45}{2}e^{-2(t-5)} + c.$$

Substituindo-se $t = 5$ e $h = 1275$ obtemos $c = 2505/2$. Assim, a solução deste problema de valor inicial é

$$h(t) = \frac{2505}{2} - 5(t-5) + \frac{45}{2}e^{-2(t-5)}, \quad \text{para } t > 5$$

1.6.8 Circuitos Elétricos

Um circuito RC é um circuito que tem um resistor de resistência R , um capacitor de capacitância C e um gerador que gera uma diferença de potencial ou força eletromotriz $V(t)$ ligados em série. A queda de potencial num resistor de resistência R é igual a RI e num capacitor de capacitância C é igual a $\frac{Q}{C}$.

Pela segunda lei de Kirchhoff (lei das malhas) a soma das forças eletromotrizes (neste caso apenas $V(t)$) é igual à soma das quedas de potencial (neste caso RI na

resistência e Q/C no capacitor), ou seja,

$$RI + \frac{Q}{C} = V(t).$$

Como $I(t) = \frac{dQ}{dt}$, então a carga $Q(t)$ no capacitor satisfaz a equação diferencial

$$R \frac{dQ}{dt} + \frac{1}{C} Q = V(t).$$

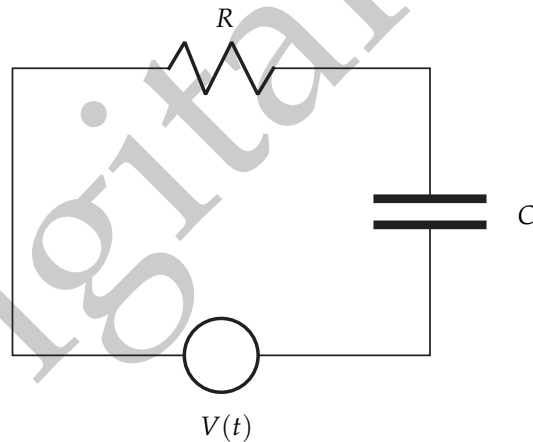


Figura 1.27. Circuito RC

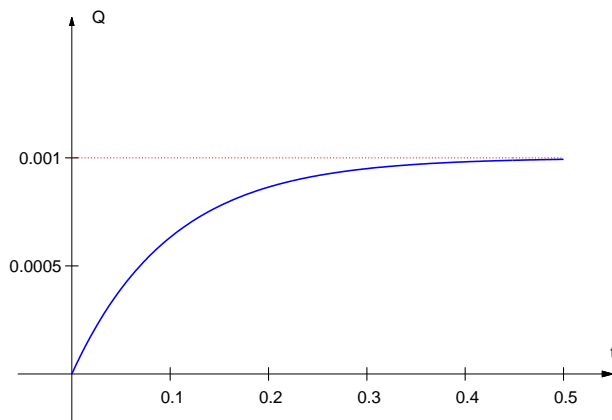


Figura 1.28. Solução do problema do Exemplo 1.27

Exemplo 1.27. Em um circuito RC uma bateria gera uma diferença de potencial de 10 volts enquanto a resistência é de 10^3 ohms e a capacitância é de 10^{-4} farads. Vamos encontrar a carga $Q(t)$ no capacitor em cada instante t , se $Q(0) = 0$ e o limite de $Q(t)$ quando t tende a mais infinito.

$$10^3 \frac{dQ}{dt} + 10^4 Q = 10 \Rightarrow \frac{dQ}{dt} + 10Q = 10^{-2}.$$

A equação é linear. Multiplicando-se a equação pelo fator integrante $\mu(t) = e^{10t}$ obtemos

$$\frac{d}{dt} (e^{10t} Q) = 10^{-2} e^{10t}$$

integrando-se obtemos

$$e^{10t} Q(t) = 10^{-3} e^{10t} + k$$

ou

$$Q(t) = 10^{-3} + k e^{-10t}.$$

Substituindo-se $t = 0$ e $Q = 0$ obtemos $k = -10^{-3}$ e assim a solução do problema de valor inicial é

$$Q(t) = 10^{-3} (1 - e^{-10t}) \text{ coulombs.}$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} Q(t) = 10^{-3} \text{ coulombs.}$$

1.6.9 Juros

Vamos supor que façamos uma aplicação de uma quantia S_0 em um banco e que a taxa de variação do investimento $\frac{dS}{dt}$ é proporcional ao saldo em cada instante $S(t)$. Podemos descrever o problema de encontrar $S(t)$ como o problema de valor inicial

$$\begin{cases} \frac{dS}{dt} = rS. \\ S(0) = S_0 \end{cases}$$

Este problema já resolvemos antes e tem solução

$$S(t) = S_0 e^{rt}. \quad (1.45)$$

Pode parecer que este modelo não seja muito realista, pois normalmente os juros são creditados em períodos inteiros igualmente espaçados. Ou seja, se j é a taxa de juros em uma unidade de tempo, então o saldo após n unidades de tempo $S(n)$ é dado por

$$\begin{aligned} S(1) &= S_0 + S_0 j = S_0(1 + j) \\ S(2) &= S(1)(1 + j) = S_0(1 + j)^2 \\ &\vdots \\ S(n) &= S(n-1)(1 + j) = S_0(1 + j)^n. \end{aligned} \quad (1.46)$$

Substituindo-se t por n na solução do problema de valor inicial obtida (1.45) e comparando com (1.46) obtemos que

$$S_0 e^{rn} = S_0(1 + j)^n$$

ou seja,

$$1 + j = e^r \quad \text{ou} \quad r = \ln(1 + j) \quad (1.47)$$

Assim, a hipótese inicial de que os juros são creditados continuamente é realista desde que a constante de proporcionalidade na equação diferencial r e a taxa de juros j estejam relacionadas por (1.47). Para pequenas taxas de juros os dois valores são muito próximos, $r \approx j$. Por exemplo, $j = 4\%$ corresponde a $r = 3,9\%$ e $j = 1\%$ corresponde a $r = 0,995\% \approx 1\%$.

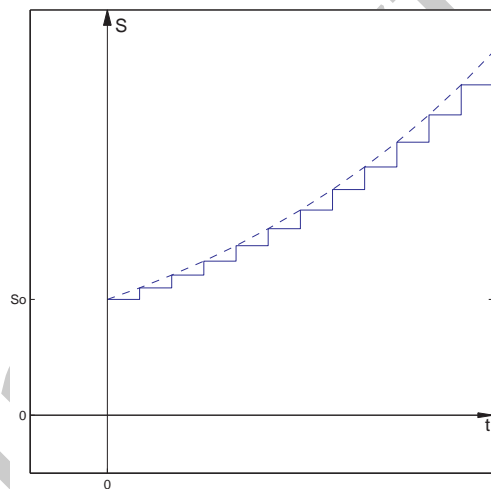


Figura 1.29. Saldo em função do tempo quando não há depósitos

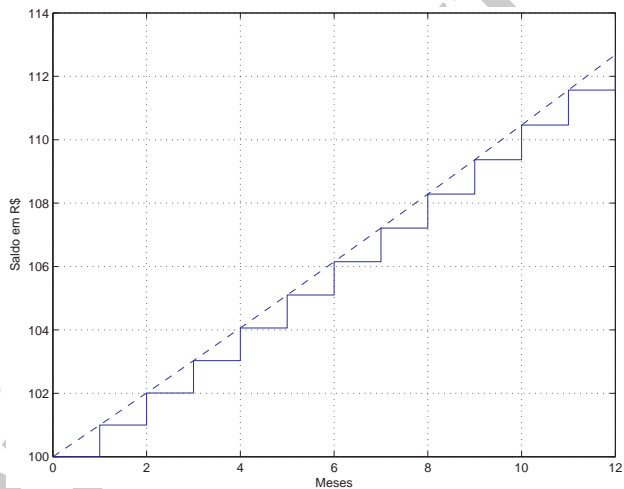


Figura 1.30. Saldo em função do tempo para o problema do Exemplo 1.28

Exemplo 1.28. Vamos supor que uma aplicação renda juros de 1 % ao mês (continuamente). Vamos encontrar o saldo como função do tempo e o saldo após 12 meses se o saldo inicial é de R\$ 100,00.

Podemos descrever o problema de encontrar $S(t)$ como o problema de valor inicial

$$\begin{cases} \frac{dS}{dt} = 0,01 S \\ S(0) = 100 \end{cases}$$

Este problema já resolvemos antes e tem solução

$$S(t) = 100e^{0,01t}.$$

Assim, em 12 meses o saldo é $S(12) = 100e^{0,01 \cdot 12} \approx \text{R\$ } 112,75$.

Vamos supor, agora, que além do investimento inicial S_0 façamos depósitos ou saques continuamente a uma taxa constante d (positivo no caso de depósitos e negativo no caso de saques), então neste caso o modelo que descreve esta situação é o do problema de valor inicial

$$\begin{cases} \frac{dS}{dt} = rS + d \\ S(0) = S_0 \end{cases}$$

A equação é linear e pode ser reescrita como

$$\frac{dS}{dt} - rS = d. \quad (1.48)$$

Para resolvê-la vamos determinar o fator integrante

$$\mu(t) = e^{\int -rdt} = e^{-rt}$$

Multiplicando-se a equação (1.48) por $\mu(t) = e^{-rt}$ obtemos

$$\frac{d}{dt}(e^{-rt}S) = de^{-rt}$$

Integrando-se ambos os membros obtemos

$$e^{-rt}S(t) = -\frac{d}{r}e^{-rt} + c \quad \text{ou} \quad S(t) = ce^{rt} - \frac{d}{r}$$

Substituindo-se $t = 0$ e $S = S_0$, obtemos

$$S_0 = ce^{r0} - \frac{d}{r} \Rightarrow c = S_0 + \frac{d}{r}$$

Ou seja, a solução do problema de valor inicial é

$$S(t) = S_0e^{rt} + \frac{d}{r}(e^{rt} - 1). \quad (1.49)$$

Vamos comparar este resultado com o caso em que além dos juros serem creditados em intervalos constantes os depósitos ou saques de valor D são feitos em intervalos constantes. Neste caso o saldo após n unidades de tempo é dado por

$$\begin{aligned} S(1) &= S_0(1+j) + D \\ S(2) &= S_0(1+j)^2 + D(1+j) + D \\ &\vdots \\ S(n) &= S_0(1+j)^n + D((1+j)^{n-1} + \dots + 1) \\ S(n) &= S_0(1+j)^n + D \frac{(1+j)^n - 1}{j}. \end{aligned} \quad (1.50)$$

Foi usada a soma de uma progressão geométrica. Substituindo-se t por n na solução do problema de valor inicial (1.49) e comparando-se com a equação (1.50) obtemos

que

$$S_0 e^{rn} + \frac{d}{r}(e^{rn} - 1) = S_0(1+j)^n + D \frac{(1+j)^n - 1}{j}$$

ou seja

$$\frac{d}{r} = \frac{D}{j} \quad (1.51)$$

Usando (1.47) obtemos as seguintes relações

$$d = \frac{D \ln(1+j)}{j} \quad \text{ou} \quad D = \frac{(e^r - 1)d}{r}. \quad (1.52)$$

Assim, podemos também neste caso usar o modelo contínuo em que os depósitos ou saques são feitos continuamente desde que a taxa contínua de depósitos d e os depósitos constantes D estejam relacionados por (1.52). Para pequenas taxas de juros já vimos que $r \approx j$ e então por (1.51) temos que $d \approx D$. Por exemplo, $j = 1\%$ corresponde a $r = 0,995\% \approx 1\%$ e neste caso $d \approx D$.

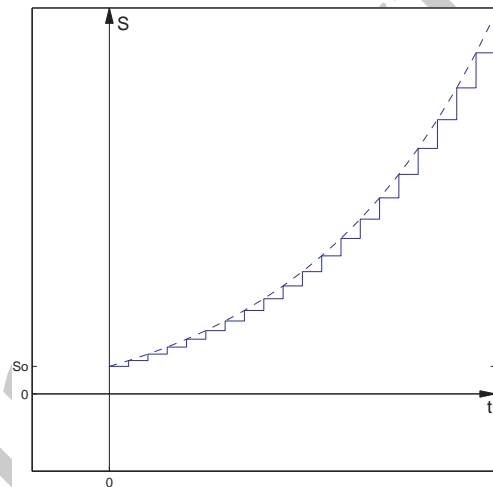


Figura 1.31. Saldo em função do tempo quando são feitos depósitos a uma taxa constante

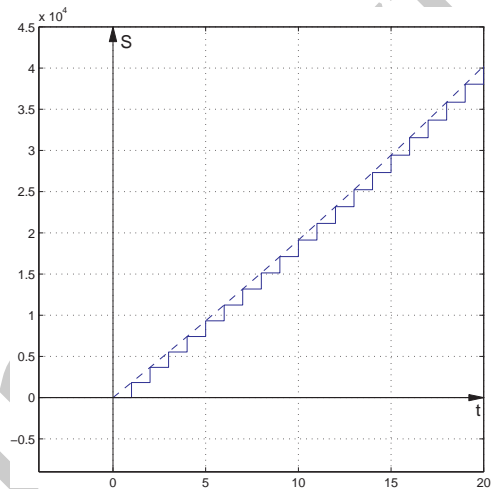


Figura 1.32. Solução do problema de valor inicial do Exemplo 1.29

Exemplo 1.29. Suponha que seja aberta uma caderneta de poupança com o objetivo de no futuro adquirir um bem no valor de R\$ 40.000,00. Suponha que os juros sejam creditados continuamente a uma taxa de $r = 1\%$ ao mês e que os depósitos também sejam feitos continuamente a uma taxa constante, sendo no início o saldo igual a zero. Vamos determinar de quanto deve ser a taxa de depósito mensal para que em 20 meses consiga atingir o valor pretendido.

$$\begin{cases} \frac{dS}{dt} = \frac{1}{100}S + d \\ S(0) = 0 \end{cases}$$

A equação é linear e pode ser reescrita como

$$\frac{dS}{dt} - \frac{1}{100}S = d. \quad (1.53)$$

Para resolvê-la precisamos determinar o fator integrante

$$\mu(t) = e^{\int -\frac{1}{100}dt} = e^{-\frac{1}{100}t}$$

Multiplicando-se a equação (1.53) por $\mu(t) = e^{-\frac{1}{100}t}$ obtemos

$$\frac{d}{dt}(e^{-\frac{1}{100}t}S) = de^{-\frac{1}{100}t}$$

Integrando-se ambos os membros obtemos

$$e^{-\frac{1}{100}t}S(t) = -100de^{-\frac{1}{100}t} + c \quad \text{ou} \quad S(t) = ce^{\frac{1}{100}t} - 100d$$

Substituindo-se $t = 0$ e $S = 0$, obtemos

$$0 = ce^{\frac{1}{100}0} - 100d \quad \Rightarrow \quad c = 100d$$

Ou seja, a solução do problema de valor inicial é

$$S(t) = 100d(e^{\frac{1}{100}t} - 1). \quad (1.54)$$

Substituindo-se $t = 20$ e $S = 40000$:

$$40000 = 100d(e^{\frac{2}{10}} - 1) \Rightarrow d = \frac{400}{e^{\frac{2}{10}} - 1} \approx \text{R\$ } 1807,00$$

Esta é a taxa de depósito mensal, supondo-se que os depósitos sejam realizados continuamente. Usando-se (1.52), temos que o depósito mensal D que corresponde ao depósito contínuo à taxa d é dado por

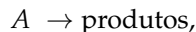
$$D = \frac{(e^r - 1)d}{r} = \frac{(e^{0,01} - 1)1807}{0,01} \approx \text{R\$ } 1816,00.$$

Os valores de d e D são muito próximos, de forma que podemos considerar o depósito mensal como sendo igual a taxa mensal.

1.6.10 Reações Químicas de 2ª Ordem

1º Caso

Suponha que temos uma reação do tipo em que um reagente A se decompõe em outras substâncias:



tal que a velocidade da reação é proporcional ao quadrado da concentração de A , ou seja,

$$\frac{dy}{dt} = -ky^2,$$

em que $y(t)$ é a concentração de A como função do tempo e $k > 0$ é a **constante cinética**.

Multiplicando-se a equação diferencial por $1/y^2$ obtemos a equação

$$\frac{1}{y^2} y' = -k.$$

Esta é uma equação separável. Integrando-se em relação a t e substituindo-se $y' dt = dy$ obtemos que a solução geral da equação diferencial é dada implicitamente por

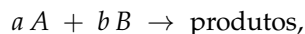
$$\frac{1}{y} = kt + c. \quad (1.55)$$

Substituindo-se $t = 0$ e $y = y_0$ obtemos que $c = 1/y_0$. Explicitando-se $y(t)$ obtemos que a concentração de A em função do tempo é dada por

$$y(t) = \frac{1}{kt + 1/y_0}.$$

2º Caso

Se temos uma reação do tipo



tal que a velocidade da reação é proporcional à concentração de A , mas também é proporcional à concentração de B , ou seja,

$$\frac{dy}{dt} = -kyz, \quad (1.56)$$

em que $y(t)$ é a concentração de A como função do tempo, $z(t)$ é a concentração de B como função do tempo e $k > 0$ é a constante cinética.

Considerando-se que os reagentes são sempre consumidos na proporção estequiométrica, temos que

$$\frac{y_0 - y(t)}{z_0 - z(t)} = \frac{a}{b}.$$

Assim,

$$z(t) = z_0 - \frac{b}{a}(y_0 - y(t)).$$

Se a reação é iniciada com os reagentes na proporção estequiométrica, ou seja,

$$\frac{y_0}{z_0} = \frac{a}{b}.$$

então $z_0 = \frac{b}{a}y_0$ e

$$z(t) = \frac{b}{a}y(t). \quad (1.57)$$

Substituindo-se (1.57) em (1.56) obtemos

$$\frac{dy}{dt} = -\frac{kb}{a}y^2.$$

Esta equação diferencial é do mesmo tipo da equação do caso anterior. Assim, a concentração de A em função do tempo é dada por

$$y(t) = \frac{1}{kbt/a + 1/y_0}.$$

Se a reação é iniciada de forma que os reagentes **não** estejam na proporção estequiométrica, então

$$z(t) = z_0 - \frac{b}{a}(y_0 - y) = \frac{b}{a}(y - \beta),$$

em que $\beta = y_0 - \frac{a}{b}z_0$ e a equação (1.56) se reescreve como

$$\frac{dy}{dt} = -\frac{kb}{a}y(y - \beta).$$

Exemplo 1.30. Considere a reação química da decomposição do dióxido de nitrogênio em óxido nítrico e oxigênio



a uma certa temperatura. Esta é uma reação de 2a. ordem, ou seja, a velocidade com que NO_2 se decompõe é proporcional ao quadrado da sua concentração, ou ainda,

$$\frac{dy}{dt} = -ky^2,$$

em que $y(t)$ é a concentração de NO_2 com função do tempo e $k > 0$ é a constante cinética. Sabendo-se que, a uma dada temperatura, em $t = 0$ a concentração de NO_2 era de 0,1 mol/L e que em $t = 10$ segundos era de 0,009 mol/L, vamos determinar a concentração de NO_2 como função do tempo t .

Multiplicando-se a equação diferencial por $1/y^2$ obtemos a equação

$$\frac{1}{y^2} y' = -k.$$

Esta é uma equação separável. Integrando-se em relação a t e substituindo-se $y' dt = dy$ obtemos que a solução geral da equação diferencial é dada implicitamente por

$$\frac{1}{y} = kt + c. \quad (1.58)$$

Substituindo-se $t = 0$ e $y = 0,1 = 1/10$ obtemos que $c = 10$. Substituindo-se $t = 10$, $y = 0,009 = 9/1000$ e $c = 10$ obtemos que a constante cinética é

$$k = \frac{1000/9 - 10}{10} \approx 10 \text{ L}/(\text{mol.s})$$

Explicitando-se $y(t)$ na solução geral (1.58) obtemos que a concentração de NO_2 em função do tempo é dada por

$$y(t) = \frac{1}{10t + 10}.$$

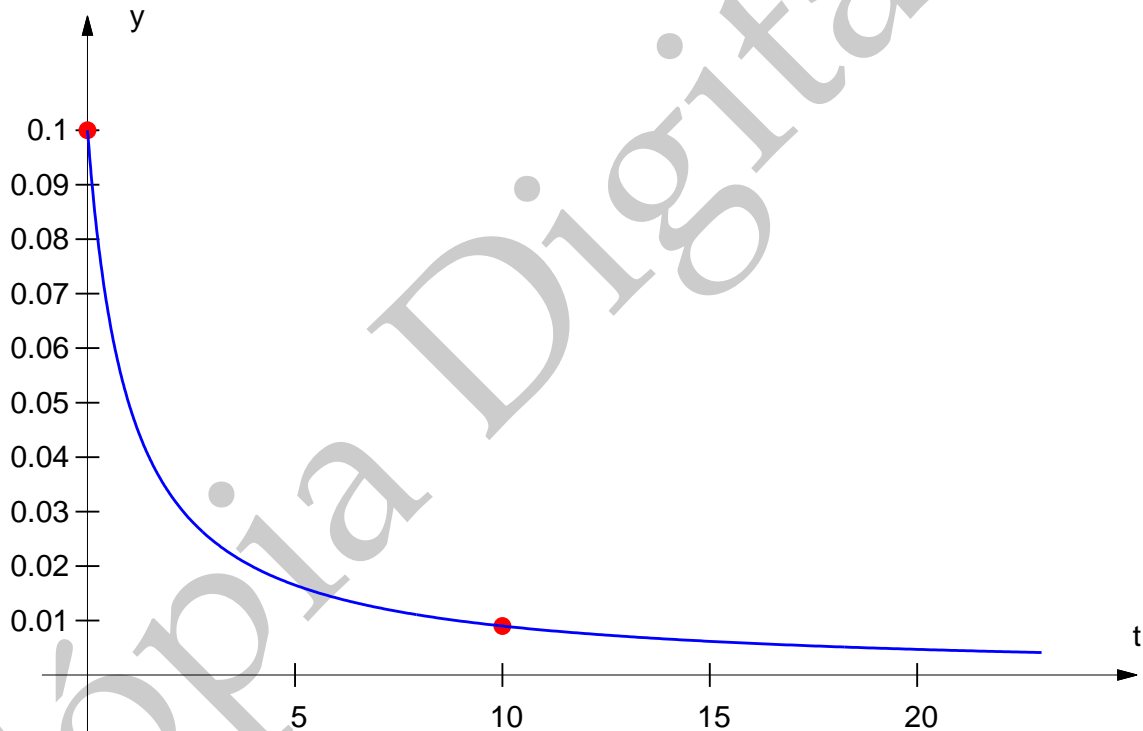


Figura 1.33. Função do Exemplo 1.30

Cópia Digital

1.6.11 Trajetórias Ortogonais

Considere uma família \mathcal{F} de curvas que pode ser representada por uma equação diferencial da forma

$$\frac{dy}{dx} = f(x, y). \quad (1.59)$$

Dado um ponto qualquer (x_0, y_0) , o coeficiente angular da reta tangente a uma curva da família \mathcal{F} que passa por este ponto é dado por

$$\tan \alpha = f(x_0, y_0),$$

pois como a curva satisfaz (1.59), este é o valor da derivada $\frac{dy}{dx}$ em (x_0, y_0) . Uma curva que passa por (x_0, y_0) de forma que a sua tangente neste ponto seja ortogonal à tangente da curva da família \mathcal{F} tem reta tangente com coeficiente angular dado então por

$$\tan \beta = -1/f(x_0, y_0).$$

Assim, a equação diferencial que representa a família de curvas que interceptam ortogonalmente as curvas da família \mathcal{F} é

$$\frac{dy}{dx} = -\frac{1}{f(x, y)}.$$

As curvas que são solução desta equação são chamadas **trajetórias ortogonais** às curvas da família \mathcal{F} .

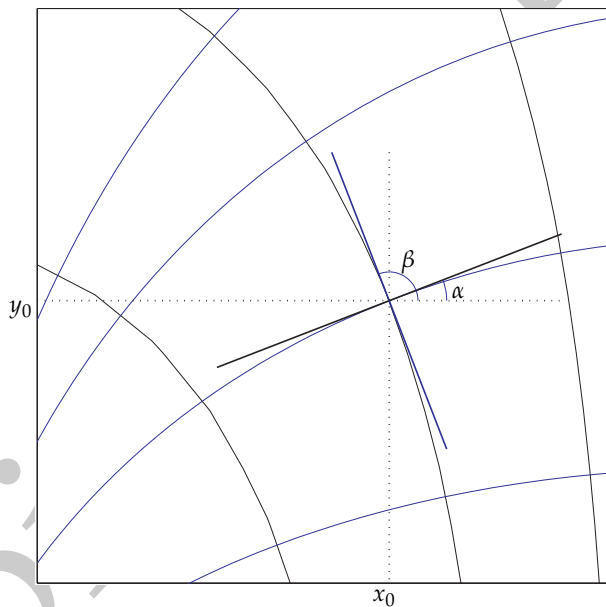


Figura 1.34. Trajetórias Ortogonais: a curva que passa por (x_0, y_0) que tem reta tangente com inclinação $\tan \alpha = f(x_0, y_0)$ é ortogonal à curva que passa por (x_0, y_0) que tem inclinação $\tan \beta = -\frac{1}{f(x_0, y_0)}$.

Exemplo 1.31. Vamos encontrar a família de trajetórias ortogonais da família de parábolas $y = cx^2$. Derivando a equação que define as parábolas obtemos

$$\frac{dy}{dx} = 2cx$$

Da equação das parábolas temos que $c = y/x^2$ que sendo substituído na equação acima produz

$$\frac{dy}{dx} = \frac{2y}{x}$$

Esta equação diferencial caracteriza as parábolas dadas. Assim, a equação que caracteriza as suas trajetórias ortogonais é

$$\frac{dy}{dx} = -\frac{x}{2y} \quad \Rightarrow \quad 2y \frac{dy}{dx} = -x$$

Assim, as trajetórias ortogonais da família de parábolas dadas são as elipses

$$\frac{y^2}{2} + x^2 = c.$$

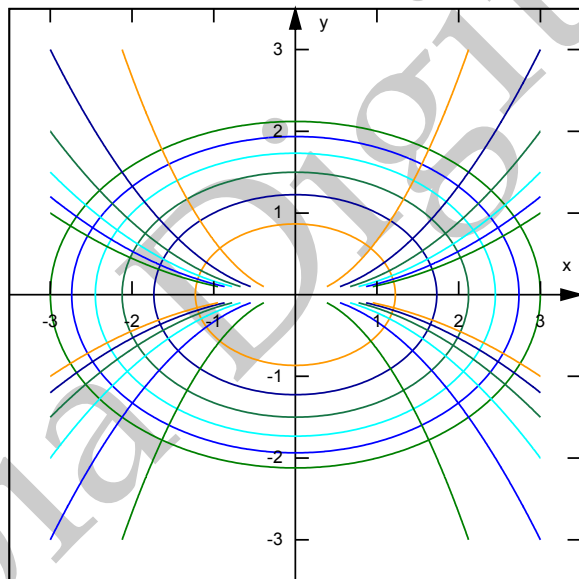


Figura 1.35. As elipses $x^2 + 2y^2 = c$ são as trajetórias ortogonais às parábolas de equações $y = cx^2$.

Exercícios (respostas na página 218)

- 6.1. Um tanque contém 100 litros de uma solução a uma concentração de 1 grama por litro. Uma solução com uma concentração de $2te^{-\frac{1}{100}t}$ gramas por litro entra no tanque a uma taxa constante de 1 litro por minuto, enquanto que a solução bem misturada sai à mesma taxa.
- (a) Determine a quantidade de sal no tanque em cada instante t , onde t é contado a partir do início do processo.
 - (b) Calcule a concentração de sal no tanque $t = 10$ minutos após o início do processo.
- 6.2. Um tanque contém inicialmente 100 litros de água pura. Então, água salgada, contendo $30e^{-\frac{2}{10}t}$ gramas de sal por litro, passa a ser bombeada para o tanque a uma taxa de 10 litros por minuto. Simultaneamente a solução passa a ser agitada e retirada do tanque na mesma taxa.
- (a) Determine a quantidade de sal no tanque em cada instante t , onde t é contado a partir do início do processo.
 - (b) Calcule em que instante a concentração de sal no tanque será de 7,5 gramas por litro.
- 6.3. Um tanque contém inicialmente 100 litros de água e 100 gramas de sal. Então, uma mistura de água e sal na concentração de 5 gramas de sal por litro é bombeada para o tanque a uma taxa de 4 litros por minuto. Simultaneamente a solução (bem misturada) é retirada do tanque na mesma taxa.
- (a) Determine a quantidade de sal no tanque em cada instante t , onde t é contado a partir do início do processo.
 - (b) Calcule a concentração limite de sal no tanque quando $t \rightarrow \infty$ e o tempo necessário para que a concentração atinja metade deste valor.
- 6.4. Suponha que um tanque contenha uma mistura de água e sal com um volume inicial 100 litros e 10 gramas de sal e que uma solução salina seja bombeada para dentro do tanque a uma taxa de 3 litros por minuto possuindo uma concentração de 1 grama de sal por litro. Suponha que a solução bem misturada sai a uma taxa de 2 litros por minuto.

- (a) Determine a quantidade de sal no tanque em cada instante t , onde t é contado a partir do início do processo.
- (b) De qual valor se aproxima a concentração quando o tanque está enchendo, se a sua capacidade é de 200 litros?
- 6.5. Suponha que um tanque contenha uma mistura de água e sal com um volume inicial 100 litros e 10 gramas de sal e que água pura seja bombeada para dentro do tanque a uma taxa de 1 litro por minuto. Suponha que a solução bem misturada sai a uma taxa de 2 litros por minuto.
- (a) Determine a quantidade de sal no tanque em cada instante t , onde t é contado a partir do início do processo.
- (b) De qual valor se aproxima a concentração quando o tanque se aproxima de ficar vazio?
- 6.6. Dentro da Terra a força da gravidade é proporcional à distância ao centro. Um buraco é cavado de polo a polo e uma pedra é largada na borda do buraco.
- (a) Determine a velocidade da pedra em função da distância.
- (b) Com que velocidade a pedra atinge o centro da Terra? Com que velocidade atinge o outro polo?
- (Sugestão: $\frac{dv}{dt} = \frac{dv}{dx} \frac{dx}{dt}$ e $v = \frac{dx}{dt}$)
- 6.7. A taxa com que uma gota esférica se evapora ($\frac{dV}{dt}$) é proporcional a sua área. Determine o raio da gota em função do tempo, supondo que no instante $t = 0$ o seu raio é r_0 e que em uma hora o seu raio seja a metade.
- 6.8. Num processo químico, uma substância se transforma em outra, a uma taxa proporcional à quantidade de substância não transformada. Se esta quantidade é 48 ao fim de 1 hora, e 27 ao fim de 3 horas, qual a quantidade inicial da substância?
- 6.9. A população de bactérias em uma cultura cresce a uma taxa proporcional ao número de bactérias no instante t . Após três horas, observou-se a existência de 400 bactérias. Após 9 horas, 2500 bactérias. Qual era o número inicial de bactérias?

- 6.10. Suponha que um automóvel sofre depreciação continuamente numa taxa que é proporcional ao seu valor num instante t . Este automóvel novo custa R\$ 35000,00. Após um ano de uso o seu valor é R\$ 30000,00. Qual será o valor do automóvel após dois anos de uso?
- 6.11. Uma população de bactérias cresce a uma taxa proporcional à população presente. Sabendo-se que após uma hora a população é 2 vezes a população inicial, determine a população como função do tempo e o tempo necessário para que a população triplique. Faça um esboço do gráfico da população em função do tempo.
- 6.12. Suponha que em uma comunidade de 100 pessoas inicialmente apenas uma pessoa seja portador de um vírus e que a taxa com que o vírus se espalha na comunidade seja proporcional tanto ao número de pessoas infectadas como também ao número de pessoas não infectadas. Se for observado que, após 4 semanas, 5 pessoas estão infectadas, determine o número de pessoas infectadas em função do tempo. Faça um esboço do gráfico da solução.
- 6.13. Na tabela abaixo estão os dados dos 6 penúltimos recenseamentos realizados no Brasil.

Ano	População
1950	52 milhões
1960	70 milhões
1970	93 milhões
1980	119 milhões
1991	147 milhões
2000	170 milhões

Podemos escrever o modelo logístico na forma

$$\frac{1}{y} \frac{dy}{dt} = ay + b$$

em que $a = -k$ e $b = ky_M$. Usando a tabela anterior, podemos aproximar a derivada $y'(t_i)$, para $t_i = 1950, 1960, 1970, 1980, 1991, 2000$, pela diferença finita para frente

$$\frac{dy}{dt}(t_i) \approx \frac{y(t_{i+1}) - y(t_i)}{t_{i+1} - t_i}$$

ou pela diferença finita para trás

$$\frac{dy}{dt}(t_i) \approx \frac{y(t_i) - y(t_{i-1})}{t_i - t_{i-1}}$$

Complete a tabela seguinte

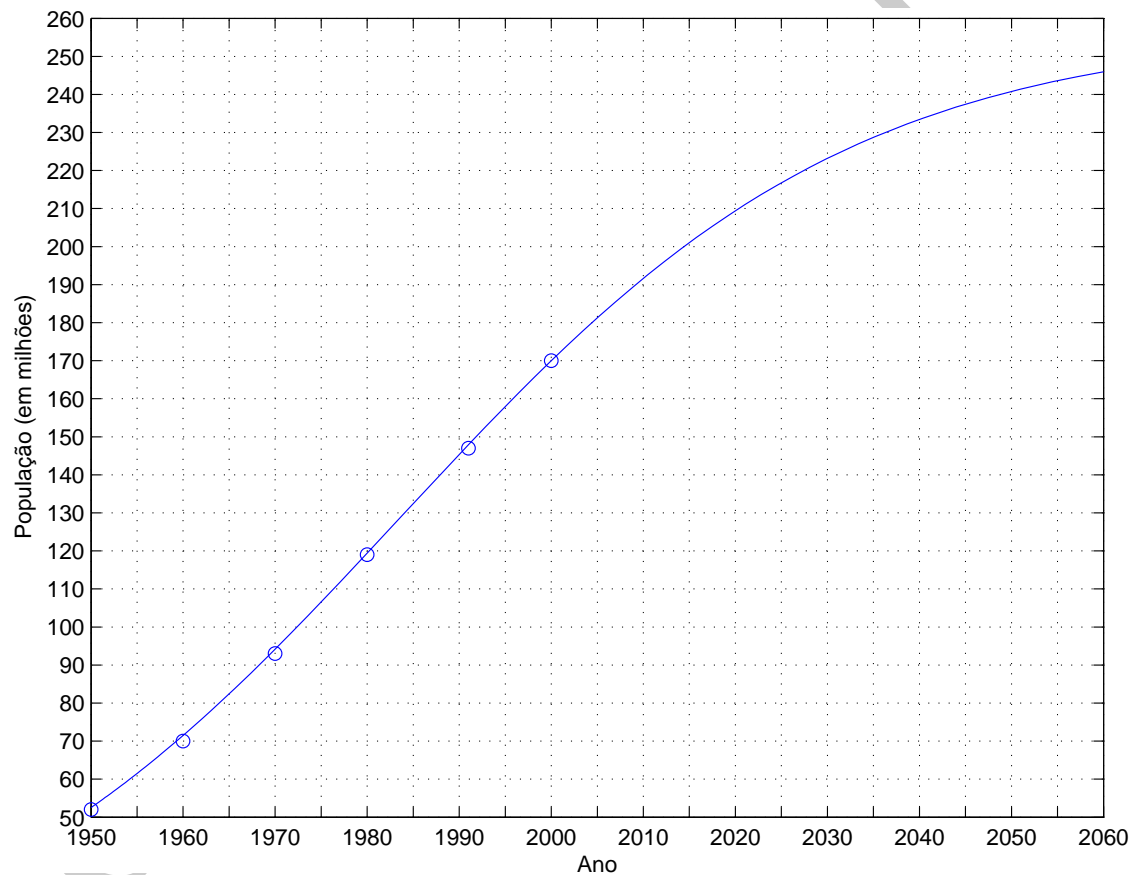
t_i	y_i	$g_i = \frac{1}{y_i} \frac{y_{i+1} - y_i}{t_{i+1} - t_i}$	$h_i = \frac{1}{y_i} \frac{y_i - y_{i-1}}{t_i - t_{i-1}}$	$\frac{g_i + h_i}{2}$
1950	52 milhões	0,0346	-	
1960	70 milhões	0,0329	0,0257	
1970	93 milhões	0,0280	0,0247	
1980	119 milhões	0,0214	0,0218	
1991	149 milhões	0,0174	0,0173	
2000	170 milhões	-	0,0150	

Assim, $\frac{1}{y} \frac{dy}{dt}(t_i) = ay(t_i) + b \approx \frac{g_i + h_i}{2}$, para $t_i = 1960, 1970, 1980, 1991$.

Usando quadrados mínimos encontre a melhor reta, $z = ay + b$, que se ajusta ao conjunto de pontos $(y_i, \frac{g_i + h_i}{2})$, para $y_i = 1960, 1970, 1980, 1991$. Determine k e y_M a partir dos valores de a e b encontrados.

Usando $t_0 = 2000$, $y_0 = 170$ milhões obtenha $y(t) = \frac{257 \cdot 10^6}{1 + 0,51 \cdot e^{-0,04(t-2000)}}$.

Determine a estimativa para a população do ano 2010, $y(2010)$. Compare com o recenseamento realizado em 2010, em que a população foi de 190,7 milhões.



- 6.14. Um tambor cônico com vértice para baixo, de 2 metros de altura e base circular de raio 1 metro, está cheio de água. Se fizermos um furo no fundo e em 30 minutos a altura da coluna de água cair pela metade determinar a altura h em função do tempo e em quanto tempo o tanque esvazia. A **lei de Torricelli** diz que a taxa com que um líquido escoar por um orifício situado a uma profundidade h é proporcional a \sqrt{h} .
- 6.15. Um termômetro é levado de uma sala onde a temperatura é de 20°C para fora, onde a temperatura é de 5°C . Após $1/2$ minuto o termômetro marca 15°C .
- (a) Determine a temperatura marcada no termômetro como função do tempo.
 - (b) Qual será a leitura do termômetro após 1 minuto?
 - (c) Em quanto tempo o termômetro irá marcar 10°C ?
- 6.16. Um bote motorizado e seu tripulante têm uma massa de 120 quilogramas e estava inicialmente no repouso. O motor exerce uma força constante de 10 newtons, na direção do movimento. A resistência exercida pela água, ao movimento, é, em módulo, igual ao dobro da velocidade.
- (a) Determine a velocidade do bote em função do tempo.
 - (b) Determine a velocidade limite do bote.
 - (c) Faça um esboço do gráfico da velocidade em função do tempo.
- 6.17. Com o objetivo de fazer uma previdência particular uma pessoa deposita uma quantia de R\$ 100,00 por mês durante 20 anos (suponha que o depósito é feito continuamente a uma taxa de R\$ 100,00 por mês e que o saldo inicial é zero).
- (a) Supondo que neste período a taxa de juros seja de 1% ao mês (contínua), qual o valor que esta pessoa iria ter ao fim deste período.
 - (b) Se após o período anterior esta pessoa quisesse fazer retiradas mensais, qual deveria ser o valor destas retiradas para que em 20 anos tenha desaparecido o capital, se a taxa de juros continuasse em 1% (contínua)?
- 6.18. Em um circuito RC uma bateria gera uma diferença de potencial de 10 volts enquanto a resistência é de 200 ohms e a capacitância é de 10^{-4} farads. Encontre a carga $Q(t)$ no capacitor em cada instante t , se $Q(0) = 0$. Encontre também a corrente $I(t)$ em cada instante t .

- 6.19. Considere o circuito elétrico abaixo formado por um resistor, um indutor e uma fonte de tensão externa ligados em série. A bateria gera uma diferença de potencial de $V(t) = 10$ volts, enquanto a resistência R é de 100 ohms e a indutância L é de 0,5 henrys. Sabendo-se que a queda de potencial em um indutor é igual a $L \frac{dI}{dt}$ encontre a corrente $I(t)$ em cada instante t , se $I(0) = 0$.

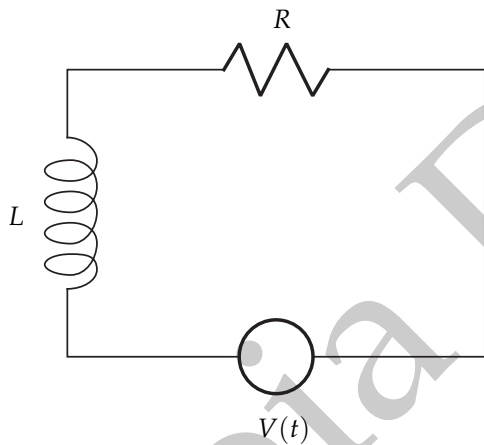
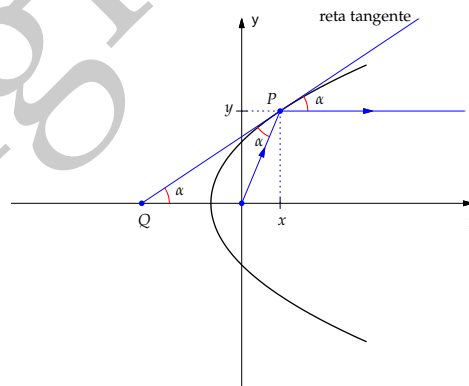


Figura 1.36. Circuito RL

Figura 1.37. Curva refletindo raios na direção do eixo x , que partem da origem.

6.20. Uma substância decompõe-se de acordo com uma lei de velocidade de segunda ordem. Sendo a constante de velocidade 2×10^{-4} L/(mol.s).

- (a) Determine a concentração da substância como função do tempo, se a concentração inicial for 0,05 mols/L.
- (b) Calcule a meia-vida da substância (tempo necessário para que metade da quantidade inicial da substância se decomponha) quando a concentração inicial for 0,01 mols/L.

6.21. Suponha que raios refletem numa curva de forma que o ângulo de incidência seja igual ao ângulo de reflexão. Determine as curvas que satisfazem a propriedade de que os raios incidentes na curva partindo da origem refletem na direção horizontal seguindo os seguintes passos:

- (a) Mostre que os pontos $P = (x, y)$ da curva satisfazem a equação diferencial

$$y' = \frac{y}{x + \sqrt{x^2 + y^2}}. \quad (1.60)$$

- (b) Racionalize o denominador do lado direito da equação (1.60) e obtenha a equação diferencial

$$\frac{\sqrt{x^2 + y^2} - x}{y} - y' = 0.$$

Verifique que $\mu(x, y) = \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}}$ é um fator integrante para esta equação e encontre a sua solução geral.

6.22. Determine as trajetórias ortogonais às famílias de curvas dadas. Faça esboço dos gráficos.

(a) $y = c/x$

(b) $x^2 + (y - c)^2 = c^2$

1.7 Análise Qualitativa

1.7.1 Equações Autônomas

As **equações autônomas** são equações da forma

$$\frac{dy}{dt} = f(y). \quad (1.61)$$

Para as equações autônomas podemos esboçar várias soluções sem ter que resolver a equação, pois a equação diferencial fornece a inclinação da reta tangente às soluções, $\frac{dy}{dt}$, como função de y e assim podemos saber como varia com y o crescimento e o decrescimento das soluções.

Observe que se y_1, \dots, y_k são zeros da função $f(y)$, então $y(t) = y_i$ são soluções constantes da equação (1.61), para $i = 1, \dots, k$ (verifique!).

Definição 1.1. (a) Sejam y_1, \dots, y_k zeros da função $f(y)$. Os pontos y_i são chamados **pontos críticos** ou **de equilíbrio** da equação (1.61) e as soluções $y(t) = y_i$ são chamadas **soluções de equilíbrio** ou **estacionárias** da equação (1.61).

- (b) Um ponto de equilíbrio y_i é chamado **(assintoticamente) estável** se para $y(t_0)$ um pouco diferente de y_i , $y(t)$ se aproxima de y_i , quando t cresce.
- (c) Um ponto de equilíbrio y_i é chamado **(assintoticamente) instável** se não for estável.

Se $f(y_i) = 0$ e $f(y) < 0$ para y próximo de y_i com $y > y_i$ e $f(y) > 0$ para y próximo de y_i com $y < y_i$, então y_i é um ponto de equilíbrio estável. Pois neste caso

- Se $y(t_0)$ é um pouco maior do que y_i , então a derivada $\frac{dy}{dt} = f(y)$ é negativa e portanto a solução $y(t)$ é decrescente e assim $y(t)$ se aproxima de y_i , quando t cresce.
- Se $y(t_0)$ é um pouco menor do que y_i , então a derivada $\frac{dy}{dt} = f(y)$ é positiva e portanto a solução $y(t)$ é crescente e assim $y(t)$ se aproxima de y_i , quando t cresce.

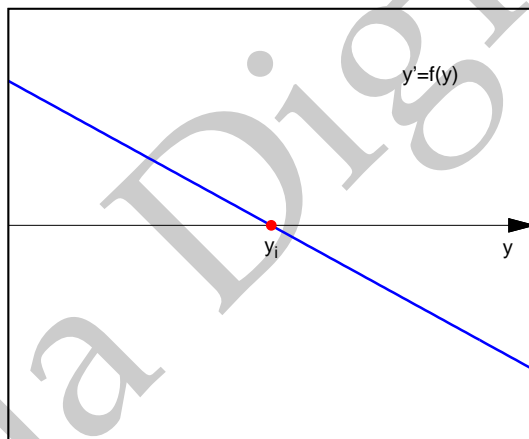


Figura 1.38. Gráfico de $y' = f(y)$ nas proximidades de um ponto de equilíbrio estável

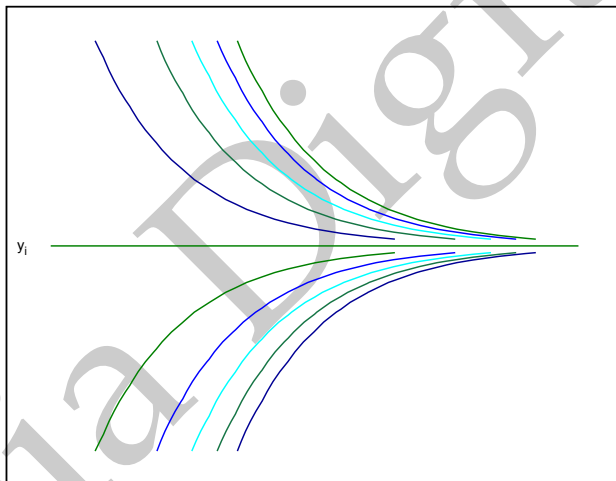


Figura 1.39. Soluções de $\frac{dy}{dt} = f(y)$ nas proximidades de um ponto de equilíbrio estável

Se $f(y_i) = 0$ e $f(y) > 0$ para y próximo de y_i com $y > y_i$ e $f(y) < 0$ para y próximo de y_i com $y < y_i$, então y_i é um ponto de equilíbrio instável. Pois neste caso

- Se $y(t_0)$ é um pouco maior do que y_i , então a derivada $\frac{dy}{dt} = f(y)$ é positiva e portanto a solução $y(t)$ é crescente e assim $y(t)$ se afasta de y_i , quando t cresce.
- Se $y(t_0)$ é um pouco menor do que y_i , então a derivada $\frac{dy}{dt} = f(y)$ é negativa e portanto a solução $y(t)$ é decrescente e assim $y(t)$ se afasta de y_i , quando t cresce.

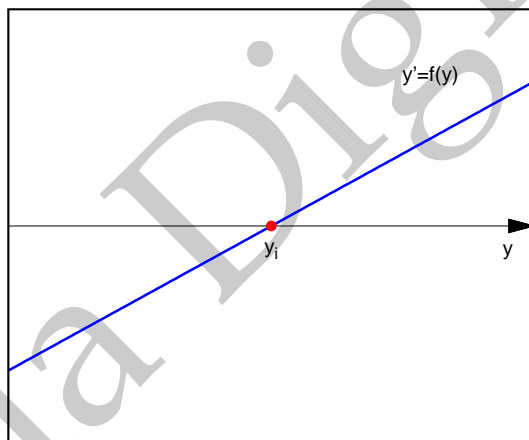


Figura 1.40. Gráfico de $y' = f(y)$ nas proximidades de um ponto de equilíbrio instável

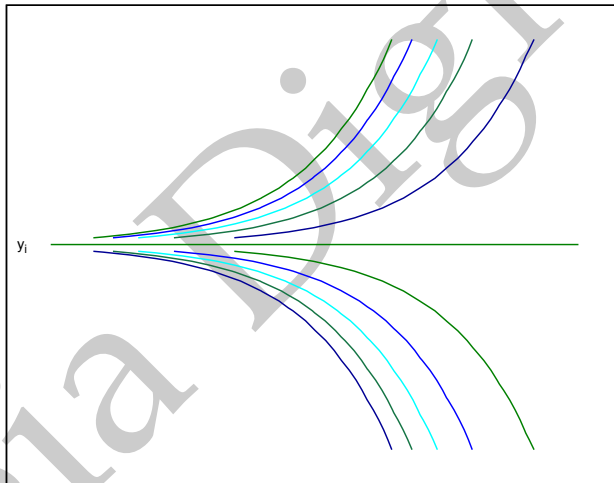


Figura 1.41. Soluções de $\frac{dy}{dt} = f(y)$ nas proximidades de um ponto de equilíbrio instável

Se $f(y_i) = 0$ e $f(y) > 0$ para y próximo de y_i com $y \neq y_i$, então y_i é um ponto de equilíbrio instável. Pois neste caso

- Se $y(t_0)$ é um pouco maior do que y_i , então a derivada $\frac{dy}{dt} = f(y)$ é positiva e portanto a solução $y(t)$ é crescente e assim $y(t)$ se afasta de y_i , quando t cresce. Logo y_i não pode ser um ponto de equilíbrio estável.

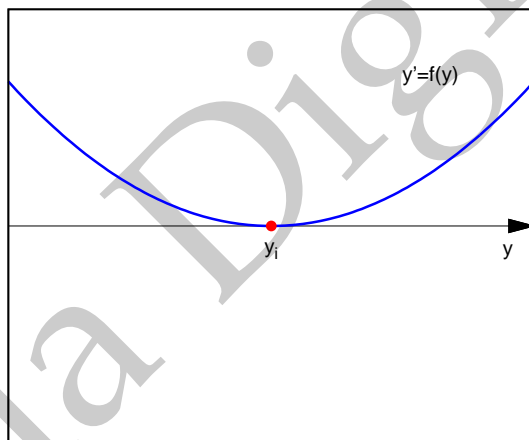


Figura 1.42. Gráfico de $y' = f(y)$ nas proximidades de um ponto de equilíbrio instável

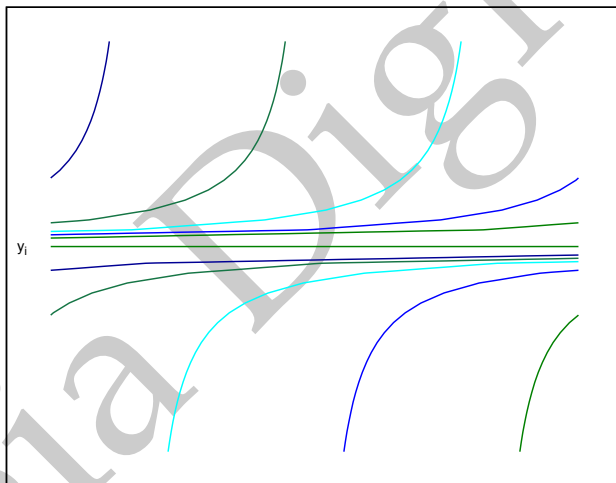


Figura 1.43. Soluções de $\frac{dy}{dt} = f(y)$ nas proximidades de um ponto de equilíbrio instável

Se $f(y_i) = 0$ e $f(y) < 0$ para y próximo de y_i com $y \neq y_i$, então y_i é um ponto de equilíbrio instável. Pois neste caso

- Se $y(t_0)$ é um pouco menor do que y_i , então a derivada $\frac{dy}{dt} = f(y)$ é negativa e portanto a solução $y(t)$ é decrescente e assim $y(t)$ se afasta de y_i , quando t cresce. Logo y_i não pode ser um ponto de equilíbrio estável.

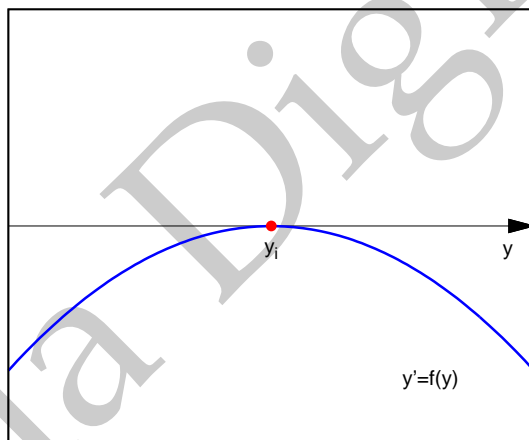


Figura 1.44. Gráfico de $y' = f(y)$ nas proximidades de um ponto de equilíbrio instável

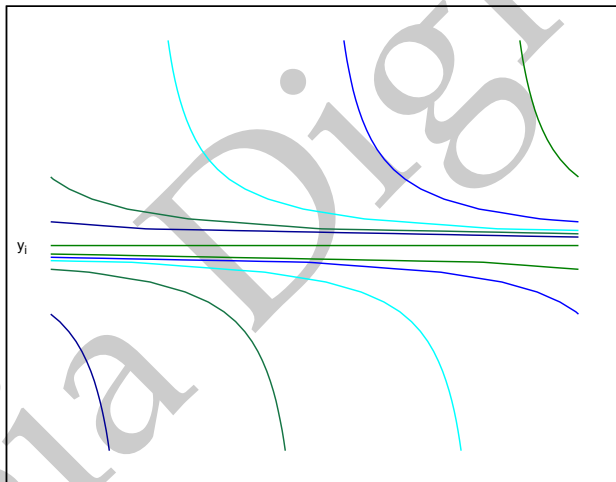


Figura 1.45. Soluções de $\frac{dy}{dt} = f(y)$ nas proximidades de um ponto de equilíbrio instável

Se $f(y)$ é derivável, também podemos saber os valores de y para os quais as soluções têm pontos de inflexão e como varia a concavidade das soluções com y , pois

$$\frac{d^2y}{dt^2} = \frac{d}{dt} \frac{dy}{dt} = \frac{d}{dt} f(y)$$

e pela regra da cadeia

$$\frac{d}{dt} f(y) = f'(y) \frac{dy}{dt} = f'(y) f(y).$$

Assim,

$$\frac{d^2y}{dt^2} = f'(y) f(y).$$

Logo, para as soluções não constantes os pontos de inflexão ocorrem para os valores de y tais que $f'(y) = 0$.

Exemplo 1.32. Considere a equação diferencial:

$$\frac{dy}{dt} = y^2 - y. \quad (1.62)$$

Vamos esboçar várias soluções da equação. Para isto vamos determinar os pontos de equilíbrio. Depois vamos determinar como varia o crescimento e o decrescimento das soluções com y . E finalmente para quais valores de y as soluções têm ponto de inflexão.

Os pontos de equilíbrio são as raízes de $f(y) = y^2 - y = y(y - 1) = 0$, ou seja, $y_1 = 0$ e $y_2 = 1$.

Como $\frac{dy}{dt} = y^2 - y < 0$, para $0 < y < 1$, então as soluções são decrescentes para $0 < y < 1$.

Como $\frac{dy}{dt} = y^2 - y > 0$, para $y < 0$ e para $y > 1$, então as soluções são crescentes para $y < 0$ e para $y > 1$.

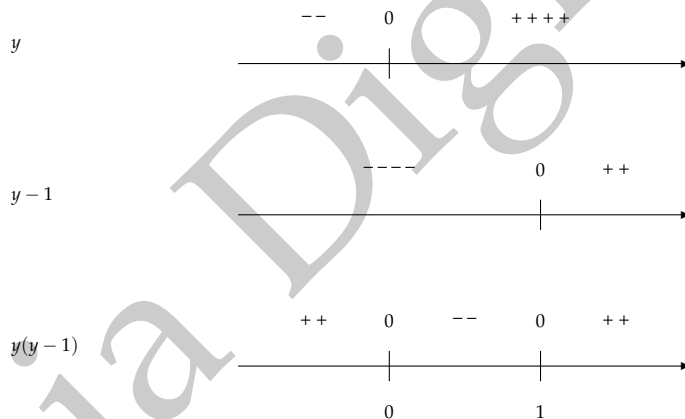


Figura 1.46. Sinais de $\frac{dy}{dt} = f(y)$ da equação (1.62)

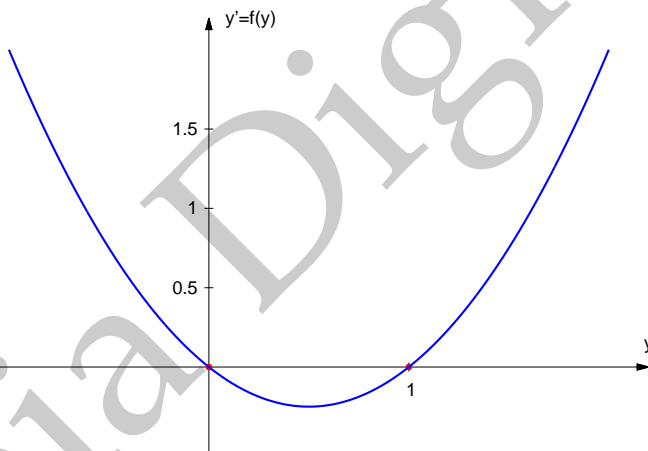


Figura 1.47. Sinais de $y' = f(y)$ da equação (1.62)

Observamos que o ponto de equilíbrio $y_1 = 0$ é estável pois para valores de y próximos de $y_1 = 0$ as soluções correspondentes $y(t)$ estão se aproximando de $y_1 = 0$, quando t cresce. O ponto de equilíbrio $y_2 = 1$ é instável pois para valores de y próximos de $y_2 = 1$ as soluções correspondentes $y(t)$ estão se afastando de $y_2 = 1$, quando t cresce.

Vamos determinar para quais valores de y as soluções têm pontos de inflexão calculando a segunda derivada.

$$\frac{d^2y}{dt^2} = \frac{d}{dt} \frac{dy}{dt} = \frac{d}{dt}(y^2 - y).$$

Mas pela regra da cadeia

$$\frac{d}{dt}(y^2 - y) = (2y - 1) \frac{dy}{dt} = (2y - 1)(y^2 - y).$$

Assim,

$$\frac{d^2y}{dt^2} = (2y - 1)(y^2 - y).$$

Logo, as soluções não constantes têm pontos de inflexão para $y = 1/2$.

Com as informações sobre os pontos críticos, regiões de crescimento e decréscimo, pontos de inflexão podemos fazer um esboço dos gráficos de algumas soluções.

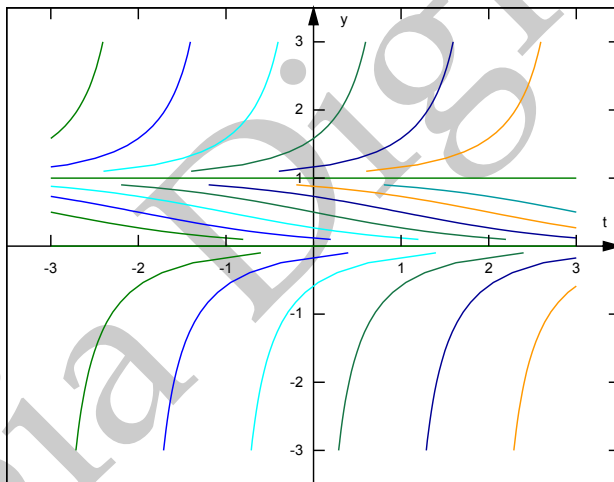


Figura 1.48. Algumas soluções da equação (1.62)

Cópia Digital

1.7.2 Campo de Direções

Uma maneira de se ter uma ideia do comportamento das soluções de uma equação diferencial de 1ª ordem

$$\frac{dy}{dt} = f(t, y)$$

sem ter de resolvê-la é desenhar o **campo de direções**

$$(t, y) \mapsto \frac{\delta}{\sqrt{1 + (y')^2}} \left(1, \frac{dy}{dt}\right) = \frac{\delta}{\sqrt{1 + (f(t, y))^2}} (1, f(t, y)), \quad \delta > 0,$$

da seguinte forma:

- (a) Constrói-se uma malha retangular consistindo em pelo menos uma centena de pontos igualmente espaçados;
- (b) Em cada ponto da malha desenha-se um segmento orientado que tem inclinação igual à da reta tangente à solução da equação que passa pelo ponto da malha, ou seja, na direção e sentido de

$$\left(1, \frac{dy}{dt}\right) = (1, f(t, y))$$

e com comprimento igual a δ , com δ menor do que o tamanho da malha.

Desenhar o campo de direções é, como está dito em [2], “uma tarefa para a qual o computador é particularmente apropriado e você deve, em geral, usar o computador para desenhar um campo de direções.” Por isso, escrevemos uma função para o MATLAB® que está no pacote GAAL e que torna esta tarefa mais fácil chamada `campo(f, [xmin xmax], [ymin ymax])`.

Entretanto, para as equações autônomas, como as que estudamos na seção anterior, é fácil desenhar o campo de direções, pois as inclinações variam somente com y .

Para a equação do Exemplo 1.32 está desenhado a seguir o campo de direções.

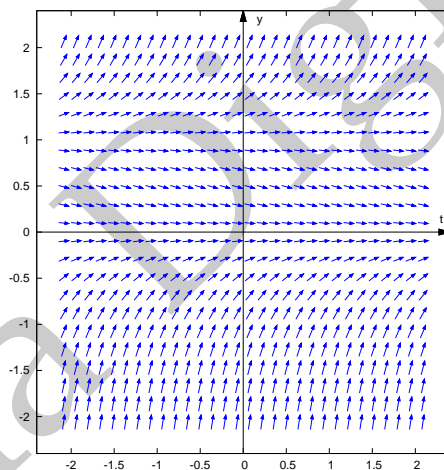


Figura 1.49. Campo de Direções da equação do Exemplo 1.32

Exercícios (respostas na página 245)

Para as equações diferenciais autônomas dadas

$$\frac{dy}{dt} = f(y)$$

- (a) Esboce o gráfico de $f(y)$ em função de y , determine os pontos de equilíbrio e classifique cada um dos pontos de equilíbrio como assintoticamente estável ou instável. Justifique.
- (b) Determine como varia o crescimento das soluções com y .
- (c) Determine para quais valores de y as soluções têm pontos de inflexão.
- (d) Esboce algumas soluções da equação usando os resultados dos itens anteriores.
- (e) Desenhe o campo de direções.

7.1. $\frac{dy}{dt} = y - y^2.$

7.3. $\frac{dy}{dt} = -y - y^2.$

7.2. $\frac{dy}{dt} = 1 - y^2.$

7.4. $\frac{dy}{dt} = y + y^2.$

7.5. Para as equações diferenciais autônomas dadas,

$$\frac{dy}{dt} = f(y),$$

esboce o gráfico de $f(y)$ em função de y , determine os pontos de equilíbrio e classifique cada um deles como assintoticamente estável ou instável. Justifique. Esboce algumas soluções.

(a) $\frac{dy}{dt} = (y^2 - 4)(y^2 + y)$

(b) $\frac{dy}{dt} = f(y) = y(y^2 + 3y + 2)$

(c) $\frac{dy}{dt} = f(y) = y(y-1)^2(y-2)$

- 7.6. Uma modificação do modelo de crescimento populacional logístico que leva em conta a existência de uma população limiar, y_L , com $0 < y_L < y_M$, que abaixo da qual a população se extingue é dada por

$$\begin{cases} \frac{dy}{dt} = ky(y_M - y)(y - y_L), \\ y(0) = y_0. \end{cases}$$

Faça um esboço das possíveis soluções da equação diferencial acima, para k, y_M e y_L positivos, e verifique que realmente as soluções se comportam como no crescimento logístico quando $y_0 > y_L$ e as soluções tendem a zero quando $0 \leq y_0 < y_L$.

1.8 Existência e Unicidade de Soluções

Considere novamente o problema de valor inicial

$$\begin{cases} \frac{dy}{dt} = f(t, y) \\ y(t_0) = y_0 \end{cases} \quad (1.63)$$

Nem sempre este problema tem uma única solução como mostra o próximo exemplo.

Exemplo 1.33. Considere o problema de valor inicial

$$\begin{cases} \frac{dy}{dt} = \sqrt{y} \\ y(0) = 0 \end{cases}$$

Este problema tem duas soluções. Resolvendo a equação diferencial como uma equação separável obtemos (verifique!)

$$y_1(t) = \frac{t^2}{4}, \quad \text{para } t \geq 0$$

e analisando a equação diferencial como uma equação autônoma temos a solução de equilíbrio

$$y_2(t) = 0.$$

Se a função $f(t, y)$ e a sua derivada $\frac{\partial f}{\partial y}$ forem contínuas em um retângulo em torno de (t_0, y_0) o que ocorreu no exemplo anterior não acontece como estabelecemos no próximo teorema que será demonstrado apenas ao final da seção.

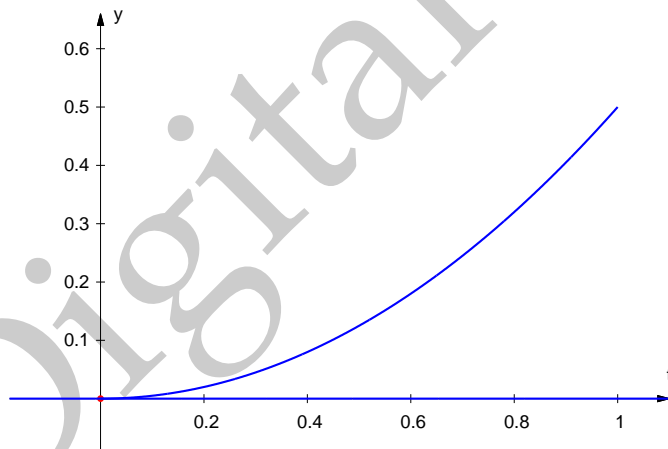


Figura 1.50. Duas soluções do problema de valor inicial do Exemplo 1.33

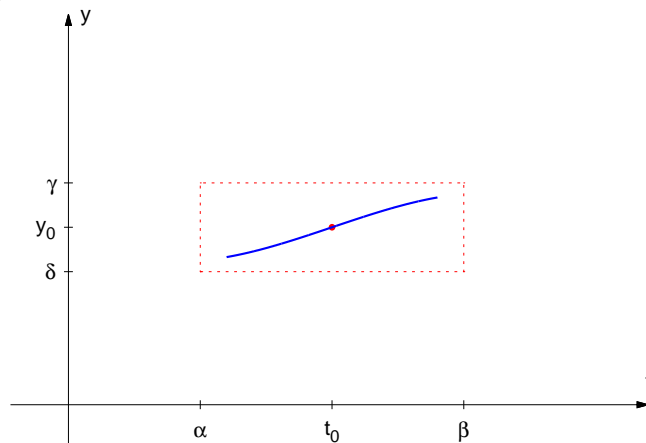


Figura 1.51. Retângulo em torno de (t_0, y_0) onde o problema de valor inicial tem uma única solução

Teorema 1.1 (Existência e Unicidade). *Considere o problema de valor inicial*

$$\begin{cases} \frac{dy}{dt} = f(t, y) \\ y(t_0) = y_0 \end{cases} \quad (1.64)$$

Se $f(t, y)$ e $\frac{\partial f}{\partial y}$ são contínuas no retângulo $R = \{(t, y) \in \mathbb{R}^2 \mid \alpha < t < \beta, \delta < y < \gamma\}$ contendo (t_0, y_0) , então o problema (1.64) tem uma única solução em um intervalo contendo t_0 .

Exemplo 1.34. Para o problema de valor inicial do [Exemplo 1.33](#) mas com o ponto inicial (t_0, y_0)

$$\begin{cases} \frac{dy}{dt} = \sqrt{y} \\ y(t_0) = y_0 \end{cases}$$

$$f(t, y) = \sqrt{y} \quad \Rightarrow \quad \frac{\partial f}{\partial y} = \frac{1}{2\sqrt{y}}.$$

Vemos que se (t_0, y_0) é tal que $y_0 > 0$, então o problema de valor inicial acima tem solução única.

Exemplo 1.35. Considere o problema de valor inicial

$$\begin{cases} \frac{dy}{dt} = y^2 \\ y(t_0) = y_0 \end{cases}$$

Pelo [Teorema 1.1](#) o problema de valor inicial acima tem uma única solução para todo $(t_0, y_0) \in \mathbb{R}^2$. Mas, por exemplo, para $t_0 = 0$ e $y_0 = 1$ o problema tem solução

$$y(t) = \frac{-1}{t-1} \text{ (verifique!) e é válida somente no intervalo } t < 1.$$

No exemplo anterior apesar do [Teorema 1.1](#) garantir que em todo ponto $(t_0, y_0) \in \mathbb{R}^2$ existe uma solução localmente (num intervalo em torno de t_0) estas soluções não se juntam de modo a formar soluções globais (que existam para todo $t \in \mathbb{R}$). Isto não ocorre para equações lineares como provamos a seguir.

Teorema 1.2 (Existência e Unicidade para Equações Lineares). *Considere o problema de valor inicial*

$$\begin{cases} \frac{dy}{dt} + p(t)y = q(t) \\ y(t_0) = y_0 \end{cases}$$

Se $p(t)$ e $q(t)$ são funções contínuas em um intervalo aberto I contendo t_0 , então o problema de valor inicial tem uma única solução neste intervalo.

Demonstração. A unicidade segue-se do [Teorema 1.1 na página 154](#). Vamos provar a existência exibindo a solução do problema de valor inicial. Seja

$$y(t) = \frac{1}{\mu(t)} \left(\int_{t_0}^t \mu(s)q(s)ds + y_0 \right), \quad \text{em que} \quad \mu(t) = e^{\int_{t_0}^t p(s)ds}.$$

Por hipótese a função $y(t)$ está bem definida. Vamos mostrar que $y(t)$ é solução do problema de valor inicial.

$$\mu(t)y(t) = \int_{t_0}^t \mu(s)q(s)ds + y_0$$

Como $p(t)$ e $q(t)$ são contínuas, então

$$\frac{d}{dt} (\mu(t)y(t)) = \mu(t)q(t)$$

Derivando o produto obtemos

$$\mu(t) \frac{dy}{dt} + \frac{d\mu}{dt} y = \mu(t)q(t).$$

Mas $\frac{d\mu}{dt} = \mu(t)p(t)$, então a equação acima pode ser escrita como

$$\mu(t) \frac{dy}{dt} + \mu(t)p(t)y = \mu(t)q(t).$$

Dividindo-se por $\mu(t)$ obtemos a equação dada.

Agora, como $y(t_0) = y_0$ segue-se que $y(t)$ dado é a solução do problema de valor inicial. ■

Exemplo 1.36. Considere o problema de valor inicial

$$\begin{cases} \frac{dy}{dt} + \frac{4}{t}y = 5 \\ y(t_0) = y_0 \end{cases}$$

Neste caso $p(t) = \frac{4}{t}$ e $q(t) = 5$. A função $p(t)$ é contínua para $t \neq 0$. Para $t_0 = 2$, por exemplo, o problema de valor inicial tem uma única solução, que está definida pelo menos para $t > 0$ e para $t_0 = -3$, o problema de valor inicial tem uma única solução, que está definida pelo menos para $t < 0$. Isto de fato ocorre como vimos ao resolver esta equação diferencial no [Exemplo 1.9 na página 20](#).

1.8.1 Demonstração do Teorema de Existência e Unicidade

[Demonstração do Teorema 1.1 na página 154](#).

(a) Existência:

Defina a sequência de funções $y_n(t)$ por

$$y_0(t) = y_0, \quad y_n(t) = y_0 + \int_{t_0}^t f(s, y_{n-1}(s)) ds, \quad \text{para } n = 1, 2, \dots$$

Como $f(t, y)$ é contínua no retângulo R , existe uma constante positiva b tal que

$$|f(t, y)| \leq b, \quad \text{para } (t, y) \in R.$$

Assim,

$$|y_1(t) - y_0| \leq b|t - t_0|, \quad \text{para } \alpha < t < \beta.$$

Como $\frac{\partial f}{\partial y}$ é contínua no retângulo R , existe uma constante positiva a (veja o [Exerc. 8.3 na página 163](#)) tal que

$$|f(t, y) - f(t, z)| \leq a|y - z|, \quad \text{para } \alpha < t < \beta \text{ e } \delta < y, z < \gamma.$$

Assim,

$$\begin{aligned} |y_2(t) - y_1(t)| &\leq \int_{t_0}^t |f(s, y_1(s)) - f(s, y_0(s))| ds \\ &\leq a \int_{t_0}^t |y_1(s) - y_0(s)| ds \leq ab \int_{t_0}^t |s - t_0| ds = ab \frac{|t - t_0|^2}{2} \end{aligned}$$

e

$$\begin{aligned} |y_3(t) - y_2(t)| &\leq \int_{t_0}^t |f(s, y_2(s)) - f(s, y_1(s))| ds \\ &\leq a \int_{t_0}^t |y_2(s) - y_1(s)| ds \\ &\leq a^2 b \int_{t_0}^t \frac{|s - t_0|^2}{2} ds = a^2 b \frac{|t - t_0|^3}{6}. \end{aligned}$$

Vamos supor, por indução, que

$$|y_{n-1}(t) - y_{n-2}(t)| \leq a^{n-2} b \frac{|t - t_0|^{n-1}}{(n-1)!}.$$

Então,

$$\begin{aligned} |y_n(t) - y_{n-1}(t)| &\leq \int_{t_0}^t |f(s, y_{n-1}(s)) - f(s, y_{n-2}(s))| ds \\ &\leq a \int_{t_0}^t |y_{n-1}(s) - y_{n-2}(s)| ds \\ &\leq a \int_{t_0}^t a^{n-2} b \frac{|s - t_0|^{n-1}}{(n-1)!} ds = a^{n-1} b \frac{|t - t_0|^n}{n!} \quad (1.65) \end{aligned}$$

Estas desigualdades são válidas para $\alpha \leq \alpha^* < t < \beta^* \leq \beta$ em que α^* e β^* são tais que $\delta < y_n(t) < \gamma$ sempre que $\alpha^* < t < \beta^*$ (por que existem α^* e β^* ?).

Segue-se de (1.65) que

$$\sum_{n=1}^{\infty} |y_n(t) - y_{n-1}(t)| \leq b \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a^{n-1}(\beta - \alpha)^n}{n!}$$

que é convergente. Como

$$y_n(t) = y_0 + \sum_{k=1}^n (y_k(t) - y_{k-1}(t)),$$

então $y_n(t)$ é convergente. Seja

$$y(t) = \lim_{n \rightarrow \infty} y_n(t).$$

Como

$$|y_m(t) - y_n(t)| \leq \sum_{k=n+1}^m |y_k(t) - y_{k-1}(t)| \leq b \sum_{k=n+1}^m \frac{a^{k-1}(\beta - \alpha)^k}{k!},$$

então passando ao limite quando m tende a infinito obtemos que

$$|y(t) - y_n(t)| \leq b \sum_{k=n+1}^{\infty} \frac{a^{k-1}(\beta - \alpha)^k}{k!} \quad (1.66)$$

Logo, dado um $\epsilon > 0$, para n suficientemente grande, $|y(t) - y_n(t)| < \epsilon/3$, para $\alpha^* < t < \beta^*$. Daí segue-se que $y(t)$ é contínua, pois dado um $\epsilon > 0$, para s suficientemente próximo de t , temos que $|y_n(t) - y_n(s)| < \epsilon/3$ e para n suficientemente grande $|y(t) - y_n(t)| < \epsilon/3$ e $|y(s) - y_n(s)| < \epsilon/3$, o que implica que

$$|y(t) - y(s)| \leq |y(t) - y_n(t)| + |y_n(t) - y_n(s)| + |y_n(s) - y(s)| < \epsilon.$$

Além disso para $\alpha^* < t < \beta^*$, temos que

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \int_{t_0}^t f(s, y_n(s)) ds = \int_{t_0}^t f(s, \lim_{n \rightarrow \infty} y_n(s)) ds = \int_{t_0}^t f(s, y(s)) ds,$$

pois, por (1.66), temos que

$$\begin{aligned} \left| \int_{t_0}^t f(s, y_n(s)) ds - \int_{t_0}^t f(s, y(s)) ds \right| &\leq \int_{t_0}^t |f(s, y_n(s)) - f(s, y(s))| ds \\ &\leq a \int_{t_0}^t |y_n(s) - y(s)| ds \\ &\leq ab(t - t_0) \sum_{k=n+1}^{\infty} \frac{a^{k-1}(\beta - \alpha)^k}{k!} \end{aligned}$$

que tende a zero quando n tende a infinito. Portanto,

$$\begin{aligned} y(t) &= \lim_{n \rightarrow \infty} y_n(t) = y_0 + \lim_{n \rightarrow \infty} \int_{t_0}^t f(s, y_{n-1}(s)) ds = \\ &= y_0 + \int_{t_0}^t f(s, \lim_{n \rightarrow \infty} y_{n-1}(s)) ds = y_0 + \int_{t_0}^t f(s, y(s)) ds \end{aligned}$$

Derivando em relação a t esta equação vemos que $y(t)$ é solução do problema de valor inicial.

(b) Unicidade:

Vamos supor que $y(t)$ e $z(t)$ sejam soluções do problema de valor inicial. Seja

$$u(t) = \int_{t_0}^t |y(s) - z(s)| ds.$$

Assim, como

$$y(t) = \int_{t_0}^t y'(s) ds = \int_{t_0}^t f(s, y(s)) ds, \quad z(t) = \int_{t_0}^t z'(s) ds = \int_{t_0}^t f(s, z(s)) ds,$$

então, usando o [Exerc. 8.3 na página 163](#), temos que

$$\begin{aligned} u'(t) &= |y(t) - z(t)| \\ &\leq \int_{t_0}^t |y'(s) - z'(s)| ds = \int_{t_0}^t |f(s, y(s)) - f(s, z(s))| ds \\ &\leq a \int_{t_0}^t |y(s) - z(s)| ds \end{aligned}$$

ou seja,

$$u'(t) \leq au(t).$$

Subtraindo-se $au(t)$ e multiplicando-se por e^{-at} obtemos

$$\frac{d}{dt}(e^{-at}u(t)) \leq 0, \quad \text{com } u(t_0) = 0.$$

Isto implica que $e^{-at}u(t) = 0$ (lembre-se que $u(t) \geq 0$) e portanto que $u(t) = 0$, para todo t . Assim, $y(t) = z(t)$, para todo t . ■

Exercícios (respostas na página 268)

8.1. Determine os pontos (t_0, y_0) para os quais podemos garantir que o problema de valor inicial

$$\begin{cases} \frac{dy}{dt} = f(t, y) \\ y(t_0) = y_0 \end{cases}$$

tem uma única solução.

(a) Se $f(t, y) = \sqrt{y^2 - 4}$

(b) Se $f(t, y) = \sqrt{ty}$

(c) Se $f(t, y) = \frac{y^2}{t^2 + y^2}$

(d) Se $f(t, y) = t\sqrt{1 - y^2}$

(e) Se $f(t, y) = \frac{2t - y}{t - 2y}$

(f) Se $f(t, y) = \frac{2ty}{y - t^2}$

8.2. Determine o maior intervalo em que os problemas de valor inicial abaixo têm solução, sem resolvê-los:

(a) $\begin{cases} (t^2 - 1)\frac{dy}{dt} + (t - 2)y = t \\ y(0) = y_0 \end{cases}$

(b) $\begin{cases} (t^2 - 1)\frac{dy}{dt} + ty = t^2 \\ y(2) = y_0 \end{cases}$

(c) $\begin{cases} (t^2 - t)\frac{dy}{dt} + (t + 1)y = e^t \\ y(-1) = y_0 \end{cases}$

(d) $\begin{cases} (t^2 - t)\frac{dy}{dt} + (t + 3)y = \cos t \\ y(2) = y_0 \end{cases}$

8.3. Mostre que se $\frac{\partial f}{\partial y}$ é contínua no retângulo

$$R = \{(t, y) \in \mathbb{R}^2 \mid \alpha < t < \beta, \delta < y < \gamma\},$$

então existe uma constante positiva a tal que

$$|f(t, y) - f(t, z)| \leq a |y - z|, \quad \text{para } \alpha < t < \beta \text{ e } \delta < y, z < \gamma.$$

Sugestão: Para t fixo, use o Teorema do Valor Médio para f como função somente de y . Escolha a como sendo o máximo de $\frac{\partial f}{\partial y}$ no retângulo.

8.4. Mostre que se $f(t, y)$ e $\frac{\partial f}{\partial y}$ são contínuas no retângulo

$$R = \{(t, y) \in \mathbb{R}^2 \mid \alpha < t < \beta, \gamma < y < \delta\}$$

e a e b são constantes positivas tais que

$$|f(t, y)| \leq b, \quad |f(t, y) - f(t, z)| \leq a |y - z|, \quad \text{para } \alpha < t < \beta \text{ e } \delta < y, z < \gamma,$$

então existem α^* e β^* com $\alpha \leq \alpha^* < t_0 < \beta^* \leq \beta$ tais que a sequência

$$y_0(t) = y_0, \quad y_n(t) = y_0 + \int_{t_0}^t f(s, y_{n-1}(s)) ds, \quad \text{para } n = 1, 2, \dots$$

satisfaz $\delta < y_n(t) < \gamma$ sempre que $\alpha^* < t < \beta^*$. Sugestão: mostre que

$$|y_n(t) - y_0| \leq \left(\frac{b}{a} - 1\right) e^{a|t-t_0|}.$$

1.9 Respostas dos Exercícios

1. Introdução às Equações Diferenciais (página 14)

1.1. (a) Equação diferencial ordinária de 1ª ordem não linear.

(b) Equação diferencial ordinária de 2ª ordem linear.

1.2. $(x+3)y_1'' + (x+2)y_1' - y_1 = (x+3)2 + (x+2)2x - x^2 = x^2 + 6x + 6 \neq 0$

$$(x+3)y_2'' + (x+2)y_2' - y_2 = (x+3)6x + (x+2)3x^2 - x^3 = 2x^3 + 12x^2 + 18x \neq 0$$

$$(x+3)y_3'' + (x+2)y_3' - y_3 = (x+3)e^{-x} - (x+2)e^{-x} - e^{-x} = 0$$

Logo, $y_1(x) = x^2$ e $y_2(x) = x^3$ não são soluções da equação e $y_3(x) = e^{-x}$ é solução da equação.

1.3. (a) Substituindo-se $y = e^{rt}$ e $\frac{dy}{dt} = re^{rt}$ na equação diferencial obtemos

$$are^{rt} + be^{rt} = (ar + b)e^{rt} = 0.$$

Como $e^{rt} \neq 0$, então $y(t) = e^{rt}$ é solução da equação diferencial se, e somente se, r é solução da equação

$$ar + b = 0$$

(b) Substituindo-se $y = e^{rt}$, $\frac{dy}{dt} = re^{rt}$ e $\frac{d^2y}{dt^2} = r^2e^{rt}$ na equação diferencial obtemos

$$ar^2e^{rt} + bre^{rt} + ce^{rt} = (ar^2 + br + c)e^{rt} = 0.$$

Como $e^{rt} \neq 0$, então $y(t) = e^{rt}$ é solução da equação diferencial se, e somente se, r é solução da equação

$$ar^2 + br + c = 0$$

(c) Substituindo-se $y = x^r$, $\frac{dy}{dx} = rx^{r-1}$ e $\frac{d^2y}{dx^2} = r(r-1)x^{r-2}$ na equação diferencial obtemos

$$x^2r(r-1)x^{r-2} + bxx^{r-1} + cx^r = 0.$$

$$(r^2 + (b-1)r + c)x^r = 0.$$

Como $x^r \neq 0$, então $y = x^r$ é solução da equação diferencial se, e somente se, r é solução da equação

$$r^2 + (b-1)r + c = 0.$$

1.4. (a)

$$\begin{aligned} 0 = y' + ty^2 &= \frac{-2tr}{(t^2-3)^2} + \frac{tr^2}{(t^2-3)^2} = \frac{(-2r+r^2)t}{(t-3)^2} \quad \forall t \\ &\Rightarrow r^2 - 2r = 0 \\ &\Rightarrow r = 0 \quad \text{ou} \quad r = 2 \end{aligned}$$

(b)

$$\begin{aligned} 0 = y' - 2ty^2 &= \frac{-2rt}{(t^2+1)^2} - \frac{2tr^2}{(t^2+1)^2} = \frac{(-2r-2r^2)t}{(t^2+1)^2} \quad \forall t \\ &\Rightarrow r^2 + r = 0 \\ &\Rightarrow r = 0 \quad \text{ou} \quad r = -1 \end{aligned}$$

(c)

$$\begin{aligned} 0 = y' - 6ty^2 &= \frac{-2rt}{(t^2+1)^2} - \frac{6tr^2}{(t^2+1)^2} = \frac{(-2r-6r^2)t}{(t^2+1)^2} \quad \forall t \\ &\Rightarrow 3r^2 + r = 0 \\ &\Rightarrow r = 0 \quad \text{ou} \quad r = -1/3 \end{aligned}$$

(d)

$$\begin{aligned} 0 = y' - ty^2 &= \frac{-2rt}{(t^2+2)^2} - \frac{tr^2}{(t^2+2)^2} = \frac{(-2r-r^2)t}{(t^2+2)^2}, \quad \forall t \\ &\Rightarrow r^2 + 2r = 0 \\ &\Rightarrow r = 0 \quad \text{ou} \quad r = -2 \end{aligned}$$

1.5. $y(t) = at + b \Rightarrow y'(t) = a$ e $y''(t) = 0$.

Substituindo-se $y(t) = at + b$, $y'(t) = a$ e $y''(t) = 0$ na equação diferencial $ty'' + (t-1)y' - y = 0$ obtemos

$$t \cdot 0 + (t-1)a - (at+b) = 0.$$

Simplificando-se obtemos:

$$-a - b = 0 \text{ ou } a = -b.$$

Logo, para que $y(t) = at + b$ seja solução da equação diferencial temos que ter $a = -b$, ou seja,

$$y(t) = at - a = a(t-1).$$

Observe que todas as soluções da equação diferencial que são funções de 1º grau são múltiplos escalares da função

$$y_1(t) = t - 1.$$

2. Equações Lineares de 1ª Ordem (página 26)

2.1. (a)

$$\mu(x) = e^{\int (1-2x)dx} = e^{x-x^2}$$

Multiplicando a equação por $\mu(x) = e^{x-x^2}$:

$$\frac{d}{dx} (e^{x-x^2} y) = e^{x-x^2} x e^{-x} = x e^{-x^2}$$

$$e^{x-x^2} y(x) = \int x e^{-x^2} dx = -\frac{1}{2} e^{-x^2} + C$$

$$y(x) = -\frac{1}{2} e^{-x} + C e^{x^2-x}$$

$$2 = y(0) = -\frac{1}{2} + C \Rightarrow C = 5/2$$

$$y(x) = -\frac{1}{2}e^{-x} + \frac{5}{2}e^{x^2-x}$$

(b)

$$\mu(t) = e^{\int 3t^2 dt} = e^{t^3}$$

Multiplicando a equação por $\mu(t) = e^{t^3}$:

$$\frac{d}{dt} (e^{t^3} y) = e^{t^3} e^{-t^3+t} = e^t$$

$$e^{t^3} y(t) = \int e^t dt = e^t + C$$

$$y(t) = e^{t-t^3} + Ce^{-t^3}$$

$$2 = y(0) = 1 + C \Rightarrow C = 1$$

$$y(t) = e^{t-t^3} + e^{-t^3}$$

(c)

$$\mu(t) = e^{\int -\cos t dt} = e^{-\sin t}$$

$$\frac{d}{dt} (e^{-\sin t} y) = e^{-\sin t} t e^{t^2+\sin t} = t e^{t^2}$$

$$e^{-\sin t} y(t) = \int t e^{t^2} dt = \frac{1}{2} e^{t^2} + C$$

$$y(t) = \frac{1}{2}e^{t^2 + \sin t} + Ce^{\sin t}$$

$$2 = y(0) = \frac{1}{2} + C \Rightarrow C = 3/2$$

$$y(t) = \frac{1}{2}e^{t^2 + \sin t} + \frac{3}{2}e^{\sin t}$$

(d)

$$\mu(x) = e^{\int x^4 dx} = e^{\frac{x^5}{5}}$$

Multiplicando a equação por $\mu(x) = e^{\frac{x^5}{5}}$:

$$\frac{d}{dx} \left(e^{\frac{x^5}{5}} y \right) = e^{\frac{x^5}{5}} x^4 e^{\frac{4x^5}{5}} = x^4 e^{x^5}$$

$$e^{\frac{x^5}{5}} y(x) = \int x^4 e^{x^5} dx = \frac{1}{5} e^{x^5}$$

$$y(x) = \frac{1}{5} e^{\frac{4x^5}{5}} + C e^{-\frac{x^5}{5}}$$

$$1 = y(0) = \frac{1}{5} + C \Rightarrow C = 4/5$$

$$y(x) = \frac{1}{5} e^{\frac{4x^5}{5}} + \frac{4}{5} e^{-\frac{x^5}{5}}$$

2.2. (a)

$$y' - \frac{4}{x}y = -\frac{2}{x^3}$$

$$\mu(x) = e^{\int -\frac{4}{x}dx} = x^{-4}$$

Multiplicando a equação por $\mu(x) = x^{-4}$:

$$\frac{d}{dx} (x^{-4}y) = -\frac{2}{x^7}$$

Integrando-se

$$x^{-4}y(x) = \int -\frac{2}{x^7}dx = \frac{1}{3x^6} + C$$

$$y(x) = \frac{1}{3x^2} + Cx^4$$

(b)

$$y' - \frac{1}{x}y = -x$$

$$\mu(x) = e^{\int -\frac{1}{x}dx} = x^{-1}, \text{ para } x > 0$$

Multiplicando a equação por $\mu(x) = x^{-1}$:

$$\frac{d}{dx} (x^{-1}y) = -1$$

Integrando-se

$$x^{-1}y(x) = -\int dx = -x + C$$

$$y(x) = -x^2 + Cx$$

(c)

$$y' - \frac{4}{x}y = x^5 e^x$$

$$\mu(x) = e^{\int -\frac{4}{x} dx} = x^{-4}$$

Multiplicando a equação por $\mu(x) = x^{-4}$:

$$\frac{d}{dx} (x^{-4}y) = x e^x$$

Integrando-se

$$x^{-4}y(x) = \int x e^x dx = x e^x - e^x + C$$

$$y(x) = x^5 e^x - x^4 e^x + C x^4$$

2.3. (a)

$$\mu(x) = e^{\int 5x^4 dx} = e^{x^5}$$

Multiplicando a equação por $\mu(x) = e^{x^5}$:

$$\frac{d}{dx} (e^{x^5} y) = e^{x^5} x^4 = x^4 e^{x^5}$$

$$e^{x^5} y(x) = \int x^4 e^{x^5} dx = \frac{1}{5} e^{x^5} + C$$

$$y(x) = \frac{1}{5} + C e^{-x^5}$$

$$y_0 = y(0) = \frac{1}{5} + C \Rightarrow C = y_0 - 1/5$$

$$y(x) = \frac{1}{5} + \left(y_0 - \frac{1}{5}\right) e^{-x^5}$$

(b) $y'(x) = -5x^4 \left(y_0 - \frac{1}{5}\right) e^{-x^5}$. Para $y_0 > 1/5$ a solução é decrescente e para $y_0 < 1/5$ a solução é crescente.

(c) $\lim_{x \rightarrow +\infty} y(x) = 1/5$ e claramente independe do valor de y_0 .

2.4. (a)

$$y' + \frac{x}{x^2 - 9} y = 0$$

$$\mu(x) = e^{\int \frac{x}{x^2 - 9} dx} = e^{\frac{1}{2} \ln |x^2 - 9|} = \sqrt{x^2 - 9}$$

Multiplicando a equação por $\mu(x) = \sqrt{x^2 - 9}$:

$$\frac{d}{dx} (\sqrt{x^2 - 9} y) = 0$$

$$\sqrt{x^2 - 9} y(x) = C$$

$$y(x) = \frac{C}{\sqrt{x^2 - 9}}$$

$$y_0 = y(5) = \frac{C}{4} \Rightarrow C = 4y_0$$

$$y(x) = \frac{4y_0}{\sqrt{x^2 - 9}}$$

(b) A condição inicial é $y(5) = y_0$. O intervalo de validade da solução do PVI é o maior intervalo que contém o ponto inicial, $x_0 = 5$, em que a solução e sua derivada estão definidas. Se $y_0 = 0$ a solução do PVI é $y(t) = 0$, que portanto está definida para todo $x \in \mathbb{R}$. Se $y_0 \neq 0$, a solução do PVI é

$$y(x) = \frac{4y_0}{\sqrt{x^2 - 9}}$$

e o intervalo de validade é $x > 3$. Observe que, neste caso, o intervalo $x < 3$ não contém o ponto inicial, $x_0 = 5$.

(c) $\lim_{x \rightarrow +\infty} y(x) = 0$ e claramente independe do valor de y_0 .

2.5. (a) $\frac{dy}{dt} + p(t)y = \frac{d}{dt}(y_1(t) + y_2(t)) + p(t)(y_1(t) + y_2(t)) = \left(\frac{dy_1}{dt} + p(t)y_1\right) + \left(\frac{dy_2}{dt} + p(t)y_2\right) = 0 + 0 = 0$, pois como y_1 e y_2 são soluções da equação diferencial, então $\frac{dy_1}{dt} + p(t)y_1 = 0$ e $\frac{dy_2}{dt} + p(t)y_2 = 0$.

(b) $\frac{dy}{dt} + p(t)y = \frac{d}{dt}(cy_1(t)) + p(t)(cy_1(t)) = c\left(\frac{dy_1}{dt} + p(t)y_1\right) = c \cdot 0 = 0$, pois como y_1 é solução da equação diferencial, então $\frac{dy_1}{dt} + p(t)y_1 = 0$ e $\frac{dy_2}{dt} + p(t)y_2 = 0$.

2.6. $\frac{dy}{dt} + p(t)y = \frac{d}{dt}(cy_1(t) + y_2(t)) + p(t)(cy_1(t) + y_2(t)) = c\left(\frac{dy_1}{dt} + p(t)y_1\right) + \left(\frac{dy_2}{dt} + p(t)y_2\right) = c \cdot 0 + q(t) = q(t)$, pois como y_1 é solução da primeira equação diferencial e y_2 é solução da segunda equação diferencial, então $\frac{dy_1}{dt} + p(t)y_1 = 0$ e $\frac{dy_2}{dt} + p(t)y_2 = q(t)$.

2.7. (a) Multiplicando-se a equação diferencial por $1/t$ obtemos a equação

$$\frac{dy}{dt} + \frac{2}{t}y = t.$$

O fator integrante é

$$\mu(t) = e^{\int \frac{2}{t} dt} = e^{2 \ln |t|} = e^{\ln t^2} = t^2.$$

Multiplicando-se a equação diferencial acima por $\mu(t)$ obtemos:

$$t^2 \frac{dy}{dt} + 2ty = t^3.$$

O lado esquerdo é igual à derivada do produto $t^2 y(t)$. Logo, a equação acima é equivalente a

$$\frac{d}{dt} (t^2 y(t)) = t^3.$$

Integrando-se obtemos

$$t^2 y(t) = \frac{t^4}{4} + c$$

Explicitando $y(t)$ temos que a solução geral da equação diferencial é

$$y(t) = \frac{t^2}{4} + \frac{c}{t^2}. \quad (1.67)$$

Para $c = 0$ a solução é a parábola

$$y_0(t) = \frac{t^2}{4}.$$

Para $c \neq 0$, temos que o domínio de $y(t)$ é o conjunto dos números reais tais que $t \neq 0$. Vamos analisar o comportamento das soluções para valores muito grandes de t .

$$\lim_{t \rightarrow \pm\infty} y(t) = +\infty, \quad \text{se } c \neq 0.$$

Observamos da expressão da solução geral que para valores de $|t|$ muito grandes as soluções com $c \neq 0$ são próximas da solução com $c = 0$ que é $y_0(t) = t^2/4$. Sendo que se $c > 0$, elas estão acima de $y_0(t)$ e se $c < 0$ elas estão abaixo de $y_0(t)$.

Vamos analisar o comportamento das soluções nas proximidades do ponto de descontinuidade $t = 0$.

$$\lim_{t \rightarrow 0} y(t) = +\infty, \quad \text{se } c > 0$$

e

$$\lim_{t \rightarrow 0} y(t) = -\infty, \quad \text{se } c < 0.$$

Vamos analisar o crescimento e decrescimento das soluções. A derivada da solução fornece informação sobre o crescimento e decrescimento da solução e sobre seus pontos críticos:

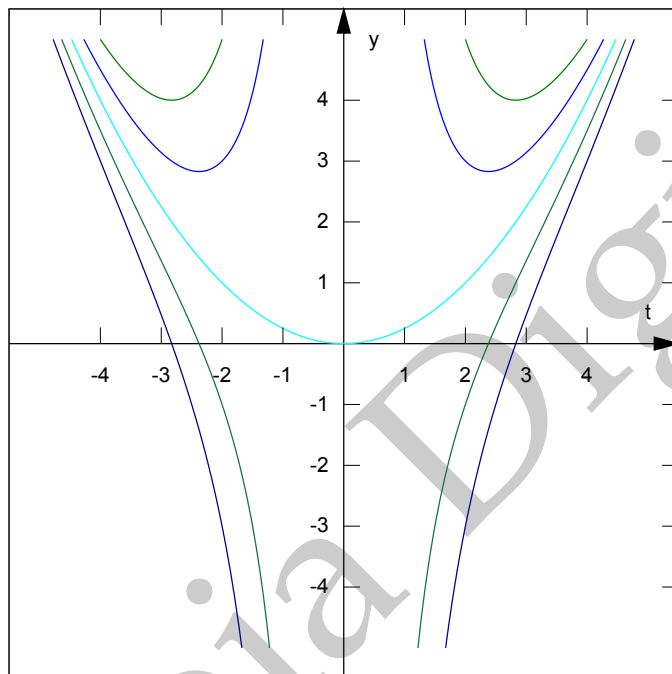
$$\frac{dy}{dt} = \frac{t}{2} - \frac{2c}{t^3} = 0$$

se, e somente se,

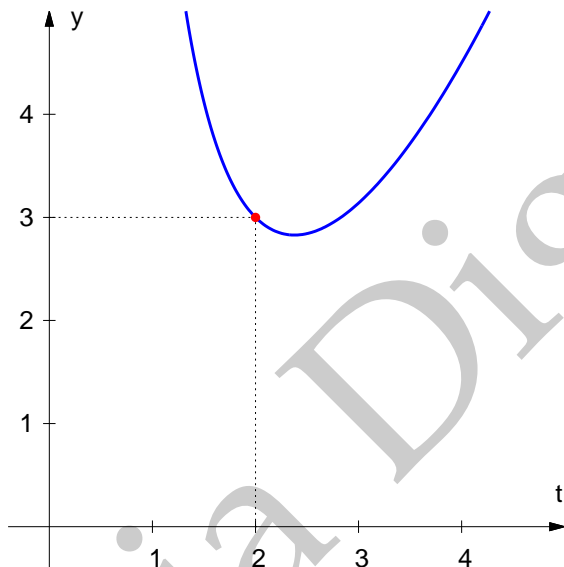
$$t^4 = 4c.$$

Assim, se $c > 0$ as soluções têm somente pontos críticos em $t = \pm \sqrt[4]{4c}$, e se $c < 0$ elas não têm ponto crítico. Baseado neste fato, no comportamento das soluções quando $t \rightarrow \pm\infty$ e quando $t \rightarrow 0$ concluímos que as soluções com $c > 0$ decrescem no intervalo $(-\infty, -\sqrt[4]{4c})$, crescem no intervalo $(-\sqrt[4]{4c}, 0)$, decrescem no intervalo $(0, \sqrt[4]{4c})$ e crescem no intervalo $(\sqrt[4]{4c}, +\infty)$. Enquanto as soluções com $c < 0$ decrescem no intervalo $(-\infty, 0)$ e crescem no intervalo $(0, +\infty)$.

Observamos que para cada valor de $c \neq 0$ temos duas soluções com intervalos de validade $(-\infty, 0)$ e $(0, +\infty)$ e para $c = 0$ a solução $y_0(t) = t^2/4$ é válida no intervalo $(-\infty, +\infty) = \mathbb{R}$.



(b)



Substituindo-se $t = 2$ e $y = 3$ em (1.67) obtemos

$$3 = \frac{4}{4} + \frac{c}{4}.$$

De onde obtemos que $c = 8$. Portanto, a solução do problema de valor inicial é

$$y(t) = \frac{t^2}{4} + \frac{8}{t^2}.$$

Observe que a solução deste problema de valor inicial é válida no intervalo $(0, +\infty)$, que é o maior intervalo contendo $t = 2$ (pois a condição inicial é $y(2) = 3$) em que a solução e sua derivada estão

definidas. Se a condição inicial ao invés de $y(2) = 3$ fosse $y(-2) = 3$ a solução teria a mesma expressão, mas o seu intervalo de validade seria $(-\infty, 0)$.

- 2.8. Vamos inicialmente resolver o PVI no intervalo $0 \leq x < 1$. Dividindo-se a equação $(1 + x^2)y' + 2xy = x$ por $1 + x^2$ obtemos

$$y' + \frac{2x}{1+x^2}y' = \frac{x}{1+x^2}.$$

Multiplicando-se pelo fator integrante $\mu(x) = 1 + x^2$ obtemos

$$(1 + x^2)y' + 2xy = x.$$

$$\frac{d}{dx}((1 + x^2)y) = x.$$

Integrando-se em relação a x :

$$(1 + x^2)y(x) = \frac{x^2}{2} + c.$$

Substituindo-se $x = 0$ e $y = 0$ obtemos $c = 0$. Assim, a solução do PVI no intervalo $0 \leq x < 1$ é dada por

$$y(x) = \frac{x^2}{2(1 + x^2)}.$$

$$\lim_{x \rightarrow 1^-} y(x) = \frac{1}{4}.$$

Agora, vamos resolver o PVI no intervalo $x \geq 1$ com a condição inicial $y(1) = \frac{1}{4}$.

Dividindo-se a equação $(1 + x^2)y' + 2xy = -x$ por $1 + x^2$ obtemos

$$y' + \frac{2x}{1+x^2}y' = -\frac{x}{1+x^2}.$$

Multiplicando-se a equação pelo fator integrante $\mu(x) = 1 + x^2$ obtemos

$$(1 + x^2)y' + 2xy = -x.$$

$$\frac{d}{dx}((1+x^2)y) = -x.$$

Integrando-se em relação a x :

$$(1+x^2)y(x) = -\frac{x^2}{2} + c.$$

Substituindo-se $x = 1$ e $y = 1/4$ obtemos $c = 1$. Assim, a solução do PVI no intervalo $x \geq 1$ é dada por

$$y(x) = \frac{-x^2 + 2}{2(1+x^2)}.$$

2.9. Multiplicando-se a equação diferencial pelo fator integrante $\mu(t) = e^t$ obtemos

$$\frac{d}{dt}(e^t y) = e^t(1-t).$$

Integrando-se em relação a t :

$$e^t y(t) = \int e^t dt - \int t e^t dt + c = e^t - t e^t + e^t + c = 2e^t - t e^t + c.$$

Logo, a solução geral da equação diferencial é

$$y(t) = 2 - t + c e^{-t}.$$

Como $y_0 = y(0) = 2 + c$, então $c = y_0 - 2$. Assim, a solução do PVI é

$$y(t) = 2 - t + (y_0 - 2)e^{-t}.$$

Substituindo-se $y = y' = 0$ na equação diferencial, temos que se a solução tem um máximo no eixo t , então $t = 1$. Substituindo-se $t = 1$ e $y = 0$ na solução do PVI, obtemos

$$0 = 1 + (y_0 - 2)e^{-1} \quad \text{ou} \quad y_0 = 2 - e.$$

3. Equações Separáveis (página 37)

3.1. (a)

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

$$\frac{1}{y}y' = \frac{x}{1 + x^2}$$

Integrando-se em relação a x :

$$\ln |y| = \frac{1}{2} \ln(1 + x^2) + C_1$$

$$\ln \left(\frac{|y|}{(1 + x^2)^{1/2}} \right) = C_1$$

$$\frac{y}{(1 + x^2)^{1/2}} = \pm e^{C_1} = \pm C_2 = C$$

$$y(x) = C(1 + x^2)^{1/2}$$

(b)

$$y^2 - 1 - (2y + xy)y' = 0$$

$$\frac{y}{y^2 - 1}y' = \frac{1}{2 + x}$$

Integrando-se em relação a x :

$$\frac{1}{2} \ln |y^2 - 1| = \ln |2 + x| + C_1$$

$$\ln \left(\frac{|y^2 - 1|^{1/2}}{|2 + x|} \right) = C_1$$

$$\frac{|y^2 - 1|^{1/2}}{2 + x} = \pm e^{C_1} = \pm C_2 = C$$

A solução é dada implicitamente por

$$\sqrt{y^2 - 1} = C(2 + x)$$

(c)

$$yy' = \frac{x}{ax^2 + b}$$

Integrando-se em relação a x obtemos que a solução é dada implicitamente por

$$\frac{1}{2}y^2 = \frac{1}{2a} \ln |ax^2 + b| + C$$

(d)

$$y^{-3}y' = \frac{x}{(ax^2 + b)^{1/2}}$$

Integrando-se em relação a x obtemos que a solução é dada implicitamente por

$$-\frac{1}{2}y^{-2} = \frac{1}{a}(ax^2 + b)^{1/2} + C$$

(e)

$$\frac{y}{\sqrt{ay^2 + b}}y' - \frac{1}{x} = 0$$

Integrando-se em relação a x obtemos que a solução é dada implicitamente por

$$\frac{1}{a}\sqrt{ay^2 + b} = \ln |x| + C$$

(f)

$$\frac{y}{ay^2 + b}y' - \frac{1}{x^2} = 0$$

Integrando-se em relação a x obtemos que a solução é dada implicitamente por

$$\frac{1}{2a} \ln |ay^2 + b| = -x^{-1} + C$$

3.2. (a) Podemos reescrever a equação como

$$(3y^2 - 3)y' = 2x + 1.$$

Integrando-se em relação a x e substituindo-se $y'dx = dy$ obtemos

$$\int (3y^2 - 3)dy = \int (2x + 1)dx + C.$$

Assim, a solução geral é dada implicitamente por

$$y^3 - 3y - x^2 - x = C$$

Para encontrar a solução que satisfaz a condição inicial $y(0) = 0$ substituímos $x = 0$ e $y = 0$ na solução geral obtendo $C = 0$. Assim, a solução do problema de valor inicial é dada implicitamente por

$$y^3 - 3y - x^2 - x = 0.$$

(b) Para determinar o intervalo de validade da solução do PVI vamos determinar o maior intervalo que contém $x_0 = 0$ em que a solução e sua derivada estão definidas. Pela equação $\frac{dy}{dx} = \frac{2x + 1}{3y^2 - 3}$, temos

que os pontos onde a derivada não está definida são aqueles tais que $3y^2 - 3 = 0$, ou seja, $y = \pm 1$. Como o ponto inicial é $(0, 0)$, então a solução do PVI está contida na região do plano $-1 < y < 1$. Substituindo-se $y = -1$ na equação que define a solução obtemos a equação $x^2 + x - 2 = 0$, que tem solução $x = -2$ e $x = 1$. Substituindo-se $y = 1$ na equação que define a solução $y^3 - 3y - x^2 + x = 0$ obtemos a equação $x^2 + x + 2 = 0$, que não tem solução real.

Como a derivada não está definida para $x = -2$ e $x = 1$ e o ponto inicial $x_0 = 0$ está entre estes valores, concluímos que o intervalo de validade da solução é o intervalo $(-2, 1)$, que é o maior intervalo em que a solução $y(x)$ e a sua derivada estão definidas.

(c) Nos pontos onde a solução tem máximo local a reta tangente à curva é horizontal, ou seja, pontos onde $\frac{dy}{dx} = 0$. Neste caso não precisamos calcular a derivada da solução, pois a derivada já está dada pela equação diferencial, ou seja,

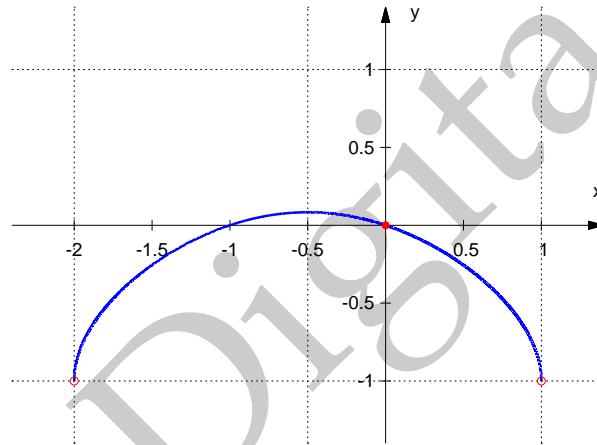
$$\frac{dy}{dx} = \frac{2x + 1}{3y^2 - 3}$$

Assim, a reta tangente é horizontal para x tal que $2x + 1 = 0$, ou seja, somente para $x = -1/2$ que é ponto de máximo local, pois como a solução está limitada à região $-1 < y < 1$, então da equação diferencial vemos que $\frac{dy}{dx} > 0$, para $x < -1/2$ e $\frac{dy}{dx} < 0$, para $x > -1/2$.

- (d) A reta tangente à curva integral é vertical ($\frac{dx}{dy} = 0$) para $x = -2$ e $x = 1$, pois pela equação diferencial, $\frac{dy}{dx} = \frac{2x+1}{3y^2-3}$, então

$$\frac{dx}{dy} = \frac{1}{\frac{dy}{dx}} = \frac{3y^2 - 3}{2x + 1},$$

para $x \neq -1/2$. Assim, já sabemos que a solução está contida em uma curva que passa pelos pontos $(-2, -1)$ e $(1, -1)$, onde a tangente é vertical, que passa pelo ponto inicial $(0, 0)$. Neste ponto a inclinação da reta tangente é $-1/3$, pois substituindo-se $x = 0$ e $y = 0$ na equação diferencial obtemos $\frac{dy}{dx} = -1/3$. Além disso sabemos que o único ponto em que a tangente é horizontal ocorre para $x = -1/2$ e como a solução está limitada à região $-1 < y < 1$, então da equação diferencial vemos que $\frac{dy}{dx} > 0$, para $x < -1/2$ e $\frac{dy}{dx} < 0$, para $x > -1/2$. Deduzimos daí que a solução é crescente até $x = -1/2$ depois começa a decrescer.



- 3.3. (a) A equação é equivalente a $\frac{1}{b-ay}y' = 1$
 (b) A equação é equivalente a $\frac{1}{1-y}y' = q(t)$
 (c) A equação é equivalente a $\frac{1}{y}y' = -p(t)$

3.4. Multiplicando-se a equação diferencial por $\frac{1}{y(100-y)}$ obtemos

$$\frac{1}{y(100-y)}y' = 1 \quad (1.68)$$

Vamos decompor $\frac{1}{y(100-y)}$ em frações parciais:

$$\frac{1}{y(100-y)} = \frac{A}{y} + \frac{B}{100-y}$$

Multiplicando-se a equação acima por $y(100 - y)$ obtemos

$$1 = A(100 - y) + By$$

Substituindo-se $y = 0$ e $y = 100$ obtemos $A = 1/100$ e $B = 1/100$. Assim,

$$\begin{aligned}\int \frac{1}{y(100 - y)} dy &= \frac{1}{100} \left(\int \frac{1}{y} dy + \int \frac{1}{100 - y} dy \right) \\ &= \frac{1}{100} (\ln |y| - \ln |100 - y|)\end{aligned}$$

Logo, a equação (1.68) tem solução

$$\ln |y| - \ln |100 - y| = 100t + C_1.$$

Usando propriedades do logaritmo podemos reescrever como

$$\ln \left| \frac{y}{100 - y} \right| = C_1 + 100t.$$

Aplicando a exponencial a ambos os membros obtemos

$$\frac{y}{100 - y} = \pm e^{C_1} e^{100t} = C e^{100t}$$

Substituindo-se $t = 0$ e $y = 1$ na equação acima obtemos

$$C = \frac{1}{100 - 1} = \frac{1}{99}.$$

Vamos explicitar $y(t)$.

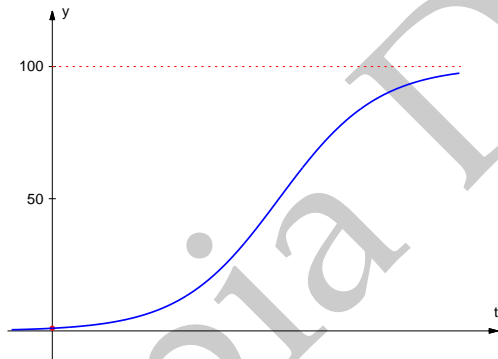
$$y = (100 - y)Ce^{100kt} \Rightarrow y + Ce^{100t}y = 100Ce^{100t}$$

Portanto, a solução do problema de valor inicial é

$$y(t) = \frac{C100e^{100t}}{1 + Ce^{100t}} = \frac{\frac{100}{99}e^{100t}}{1 + \frac{1}{99}e^{100t}} = \frac{100e^{100t}}{99 + e^{100t}} = \frac{100}{99e^{-100t} + 1}$$

Usando a equação diferencial vemos que a taxa de crescimento da população (dada por y') é positiva e crescente para $0 < y < 50$ e positiva e decrescente para $50 < y < 100$.

Além disso, $\lim_{t \rightarrow \infty} y(t) = 100$.



3.5. (a) Podemos reescrever a equação como

$$2 \cos(4y)y' = 3 \sin(3x).$$

Integrando-se em relação a x e substituindo-se $y'dx = dy$ obtemos

$$\int 2 \cos(4y)dy = \int 3 \sin(3x)dx + c.$$

Assim, a solução geral é dada implicitamente por

$$\frac{\operatorname{sen}(4y)}{2} = -\cos(3x) + c$$

Para encontrar a solução que satisfaz a condição inicial $y(-\frac{\pi}{3}) = \frac{\pi}{4}$ substituímos $x = -\frac{\pi}{3}$ e $y = \frac{\pi}{4}$ na solução geral obtendo $c = -1$. Assim, a solução do problema de valor inicial é dada implicitamente por

$$\frac{\operatorname{sen}(4y)}{2} = -\cos(3x) - 1$$

- (b) Para determinar o intervalo de validade da solução do PVI vamos determinar o maior intervalo que contém $x_0 = -\frac{\pi}{3}$ em que a solução e sua derivada estão definidas. Pela equação $\frac{dy}{dx} = \frac{3 \operatorname{sen}(3x)}{2 \cos(4y)}$, temos que os pontos onde a derivada não está definida são aqueles tais que $\cos(4y) = 0$, ou seja, $4y = \frac{\pi}{2} \pm k\pi$. Como o ponto inicial é $(x_0, y_0) = (-\frac{\pi}{3}, \frac{\pi}{4})$, ou seja, $4y_0 = \pi$, então a solução do PVI está contida na região do plano $\frac{\pi}{2} < 4y < \frac{3\pi}{2}$ ou $\frac{\pi}{8} < y < \frac{3\pi}{8}$. Substituindo-se $y = \frac{\pi}{8}$ na equação que define a solução, $\frac{\operatorname{sen}(4y)}{2} = -\cos(3x) - 1$, obtemos a equação $\frac{1}{2} = -\cos(3x) - 1$, que não tem solução. Substituindo-se $y = \frac{3\pi}{8}$ na equação que define a solução, $\frac{\operatorname{sen}(4y)}{2} = -\cos(3x) - 1$, obtemos a equação $-\frac{1}{2} = -\cos(3x) - 1$, ou $\cos(3x) = -\frac{1}{2}$ que tem solução $3x = \pm \frac{2\pi}{3} + 2k\pi$. Como $3x_0 = -\pi$, então os pontos mais próximos de x_0 onde a derivada não está definida são $x = -\frac{2\pi}{9}$ e $x = -\frac{4\pi}{9}$.

Como a solução está definida para todo x , mas a derivada não está definida para $x = -\frac{2\pi}{9}$ e $x = -\frac{4\pi}{9}$ e o ponto inicial $x_0 = -\frac{\pi}{3}$ está entre os valores $x = -\frac{2\pi}{9}$ e $x = -\frac{4\pi}{9}$, concluímos que

o intervalo de validade da solução é o intervalo $(-\frac{4\pi}{9}, -\frac{2\pi}{9})$, que é o maior intervalo em que a solução $y(x)$ e a sua derivada estão definidas.

4. Equações Exatas (página 50)

4.1. (a)

$$M = 2xy - \sin x \quad N = x^2 + e^y.$$

$$\frac{\partial M}{\partial y} = 2x \quad \frac{\partial N}{\partial x} = 2x$$

$$\frac{\partial M}{\partial y} = \frac{\partial N}{\partial x}, \quad \forall (x, y) \in \mathbb{R}^2 \quad \Rightarrow \quad \text{A equação é exata!}$$

$$\psi(x, y) = \int M dx = x^2 y + \cos x + h(y)$$

$$N = x^2 + e^y = x^2 + h'(y)$$

$$h'(y) = e^y$$

$$h(y) = e^y$$

$$\psi(x, y) = x^2 y + \cos x + e^y = C$$

(b)

$$M = y^2 + \cos x \quad N = 2xy + e^y$$

$$\frac{\partial M}{\partial y} = 2y \quad \frac{\partial N}{\partial x} = 2y$$

$$\frac{\partial M}{\partial y} = \frac{\partial N}{\partial x}, \quad \forall (x, y) \in \mathbb{R}^2 \Rightarrow \text{A equação é exata!}$$

$$\psi(x, y) = \int M dx = xy^2 + \operatorname{sen} x + h(y)$$

$$N = 2xy + e^y = 2xy + h'(y)$$

$$h'(y) = e^y$$

$$h(y) = e^y$$

$$\psi(x, y) = xy^2 + \operatorname{sen} x + e^y = C$$

(c)

$$M = 2xy^2 + \cos x \quad N = 2x^2y + \frac{1}{y}$$

$$\frac{\partial M}{\partial y} = 4xy \quad \frac{\partial N}{\partial x} = 4xy$$

$$\frac{\partial M}{\partial y} = \frac{\partial N}{\partial x}, \quad \forall (x, y) \in \mathbb{R}^2 \Rightarrow \text{A equação é exata!}$$

$$\psi(x, y) = \int M dx = x^2y^2 + \operatorname{sen} x + h(y)$$

$$N = 2x^2y + \frac{1}{y} = 2x^2y + h'(y)$$

$$h(y) = \ln |y|$$

Portanto, a solução da equação diferencial é dada implicitamente por

$$\psi(x, y) = x^2y^2 + \ln |y| = C$$

(d)

$$M = 2 \left(xy^2 - \frac{1}{x^3} \right) \quad N = 2x^2y - \frac{1}{y^2}$$

$$\frac{\partial M}{\partial y} = 4xy \quad \frac{\partial N}{\partial x} = 4xy.$$

$$\frac{\partial M}{\partial y} = \frac{\partial N}{\partial x}, \quad \forall (x, y) \in \mathbb{R}^2 \quad \Rightarrow \quad \text{A equação é exata!}$$

$$\psi(x, y) = \int M dx = x^2y^2 + \frac{1}{x^2} + h(y)$$

$$N = 2x^2y - \frac{1}{y^2} = 2x^2y + h'(y)$$

$$h'(y) = -\frac{1}{y^2}$$

$$h(y) = \frac{1}{y}$$

Portanto, a solução da equação diferencial é dada implicitamente por

$$\psi(x, y) = x^2 y^2 + \frac{1}{x^2} + \frac{1}{y} = C$$

(e) Multiplicando a equação

$$x + y + x \ln x \frac{dy}{dx} = 0$$

por $1/x$ obtemos

$$1 + \frac{y}{x} + \ln x \frac{dy}{dx} = 0$$

$$M = 1 + \frac{y}{x} \quad N = \ln x$$

$$\frac{\partial M}{\partial y} = \frac{1}{x} \quad \frac{\partial N}{\partial x} = \frac{1}{x}$$

$$\frac{\partial M}{\partial y} = \frac{\partial N}{\partial x}, \quad \forall (x, y) \in \mathbb{R}^2, x \neq 0.$$

Logo, a equação é exata nos semiplanos $x > 0$ e $x < 0$.

Vamos encontrar uma função $\psi(x, y)$ tal que

$$\frac{\partial \psi}{\partial x} = M(x, y) = 1 + \frac{y}{x} \quad \text{e} \quad \frac{\partial \psi}{\partial y} = N(x, y) = \ln x$$

Integrando-se a 1ª equação em relação a x obtemos

$$\psi(x, y) = \int M dx = x + y \ln x + h(y)$$

Substituindo-se a função $\psi(x, y)$ encontrada na equação de $\frac{\partial \psi}{\partial y} = N = \ln x$ obtemos

$$N = \ln x = \ln x + h'(y)$$

$$h'(y) = 0$$

O que implica que

$$h(y) = C_1$$

Assim, a solução da equação é dada implicitamente por

$$\psi(x, y) = x + y \ln x = C$$

(f)

$$M = 2 \left(xy^3 - \frac{1}{x^3} \right) \quad N = 3x^2y^2 - \frac{1}{y^2}$$

$$\frac{\partial M}{\partial y} = 6xy^2 \quad \frac{\partial N}{\partial x} = 6xy^2$$

$$\frac{\partial M}{\partial y} = \frac{\partial N}{\partial x}, \quad \forall (x, y) \in \mathbb{R}^2 \quad \Rightarrow \quad \text{A equação é exata!}$$

$$\psi(x, y) = \int M dx = x^2y^3 + \frac{1}{x^2} + h(y)$$

$$N = 3x^2y^2 - \frac{1}{y^2} = 3x^2y^2 + h'(y)$$

$$h'(y) = -\frac{1}{y^2}$$

$$h(y) = \frac{1}{y}$$

Portanto, a solução da equação diferencial é dada implicitamente por

$$\psi(x, y) = x^2y^3 + \frac{1}{x^2} + \frac{1}{y} = C$$

(g)

$$M = xy^4 \quad N = 2x^2y^3 + 3y^5 - 20y^3$$

$$\frac{\partial M}{\partial y} = 4xy^3 \quad \frac{\partial N}{\partial x} = 4xy^3$$

$$\frac{\partial M}{\partial y} = \frac{\partial N}{\partial x}, \quad \forall (x, y) \in \mathbb{R}^2 \Rightarrow \text{A equação é exata!}$$

$$\psi(x, y) = \int M dx = \frac{1}{2}x^2y^4 + h(y)$$

$$N = 2x^2y^3 + 3y^5 - 20y^3 = 2x^2y^3 + h'(y)$$

$$h'(y) = 3y^5 - 20y^3$$

$$h(y) = \frac{1}{2}y^6 - 5y^4$$

Portanto, a solução da equação diferencial é dada implicitamente por

$$\psi(x, y) = \frac{1}{2}x^2y^4 + \frac{1}{2}y^6 - 5y^4 = C$$

4.2. (a) Podemos reescrever a equação como

$$2x - y + (2y - x) \frac{dy}{dx} = 0$$

ou

$$M = 2x - y \quad N = 2y - x.$$

$$\frac{\partial M}{\partial y} = -1 \quad \frac{\partial N}{\partial x} = -1$$

$$\frac{\partial M}{\partial y} = \frac{\partial N}{\partial x}, \quad \forall (x, y) \in \mathbb{R}^2 \Rightarrow \text{A equação é exata!}$$

Vamos encontrar uma função $\psi(x, y)$ tal que

$$\frac{\partial \psi}{\partial x} = M(x, y) = 2x - y \quad \text{e} \quad \frac{\partial \psi}{\partial y} = N(x, y) = 2y - x$$

Integrando-se a 1ª equação em relação a x obtemos

$$\psi(x, y) = \int M dx = x^2 - yx + h(y)$$

Substituindo-se a função $\psi(x, y)$ encontrada na equação de $\frac{\partial \psi}{\partial y} = N = 2y - x$ obtemos

$$N = 2y - x = -x + h'(y)$$

$$h'(y) = 2y$$

O que implica que

$$h(y) = y^2 + C_1$$

E a solução geral da equação é dada implicitamente por

$$\psi(x, y) = x^2 - xy + y^2 = C$$

Para encontrar a solução que satisfaz a condição inicial $y(1) = 3$ substituímos $x = 1$ e $y = 3$ na solução geral obtendo $C = 1 - 3 + 9 = 7$. Assim, a solução do problema de valor inicial é dada implicitamente por

$$x^2 - xy + y^2 = 7$$

- (b) Para determinar o intervalo de validade da solução vamos determinar os pontos onde a derivada não está definida, pela equação diferencial, $\frac{dy}{dx} = \frac{2x-y}{x-2y}$, não está definida se, e somente se, $x - 2y = 0$, ou seja, $y = x/2$. Substituindo-se $y = x/2$ na equação que define a solução obtemos a equação $x^2 - \frac{x^2}{2} + \frac{x^2}{4} = 7$, que tem solução $x = \pm\sqrt{28/3}$. Como o ponto inicial tem $x = 1$ que está entre os valores $x = -\sqrt{28/3}$ e $x = \sqrt{28/3}$ concluímos que o intervalo de validade da solução é o intervalo $(-\sqrt{28/3}, \sqrt{28/3})$, que é o maior intervalo em que a solução $y(x)$ e a sua derivada estão definidas. A reta tangente à curva integral $x^2 - xy + y^2 = 7$ é vertical ($\frac{dx}{dy} = 0$) para $x = -\sqrt{28/3}$ e $x = \sqrt{28/3}$, pois

$$\frac{dx}{dy} = \frac{1}{\frac{dy}{dx}} = \frac{x-2y}{2x-y}, \quad \text{para } x \neq y/2.$$

- (c) Nos pontos onde a solução tem máximo local a reta tangente à curva é horizontal, ou seja, pontos onde $\frac{dy}{dx} = 0$. Como a derivada já está dada pela equação diferencial, ou seja,

$$\frac{dy}{dx} = \frac{2x-y}{x-2y}$$

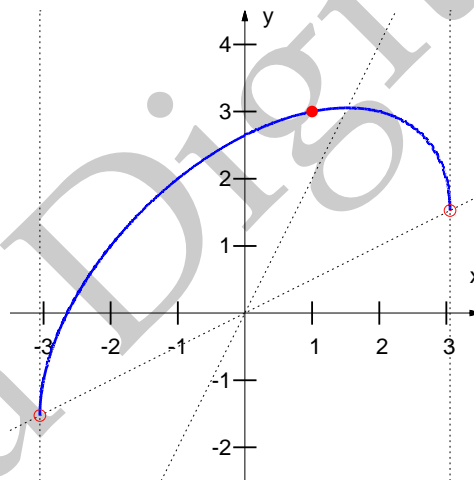
Assim, a reta tangente é horizontal para x tal que $2x - y = 0$, ou seja, somente para $y = 2x$. Substituindo-se $y = 2x$ na equação $x^2 - xy + y^2 = 7$ obtemos a equação $x^2 - 2x^2 + 4x^2 = 7$, que tem solução $x = \pm\sqrt{7/3}$.

Pela equação diferencial obtemos que a solução passa pelo ponto inicial $(1,3)$, onde a inclinação da tangente é $1/5$, que é crescente na região acima das retas $y = 2x$ e $y = x/2$ e decrescente na região abaixo da reta $y = 2x$ e acima da reta $y = x/2$. Logo, o ponto de máximo ocorre em $x = +\sqrt{7/3}$. Podemos chegar a essa conclusão também usando a derivada segunda:

$$\begin{aligned} \frac{d^2y}{dx^2} &= \frac{d}{dx} \left(\frac{2x-y}{x-2y} \right) = \frac{(2-y')(x-2y) - (2x-y)(1-2y')}{(x-2y)^2} \\ \frac{d^2y}{dx^2} \Big|_{y=2x} &= \frac{-2}{3x}. \end{aligned}$$

- (d) Já sabemos que a solução está contida em uma curva que passa pelos pontos $(-\sqrt{28/3}, -\sqrt{28/3}/2)$ e

$(\sqrt{28/3}, \sqrt{28/3}/2)$ onde a tangente é vertical, pelo ponto inicial $(1, 3)$. Neste ponto a inclinação da tangente é $1/5$, pois substituindo-se $x = 1$ e $y = 3$ na equação diferencial obtemos $\frac{dy}{dx} = 1/5$. Pela equação diferencial obtemos que a solução é crescente na região acima das retas $y = 2x$ e $y = x/2$ e decrescente abaixo da reta $y = 2x$ e acima da reta $y = x/2$.



- 4.3. (a) Vamos supor que exista uma função $\mu(y)$ tal que ao multiplicarmos a equação por $\mu(y)$ a nova equação seja exata. Então,

$$\frac{\partial}{\partial y}(\mu M) = \frac{\partial}{\partial x}(\mu N)$$

ou seja,

$$\frac{d\mu}{dy}M + \mu \frac{\partial M}{\partial y} = \mu \frac{\partial N}{\partial x}$$

Assim, $\mu(y)$ deve satisfazer a equação diferencial

$$\frac{d\mu}{dy} = \frac{\frac{\partial N}{\partial x} - \frac{\partial M}{\partial y}}{M} \mu$$

Como

$$\frac{\frac{\partial N}{\partial x} - \frac{\partial M}{\partial y}}{M} = \frac{4x - x}{xy} = 3/y,$$

então $\mu(y)$ deve satisfazer a equação diferencial

$$\frac{d\mu}{dy} = \frac{3}{y} \mu$$

$$\frac{1}{\mu} \frac{d\mu}{dy} = \frac{3}{y}$$

$$\ln |\mu| - 3 \ln y = C$$

Assim,

$$\mu(y) = y^3$$

é um fator integrante para a equação diferencial.

(b)

$$\tilde{M} = y^3(xy) \quad \text{e} \quad \tilde{N} = y^3(2x^2 + 3y^2 - 20)$$

$$\frac{\partial \tilde{M}}{\partial y} = 4xy^3 \quad \frac{\partial \tilde{N}}{\partial x} = 4xy^3$$

$$\frac{\partial \tilde{M}}{\partial y} = \frac{\partial \tilde{N}}{\partial x}, \quad \forall (x, y) \in \mathbb{R}^2 \quad \Rightarrow \quad \text{A nova equação é exata!}$$

- 4.4. (a) Vamos supor que exista uma função $\mu(y)$ tal que ao multiplicarmos a equação por $\mu(y)$ a nova equação seja exata. Então,

$$\frac{\partial}{\partial y}(\mu M) = \frac{\partial}{\partial x}(\mu N)$$

ou seja,

$$\frac{d\mu}{dy}M + \mu \frac{\partial M}{\partial y} = \mu \frac{\partial N}{\partial x}$$

Assim, $\mu(y)$ deve satisfazer a equação diferencial

$$\frac{d\mu}{dy} = \frac{\frac{\partial N}{\partial x} - \frac{\partial M}{\partial y}}{M} \mu$$

Como

$$\frac{\frac{\partial N}{\partial x} - \frac{\partial M}{\partial y}}{M} = \frac{2xy}{x} = 2y,$$

então $\mu(y)$ deve satisfazer a equação diferencial

$$\frac{d\mu}{dy} = 2y\mu$$

$$\frac{1}{\mu} \frac{d\mu}{dy} = 2y$$

$$\ln |\mu| - y^2 = C$$

Assim,

$$\mu(y) = e^{y^2}$$

é um fator integrante para a equação diferencial.

4.5. (a)

$$M = 2y^2 + \frac{2y}{x}, \quad N = 2xy + 2 + \frac{y}{x}$$

$$\frac{\partial M}{\partial y} = 4y + \frac{2}{x}, \quad \frac{\partial N}{\partial x} = 2y - \frac{y}{x^2}$$

$$\frac{\partial M}{\partial y} \neq \frac{\partial N}{\partial x} \Rightarrow \text{A equação não é exata!}$$

Multiplicando a equação por $\mu(x) = x$ obtemos

$$2xy^2 + 2y + (2x^2y + 2x + y)y' = 0.$$

$$\tilde{M} = xM = 2xy^2 + 2y, \quad \tilde{N} = xN = 2x^2y + 2x + y$$

$$\frac{\partial \tilde{M}}{\partial y} = 4xy + 2, \quad \frac{\partial \tilde{N}}{\partial x} = 4xy + 2$$

$$\frac{\partial \tilde{M}}{\partial y} = \frac{\partial \tilde{N}}{\partial x} \Rightarrow \text{A nova equação é exata!}$$

(b)

$$\psi(x, y) = \int \tilde{M} dx = x^2y^2 + 2xy + h(y)$$

$$\tilde{N} = 2x^2y + 2x + y = \frac{\partial \psi}{\partial y} = 2x^2y + 2x + h'(y)$$

$$h'(y) = y \Rightarrow h(y) = y^2/2 + C_1$$

A solução geral da equação é dada implicitamente por

$$x^2y^2 + 2xy + y^2/2 = C$$

(c) Substituindo-se $x = 1$ e $y = 1$ na solução acima

$$1 + 2 + 1/2 = C$$

Logo, a solução do problema de valor inicial é dada implicitamente por

$$x^2 y^2 + 2xy + y^2/2 = 7/2$$

4.6. (a)

$$M = \frac{1}{x^3} + \frac{e^y}{x}, \quad N = e^y + \frac{1}{xy}$$

$$\frac{\partial M}{\partial y} = \frac{e^y}{x}, \quad \frac{\partial N}{\partial x} = -\frac{1}{x^2 y}$$

$$\frac{\partial M}{\partial y} \neq \frac{\partial N}{\partial x} \Rightarrow \text{A equação não é exata!}$$

Multiplicando a equação por $\mu(x) = x$ obtemos

$$\frac{1}{x^2} + e^y + \left(x e^y + \frac{1}{y} \right) y' = 0.$$

$$\tilde{M} = xM = x^{-2} + e^y, \quad \tilde{N} = xN = x e^y + y^{-1}$$

$$\frac{\partial \tilde{M}}{\partial y} = e^y, \quad \frac{\partial \tilde{N}}{\partial x} = e^y$$

$$\frac{\partial \tilde{M}}{\partial y} = \frac{\partial \tilde{N}}{\partial x}, \quad \forall (x, y) \in \mathbb{R}^2 \Rightarrow \text{A nova equação é exata!}$$

(b)

$$\psi(x, y) = \int \tilde{M} dx = -x^{-1} + xe^y + h(y)$$

$$\tilde{N} = xe^y + y^{-1} = xe^y + h'(y)$$

$$h'(y) = \frac{1}{y} \Rightarrow h(y) = \ln y + C_1$$

A solução geral da equação é dada implicitamente por

$$-x^{-1} + xe^y + \ln |y| = C$$

(c) Substituindo-se $x = 1$ e $y = 1$ na solução acima

$$-1 + e = C$$

Logo, a solução do problema de valor inicial é dada implicitamente por

$$-x^{-1} + xe^y + \ln |y| = e - 1$$

4.7. (a)

$$M = -2y, \quad N = x + \frac{y^3}{x}$$

$$\frac{\partial M}{\partial y} = -2, \quad \frac{\partial N}{\partial x} = 1 - \frac{y^3}{x^2}$$

$$\frac{\partial M}{\partial y} \neq \frac{\partial N}{\partial x} \Rightarrow \text{A equação não é exata!}$$

Multiplicando a equação por $\mu(x, y) = \frac{x}{y^2}$ obtemos

$$-\frac{2x}{y} + \left(\frac{x^2}{y^2} + y\right) y' = 0.$$

$$\tilde{M} = \frac{x}{y^2} M = -\frac{2x}{y}, \quad \tilde{N} = \frac{x}{y^2} N = \frac{x^2}{y^2} + y$$

$$\frac{\partial \tilde{M}}{\partial y} = \frac{2x}{y^2}, \quad \frac{\partial \tilde{N}}{\partial x} = \frac{2x}{y^2}$$

$$\frac{\partial \tilde{M}}{\partial y} = \frac{\partial \tilde{N}}{\partial x}, \quad \forall (x, y) \in \mathbb{R}^2, y \neq 0$$

\Rightarrow A nova equação é exata!

(b)

$$\psi(x, y) = \int \tilde{M} dx = -\frac{x^2}{y} + h(y)$$

$$\tilde{N} = \frac{x^2}{y^2} + y = \frac{\partial \psi}{\partial y} = \frac{x^2}{y^2} + h'(y)$$

$$h'(y) = y \quad \Rightarrow \quad h(y) = \frac{y^2}{2} + C_1$$

A solução geral da equação é dada implicitamente por

$$-\frac{x^2}{y} + \frac{y^2}{2} = C$$

(c) Substituindo-se $x = 1$ e $y = 1$ na solução acima

$$-1 + \frac{1}{2} = C$$

Logo, a solução do problema de valor inicial é dada implicitamente por

$$-\frac{x^2}{y} + \frac{y^2}{2} = -\frac{1}{2}$$

4.8. (a)

$$M = e^{x^3} + \sin y, \quad N = \frac{x}{3} \cos y$$

$$\frac{\partial M}{\partial y} = \cos y, \quad \frac{\partial N}{\partial x} = \frac{1}{3} \cos y$$

$$\frac{\partial M}{\partial y} \neq \frac{\partial N}{\partial x} \Rightarrow \text{A equação não é exata!}$$

Multiplicando a equação por $\mu(x) = x^2$ obtemos

$$x^2 e^{x^3} + x^2 + \left(\frac{x^3}{3} \cos y \right) y' = 0.$$

$$\tilde{M} = xM = x^2 e^{x^3} + x^2 \sin y, \quad \tilde{N} = xN = \frac{x^3}{3} \cos y$$

$$\frac{\partial \tilde{M}}{\partial y} = x^2 \cos y, \quad \frac{\partial \tilde{N}}{\partial x} = x^2 \cos y$$

$$\frac{\partial \tilde{M}}{\partial y} = \frac{\partial \tilde{N}}{\partial x}, \quad \forall (x, y) \in \mathbb{R}^2 \Rightarrow \text{A nova equação é exata!}$$

(b)

$$\psi(x, y) = \int \tilde{M} dx = \frac{1}{3} e^{x^3} + \frac{x^3}{3} \operatorname{sen} y + h(y)$$

$$\tilde{N} = \frac{x^3}{3} \cos y = \frac{\partial \psi}{\partial y} = \frac{x^3}{3} \cos y + h'(y)$$

$$h'(y) = 0 \Rightarrow h(y) = C_1$$

A solução geral da equação é dada implicitamente por

$$\frac{1}{3} e^{x^3} + \frac{x^3}{3} \operatorname{sen} y = C$$

(c) Substituindo-se $x = 0$ e $y = 0$ na solução acima

$$\frac{1}{3} = C$$

Logo, a solução do problema de valor inicial é dada implicitamente por

$$\frac{1}{3} e^{x^3} + \frac{x^3}{3} \operatorname{sen} y = \frac{1}{3}$$

4.9. (a)

$$M = 2 + \frac{e^y}{x} \quad N = e^y + \frac{y}{x}$$

$$\frac{\partial M}{\partial y} = \frac{e^y}{x}, \quad \frac{\partial N}{\partial x} = -\frac{y}{x^2}$$

$$\frac{\partial M}{\partial y} \neq \frac{\partial N}{\partial x} \Rightarrow \text{A equação não é exata!}$$

Multiplicando a equação por $\mu(x) = x$ obtemos

$$2x + e^y + (xe^y + y) y' = 0.$$

$$\tilde{M} = xM = 2x + e^y \quad \tilde{N} = xN = xe^y + y$$

$$\frac{\partial \tilde{M}}{\partial y} = e^y, \quad \frac{\partial \tilde{N}}{\partial x} = e^y$$

$$\frac{\partial \tilde{M}}{\partial y} = \frac{\partial \tilde{N}}{\partial x}, \quad \forall (x, y) \in \mathbb{R}^2 \Rightarrow \text{A nova equação é exata!}$$

(b)

$$\psi(x, y) = \int \tilde{M} dx = x^2 + xe^y + h(y)$$

$$\tilde{N} = xe^y + y = \frac{\partial \psi}{\partial y} = xe^y + h'(y)$$

$$h'(y) = y \Rightarrow h(y) = y^2/2 + C_1$$

A solução geral da equação é dada implicitamente por

$$x^2 + xe^y + y^2/2 = C$$

(c) Substituindo-se $x = 1$ e $y = 1$ na solução acima

$$1 + e + 1/2 = C$$

Logo, a solução do problema de valor inicial é dada implicitamente por

$$x^2 + xe^y + y^2/2 = e + 3/2$$

4.10. A equação

$$g(y) \frac{dy}{dx} = f(x)$$

pode ser escrita na forma

$$f(x) - g(y) \frac{dy}{dx} = 0$$

Para esta equação $M(x, y) = f(x)$ e $N(x, y) = -g(y)$.

$$\frac{\partial M}{\partial y} = 0 = \frac{\partial N}{\partial x}, \quad \forall (x, y) \in \mathbb{R}^2 \Rightarrow \text{A equação é exata!}$$

4.11. (a) Multiplicando-se a equação diferencial por $y^2/3 + x^2$ obtemos

$$2xy - 2 + (y^2/3 + x^2) \frac{dy}{dx} = 0.$$

Considere $M(x, y) = 2xy - 2$ e $N(x, y) = y^2/3 + x^2$. Como

$$\partial M(x, y) / \partial y = 2x = \partial N(x, y) / \partial x,$$

para todo $(x, y) \in \mathbb{R}^2$, a equação é exata.

Assim existe $\psi(x, y)$ tal que $\partial \psi / \partial x = M$ e $\partial \psi / \partial y = N$. De fato, integrando $\partial \psi / \partial x = M$ em relação a x temos que:

$$\psi(x, y) = x^2 y - 2x + g(y)$$

Usando $\partial \psi / \partial y = N$:

$$\frac{\partial \psi}{\partial y} = x^2 + g'(y) = y^2/3 + x^2.$$

Assim, $g'(y) = y^2/3$ e integrando-se obtemos que $g(y) = y^3/9 + c_1$.

Logo as soluções podem ser escritas de maneira implícita como:

$$x^2 y - 2x + y^3/9 = c.$$

- (b) Substituindo-se $x = 1 + \sqrt{8}/3$ e $y = 1$ na solução geral obtemos $c = 0$. Assim, a solução do PVI é dada implicitamente por

$$x^2y - 2x + y^3/9 = 0.$$

A tangente é vertical se e somente se $y^2/3 + x^2 = 0$, ou seja, $y = x = 0$. Logo a curva em que está contida a solução do PVI passa pela origem, onde a sua tangente é vertical. Como o ponto inicial está a direita de $x = 0$, então a solução do PVI é válida somente para $x > 0$.

- (c) Usando a equação diferencial temos que

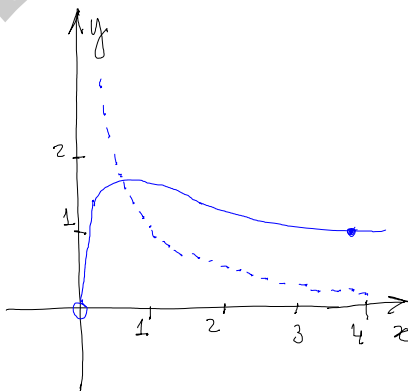
$$\frac{dy}{dx} = 0 \iff 2 - 2xy = 0 \iff y = \frac{1}{x}.$$

Substituindo-se $y = 1/x$ na solução do PVI obtemos

$$x - \frac{1}{9x^3} = 0 \iff x = \pm \frac{1}{\sqrt{3}}.$$

$$\frac{dy}{dx} > 0 \iff 2 - 2xy > 0 \iff y < 1/x,$$

$$\frac{dy}{dx} < 0 \iff 2 - 2xy < 0 \iff y > 1/x$$



4.12.

$$a(x) \frac{dy}{dx} + b(x)y = c(x)$$

é equivalente a

$$c(x) - b(x)y - a(x) \frac{dy}{dx} = 0.$$

Assim, $M(x, y) = c(x) - b(x)y$ e $N(x, y) = -a(x)$. Logo a equação é exata se $\frac{\partial M}{\partial y} = -b(x) = \frac{\partial N}{\partial x} = -a'(x)$. Ou seja, $a'(x) = b(x)$.

5. Substituições em Equações de 1ª Ordem (página 65)

5.1. (a)

$$\frac{dy}{dx} = \frac{3y + x}{3x + y}$$

Dividindo numerador e denominador por x obtemos

$$\frac{dy}{dx} = \frac{3\frac{y}{x} + 1}{3 + \frac{y}{x}}.$$

Seja $v = \frac{y}{x}$. Então, $y = vx$ e derivando o produto vx em relação a x obtemos

$$\frac{dy}{dx} = x \frac{dv}{dx} + v.$$

Substituindo-se este valor de $\frac{dy}{dx}$ e $\frac{y}{x} = v$ na equação obtemos

$$x \frac{dv}{dx} + v = \frac{3v + 1}{3 + v}$$

ou

$$x \frac{dv}{dx} = \frac{3v+1}{3+v} - v = -\frac{v^2-1}{3+v}$$

Multiplicando-se por $\frac{3+v}{x(v^2-1)}$ esta equação se torna

$$\frac{3+v}{v^2-1} \frac{dv}{dx} = -\frac{1}{x}$$

$$\frac{3+v}{v^2-1} = \frac{3+v}{(v-1)(v+1)} = \frac{A}{v-1} + \frac{B}{v+1}$$

Multiplicando-se por $(v-1)(v+1)$ obtemos

$$3+v = A(v+1) + B(v-1)$$

Substituindo-se $v = -1$ e $v = 1$ obtemos $B = -1$ e $A = 2$. Assim,

$$\begin{aligned} \int \frac{3+v}{v^2-1} dv &= 2 \int \frac{1}{v-1} dv - \int \frac{1}{v+1} dv \\ &= 2 \ln |v-1| - \ln |v+1| \\ &= \ln \left| \frac{(v-1)^2}{v+1} \right| \end{aligned}$$

Logo, a equação acima pode ser escrita como

$$\frac{d}{dx} \left(\ln \left| \frac{(v-1)^2}{v+1} \right| \right) = -\frac{1}{x}$$

Integrando-se obtemos

$$\ln \left| \frac{(v-1)^2}{v+1} \right| = -\ln |x| + C_1$$

$$\ln \left| \frac{x(v-1)^2}{v+1} \right| = C_1$$

$$\frac{x(v-1)^2}{v+1} = C$$

Substituindo-se $v = \frac{y}{x}$ obtemos

$$\frac{x(\frac{y}{x}-1)^2}{\frac{y}{x}+1} = C$$

Multiplicando-se numerador e denominador por x :

$$(y-x)^2 = C(y+x)$$

(b)

$$\frac{dy}{dx} = \frac{2x^2 + 5y^2}{2xy}$$

Dividindo numerador e denominador por x^2 obtemos

$$\frac{dy}{dx} = \frac{2 + 5\left(\frac{y}{x}\right)^2}{2\frac{y}{x}}.$$

Seja $v = \frac{y}{x}$. Então, $y = vx$ e derivando o produto vx em relação a x obtemos

$$\frac{dy}{dx} = x \frac{dv}{dx} + v.$$

Substituindo-se este valor de $\frac{dy}{dx}$ e $\frac{y}{x} = v$ na equação obtemos

$$x \frac{dv}{dx} + v = \frac{2 + 5v^2}{2v}$$

ou

$$x \frac{dv}{dx} = \frac{2 + 5v^2}{2v} - v = \frac{3v^2 + 2}{2v}$$

Multiplicando-se por $\frac{3v^2 + 2}{2xv}$ esta equação se torna

$$\frac{2v}{3v^2 + 2} \frac{dv}{dx} = \frac{1}{x}$$

$$\int \frac{2v}{3v^2 + 2} dv = \frac{1}{3} \ln |3v^2 + 2| = \ln |3v^2 + 2|^{1/3}$$

Logo, a equação acima pode ser escrita como

$$\frac{d}{dx} (\ln |3v^2 + 2|^{1/3}) = \frac{1}{x}$$

Integrando-se obtemos

$$\ln |3v^2 + 2|^{1/3} = \ln |x| + C_1$$

$$\ln \left| \frac{(3v^2 + 2)^{1/3}}{x} \right| = C_1$$

$$\frac{(3v^2 + 2)^{1/3}}{x} = C$$

Substituindo-se $v = \frac{y}{x}$ obtemos

$$\frac{(3(y/x)^2 + 2)^{1/3}}{x} = C$$

$$(3y^2 + 2x^2)^{1/3} = Cx^{5/3}$$

(c) Dividindo-se a equação $(x + \sqrt{xy}) \frac{dy}{dx} + x - y = x^{-1/2} y^{3/2}$ por x obtemos

$$\left(1 + \sqrt{\frac{y}{x}}\right) \frac{dy}{dx} + 1 - \frac{y}{x} = \left(\frac{y}{x}\right)^{3/2}$$

Seja $v = \frac{y}{x}$. Então, $y = vx$ e derivando o produto vx em relação a x obtemos

$$\frac{dy}{dx} = x \frac{dv}{dx} + v.$$

Substituindo-se este valor de $\frac{dy}{dx}$ e $\frac{y}{x} = v$ na equação obtemos

$$(1 + \sqrt{v})(x \frac{dv}{dx} + v) + 1 - v = v^{3/2}.$$

$$x \frac{dv}{dx} = \frac{v^{3/2} + v - 1}{1 + \sqrt{v}} - v = \frac{v^{3/2} + v - 1 - v(1 + \sqrt{v})}{1 + \sqrt{v}} = \frac{1}{1 + \sqrt{v}}$$

$$(1 + \sqrt{v})v' = \frac{1}{x}.$$

Integrando-se em relação a x ambos os membros:

$$v + \frac{2}{3}v^{3/2} = \ln|x| + c.$$

Substituindo-se $v = \frac{y}{x}$ obtemos que a solução geral é dada implicitamente por

$$\frac{y}{x} + \frac{2}{3} \left(\frac{y}{x}\right)^{3/2} = \ln|x| + c.$$

5.2. (a)

$$y' + \frac{2}{x}y = \frac{y^3}{x^3}$$

Fazendo a mudança de variáveis $v = y^{-2}$, então

$$\frac{dv}{dx} = (-2)y^{-3} \frac{dy}{dx}$$

Multiplicando-se a equação acima por y^{-3} obtemos

$$y^{-3} \frac{dy}{dx} + \frac{2}{x} y^{-2} = \frac{1}{x^3}$$

Fazendo as substituições $y^{-3} \frac{dy}{dx} = -\frac{1}{2} \frac{dv}{dx}$ e $y^{-2} = v$ obtemos

$$-\frac{1}{2} \frac{dv}{dx} + \frac{2}{x} v = \frac{1}{x^3}$$

Multiplicando esta equação por -2 obtemos

$$v' - \frac{4}{x}v = -\frac{2}{x^3}$$

que é uma equação linear e tem solução

$$v(x) = \frac{1}{3x^2} + Cx^4$$

Assim, a solução da equação dada é

$$y^{-2} = \frac{1}{3x^2} + Cx^4$$

(b)

$$y' + \frac{4}{x}y = -x^5 e^x y^2$$

Fazendo a mudança de variáveis $v = y^{-1}$, então

$$\frac{dv}{dx} = -y^{-2} \frac{dy}{dx}$$

Multiplicando-se a equação $y' + \frac{4}{x}y = -x^5 e^x y^2$ por y^{-2} obtemos

$$y^{-2} \frac{dy}{dx} + \frac{4}{x} y^{-1} = -x^5 e^x$$

Fazendo as substituições $y^{-2} \frac{dy}{dx} = -\frac{dv}{dx}$ e $y^{-1} = v$ obtemos

$$-\frac{dv}{dx} + \frac{4}{x}v = -x^5 e^x$$

Multiplicando esta equação por -1 obtemos

$$v' - \frac{4}{x}v = x^5 e^x$$

que é uma equação linear e tem solução

$$v(x) = x^5 e^x - x^4 e^x + Cx^4$$

Assim, a solução da equação dada é

$$y(x) = \frac{1}{x^5 e^x - x^4 e^x + Cx^4}$$

(c)

$$y = \frac{2}{x} + u$$

$$y' = -\frac{2}{x} + u'$$

Substituindo-se na equação

$$-\frac{2}{x^2} + u' = -\frac{4}{x^2} - \frac{1}{x}\left(\frac{2}{x} + u\right) + \left(\frac{2}{x} + u\right)^2$$
$$u' - \frac{3}{x}u = u^2$$

Esta é uma equação de Bernoulli. Fazendo a substituição $v = u^{-1}$ obtemos

$$v' + \frac{3}{x}v = -1$$

Esta equação é linear. O fator integrante é $\mu(x) = x^3$. Multiplicando-se a equação por $\mu(x)$ obtemos

$$\frac{d}{dx}(x^3v) = -x^3$$

Integrando-se obtemos

$$x^3v(x) = -\frac{x^4}{4} + c$$
$$v(x) = -\frac{x}{4} + \frac{c}{x^3}$$

Substituindo-se $v = u^{-1} = (y - \frac{2}{x})^{-1}$ obtemos que a solução da equação é dada implicitamente por

$$\frac{1}{y - \frac{2}{x}} = -\frac{x}{4} + \frac{c}{x^3}$$

(d) Substituindo-se $y - x = v$ e $y' = 1 + v'$ na equação $y' = (y - x)^2$ obtemos

$$1 + v' = v^2$$
$$\frac{1}{v^2 - 1}v' = 1$$

$$\ln \left| \frac{v-1}{v+1} \right| = 2x + c_1$$

$$\frac{v-1}{v+1} = ce^{2x}$$

$$\frac{y-x-1}{y-x+1} = ce^{2x}$$

(e) Substituindo-se $vy = v$ e $y + xy' = v'$ na equação $xy' = e^{-xy} - y$ obtemos

$$v' = e^{-v}$$

$$e^v v' = 1$$

$$e^v = x + c$$

$$e^{xy} = x + c$$

(f) Dividindo-se a equação $\sqrt{y}y' + \sqrt{y^3} = 1$ por \sqrt{y} :

$$y' + y = y^{-1/2}.$$

Multiplicando-se a equação de Bernoulli por $y^{1/2}$ obtemos

$$y^{1/2}y' + y^{3/2} = 1.$$

Derivando $v = y^{3/2}$ em relação a x obtemos pela regra da cadeia

$$\frac{dv}{dx} = \frac{1}{2}y^{1/2}\frac{dy}{dx},$$

de onde obtemos que

$$2\frac{dv}{dx} = y^{1/2}\frac{dy}{dx},$$

Fazendo as substituições $y^{1/2} \frac{dy}{dx} = 2 \frac{dv}{dx}$ e $y^{3/2} = v$ na equação acima obtemos

$$2 \frac{dv}{dx} + v = 1.$$

$$\frac{2}{1-v} v' = 1.$$

Integrando-se em relação a x ambos os membros:

$$2 \ln |1-v| = x + 2c_1.$$

Dividindo-se por 2 e aplicando-se a exponencial obtemos

$$1-v = ce^{x/2}.$$

Substituindo-se $v = y^{3/2}$ obtemos que a solução geral é dada implicitamente por

$$1 - y^{3/2} = ce^{x/2}.$$

(g) Fazendo-se a mudança de variáveis $v = 9x + 16y$ temos que

$$\frac{dv}{dx} = 9 + 16 \frac{dy}{dx}.$$

Substituindo-se

$$\frac{dy}{dx} = \frac{1}{16} \frac{dv}{dx} - \frac{9}{16}$$

na equação diferencial $y' = (9x + 16y)^2$ obtemos

$$\frac{1}{16} \frac{dv}{dx} - \frac{9}{16} = v^2.$$

Somando-se $\frac{9}{16}$ e multiplicando-se por 16:

$$\frac{dv}{dx} = \frac{v^2 + 144}{16}.$$

Dividindo-se por $\frac{v^2+144}{16}$ obtemos a equação

$$\frac{16}{v^2 + 144} v' = 1.$$

$$\frac{4}{3} \arctan\left(\frac{v}{12}\right) = x + c.$$

Substituindo-se $v = 9x + 16y$ obtemos que a solução geral é dada implicitamente por

$$\frac{4}{3} \arctan\left(\frac{9x + 16y}{12}\right) = x + c.$$

6. Aplicações (página 120)

6.1. (a)

$$\begin{cases} \frac{dQ}{dt} = 2te^{-\frac{1}{100}t} - \frac{Q}{100}. \\ Q(0) = 100 \end{cases}$$

A equação é linear e pode ser reescrita como

$$\frac{dQ}{dt} + \frac{Q}{100} = 2te^{-\frac{1}{100}t}.$$

Para resolvê-la precisamos determinar o fator integrante

$$\mu(t) = e^{\int \frac{1}{100} dt} = e^{\frac{1}{100}t}$$

Multiplicando-se a equação diferencial por $\mu(t) = e^{\frac{1}{100}t}$ obtemos

$$\frac{d}{dt}(e^{\frac{1}{100}t}Q) = 2t$$

Integrando-se ambos os membros obtemos

$$e^{\frac{1}{100}t} Q(t) = t^2 + C$$

ou

$$Q(t) = t^2 e^{-\frac{1}{100}t} + C e^{-\frac{1}{100}t}$$

Substituindo-se $t = 0$ e $Q = 100$, obtemos

$$100 = C$$

Ou seja, a solução do problema de valor inicial é

$$Q(t) = t^2 e^{-\frac{1}{100}t} + 100 e^{-\frac{1}{100}t}.$$

(b) A concentração em $t = 10$ min é dada por

$$c(10) = \frac{Q(10)}{100} = \left(\frac{10^2}{100} + 1\right) e^{-\frac{1}{100}10} = 2e^{-\frac{1}{10}} \text{ gramas/litro}$$

6.2. (a)

$$\begin{cases} \frac{dQ}{dt} = 300e^{-\frac{2}{10}t} - 10\frac{Q}{100} \\ Q(0) = 0 \end{cases}$$

A equação é linear e pode ser reescrita como

$$\frac{dQ}{dt} + \frac{Q}{10} = 300e^{-\frac{2}{10}t}.$$

Para resolvê-la precisamos determinar o fator integrante

$$\mu(t) = e^{\int \frac{1}{10} dt} = e^{\frac{1}{10}t}$$

Multiplicando-se a equação diferencial por $\mu(t) = e^{\frac{1}{10}t}$ obtemos

$$\frac{d}{dt}(e^{\frac{1}{10}t}Q) = 300e^{\frac{1}{10}t}e^{-\frac{2}{10}t} = 300e^{-\frac{1}{10}t}$$

Integrando-se ambos os membros obtemos

$$e^{\frac{1}{10}t}Q(t) = -3000e^{-\frac{1}{10}t} + C$$

ou

$$Q(t) = -3000e^{-\frac{2}{10}t} + Ce^{-\frac{1}{10}t}$$

Substituindo-se $t = 0$ e $Q = 0$, obtemos

$$0 = -3000 + C$$

Ou seja, a solução do problema de valor inicial é

$$Q(t) = 3000(e^{-\frac{1}{10}t} - e^{-\frac{2}{10}t}).$$

(b) A concentração de sal no tanque é dada por

$$c(t) = \frac{Q(t)}{100} = 30(e^{-\frac{1}{10}t} - e^{-\frac{2}{10}t})$$

Se $x = e^{-\frac{1}{10}t}$. Então, $c(t) = 7,5$ se, e somente se, $x - x^2 = \frac{75}{300} = \frac{1}{4}$ ou $x = 1/2$ ou $\frac{1}{10}t = \ln 2$ ou $t = 10 \ln 2$ min.

6.3. (a)

$$\begin{cases} \frac{dQ}{dt} = 20 - \frac{Q}{25} \\ Q(0) = 100 \end{cases}$$

A equação é linear e pode ser reescrita como

$$\frac{dQ}{dt} + \frac{Q}{25} = 20.$$

Para resolvê-la precisamos determinar o fator integrante

$$\mu(t) = e^{\int \frac{1}{25} dt} = e^{\frac{1}{25} t}$$

Multiplicando-se a equação diferencial por $\mu(t) = e^{\frac{1}{25} t}$ obtemos

$$\frac{d}{dt}(e^{\frac{1}{25} t} Q) = 20e^{\frac{1}{25} t}$$

Integrando-se ambos os membros obtemos

$$e^{\frac{1}{25} t} Q(t) = 500e^{\frac{1}{25} t} + C$$

ou

$$Q(t) = 500 + Ce^{-\frac{1}{25} t}$$

Substituindo-se $t = 0$ e $Q = 100$, obtemos

$$100 = 500 + C$$

Ou seja, a solução do problema de valor inicial é

$$Q(t) = 500 - 400e^{-\frac{1}{25} t}.$$

(b) A concentração de sal no tanque é dada por

$$c(t) = \frac{Q(t)}{V(t)} = \frac{Q(t)}{100} = 5 - 4e^{-\frac{1}{25} t} \text{ gramas por litro}$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} c(t) = 5 \text{ gramas por litro}$$

$$c(t) = \frac{5}{2} \text{ se, e somente se, } Q(t) = 250 = 500 - 400e^{-\frac{1}{25}t} \text{ ou}$$

$$e^{-\frac{1}{25}t} = \frac{250}{400} = \frac{5}{8}$$

ou

$$-\frac{1}{25}t = \ln \frac{5}{8}$$

ou

$$t = 25 \ln \frac{8}{5} \text{ min.}$$

6.4. (a)

$$\begin{cases} \frac{dQ}{dt} = 3 - 2\frac{Q}{100+t} \\ Q(0) = 10 \end{cases}$$

A equação é linear e pode ser reescrita como

$$\frac{dQ}{dt} + 2\frac{Q}{100+t} = 3.$$

Para resolvê-la precisamos determinar o fator integrante

$$\mu(t) = e^{\int \frac{2}{100+t} dt} = e^{2 \ln |100+t|} = (100+t)^2$$

Multiplicando-se a equação diferencial por $\mu(t) = (100+t)^2$ obtemos

$$\frac{d}{dt}((100+t)^2 Q) = 3(100+t)^2$$

Integrando-se ambos os membros obtemos

$$(100+t)^2 Q(t) = (100+t)^3 + C$$

ou

$$Q(t) = 100 + t + C(100 + t)^{-2}$$

Substituindo-se $t = 0$ e $Q = 10$, obtemos

$$10 = 100 + C10^{-4} \Rightarrow C = -9 \cdot 10^5$$

Ou seja, a solução do problema de valor inicial é

$$Q(t) = 100 + t - 9 \cdot 10^5 (100 + t)^{-2} \text{ gramas.}$$

(b) A concentração de sal no tanque é dada por

$$c(t) = \frac{Q(t)}{100 + t} = 1 - 9 \cdot 10^5 (100 + t)^{-3}$$

O tanque estará cheio para $t = 100$.

$$\lim_{t \rightarrow 100} c(t) = 1 - \frac{9}{80} = \frac{71}{80} \text{ gramas/litro}$$

6.5. (a)

$$\begin{cases} \frac{dQ}{dt} = -2 \frac{Q}{100 - t} \\ Q(0) = 10 \end{cases}$$

A equação é separável e pode ser reescrita como

$$\frac{1}{Q} \frac{dQ}{dt} = -\frac{2}{100 - t}.$$

ou ainda

$$\frac{d}{dt}(\ln |Q|) = -\frac{2}{100 - t}$$

Integrando-se obtemos

$$\ln |Q(t)| = 2 \ln |100 - t| + C_1$$

ou

$$Q(t) = C(100 - t)^2$$

Substituindo-se $t = 0$ e $Q = 10$, obtemos

$$10 = C10^4 \Rightarrow C = 10^{-3}$$

Ou seja, a solução do problema de valor inicial é

$$Q(t) = 10^{-3}(100 - t)^2 \text{ gramas.}$$

(b) A concentração de sal no tanque é dada por

$$c(t) = \frac{Q(t)}{100 - t} = 10^{-3}(100 - t)$$

O tanque estará vazio para $t = 100$.

$$\lim_{t \rightarrow 100} c(t) = 0 \text{ grama/litro.}$$

6.6. (a) Escrevendo $v = v(r(t))$ e usando a regra da cadeia obtemos

$$\frac{dv}{dt} = \frac{dv}{dr} \frac{dr}{dt} = v \frac{dv}{dr}.$$

Pela 2a. Lei de Newton:

$$m \frac{dv}{dt} = mv \frac{dv}{dr} = -kr.$$

Como na superfície da Terra a força de gravidade é igual ao peso da pedra, então $kR = mg$ e $k = mg/R$. Logo a equação diferencial anterior se transforma em

$$v \frac{dv}{dr} = -\frac{g}{R} r$$

Integrando-se em relação a r :

$$\int v v' dr = -\frac{g}{R} \int r dr + c$$

Substituindo-se $v' dr = dv$:

$$v^2/2 = -\frac{g}{2R} r^2 + C$$

Substituindo-se $r = R, v = 0$:

$$\frac{gR}{2} = C.$$

$$v^2 = -\frac{g}{R} r^2 + gR$$

$$v(r) = \sqrt{gR - \frac{g}{R} r^2}$$

(b) Substituindo-se $r = 0$:

$$v(0) = \sqrt{gR}$$

Substituindo-se $r = -R$:

$$v(-R) = 0.$$

6.7.

$$\frac{dV}{dt} = kA = k4\pi r^2$$

$$V(r) = \frac{4}{3}\pi r^3$$

$$\frac{dV}{dt} = \frac{dV}{dr} \frac{dr}{dt} = 4\pi r^2 \frac{dr}{dt}$$

Substituindo na primeira equação:

$$\frac{dr}{dt} = k$$

$$r(t) = kt + C$$

Substituindo $t = 0$ e $r = r_0$:

$$r_0 = C$$

Substituindo $t = 1$ e $r = r_0/2$:

$$r_0/2 = k + r_0$$

$$k = -r_0/2$$

$$r(t) = r_0(1 - t/2)$$

6.8.

$$\frac{dy}{dt} = ky \Rightarrow y(t) = y_0 e^{kt}$$

$$48 = y(1) = y_0 e^k$$

$$27 = y(3) = y_0 e^{3k}$$

$$\frac{48}{27} = e^{-2k}$$

$$k = -\frac{1}{2} \ln \frac{48}{27} = -\frac{1}{2} \ln \frac{16}{9} = \ln \frac{3}{4}$$

$$y_0 = 48e^{-k} = 48e^{-\ln \frac{3}{4}} = 48 \frac{4}{3} = 64$$

6.9.

$$\frac{dy}{dt} = ky$$

$$y(t) = y_0 e^{kt}$$

$$400 = y_0 e^{3k} \Rightarrow k = \frac{\ln(400/y_0)}{3}$$

$$2500 = y_0 e^{9k} \Rightarrow 2500 = y_0 \left(\frac{400}{y_0} \right)^3$$

$$y_0^{-2} = \frac{2500}{400^3}$$

$$y_0 = \left(\frac{400^3}{2500} \right)^{1/2} = \frac{20^3}{50} = 160$$

6.10.

$$\frac{dy}{dt} = ky$$

$$y(t) = 35000e^{kt}$$

$$30000 = 35000e^k \Rightarrow k = \ln(30000/35000) = \ln(6/7)$$

$$y(2) = 35000e^{2k} = 35000 \left(\frac{6}{7} \right)^2 = 5000 \frac{36}{7} = \frac{180000}{7} \approx \text{R\$ } 25714,00$$

6.11. A população cresce a uma taxa proporcional a população presente o que significa que a população, $y(t)$, é a solução do problema de valor inicial

$$\begin{cases} \frac{dy}{dt} = ky. \\ y(0) = y_0 \end{cases}$$

que como vimos acima tem solução

$$y(t) = y_0 e^{kt}$$

Como em uma hora a população é o dobro da população original, então substituindo-se $t = 1$ e $y = 2y_0$ obtemos

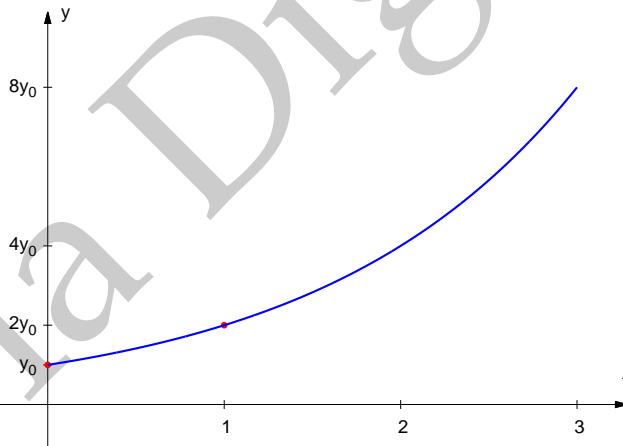
$$2y_0 = y_0 e^k \Rightarrow k = \ln 2$$

Assim, a equação que descreve como a população de bactérias varia com o tempo é

$$y(t) = y_0 e^{(\ln 2)t} = y_0 \cdot 2^t$$

Agora para sabermos em quanto tempo a população triplica substituímos $y = 3y_0$ e determinamos t que é

$$t = \frac{\ln 3}{\ln 2} \approx 1,585 \text{ horas} \approx 1 \text{ hora e } 35 \text{ minutos.}$$



6.12. O número de pessoas infectadas como função do tempo, $y(t)$, é a solução do problema

$$\begin{cases} \frac{dy}{dt} = ky(100 - y). \\ y(0) = 1, \quad y(4) = 5 \end{cases}$$

Multiplicando-se a equação por $\frac{1}{y(100-y)}$ obtemos a equação separável:

$$\frac{1}{y(100-y)}y' = k$$

Integrando-se em relação a t obtemos

$$\int \frac{1}{y(100-y)}y' dt = \int k dt + c_1.$$

Substituindo-se $y' dt = dy$ obtemos

$$\int \frac{1}{y(100-y)} dy = \int k dt + c_1. \quad (1.69)$$

Vamos decompor $\frac{1}{y(100-y)}$ em frações parciais:

$$\frac{1}{y(100-y)} = \frac{A}{y} + \frac{B}{100-y}$$

Multiplicando-se a equação acima por $y(100-y)$ obtemos

$$1 = A(100-y) + By$$

Substituindo-se $y = 0$ e $y = 100$ obtemos $A = 1/100$ e $B = 1/100$. Assim,

$$\begin{aligned} \int \frac{1}{y(100-y)} dy &= \frac{1}{100} \left(\int \frac{1}{y} dy + \int \frac{1}{100-y} dy \right) \\ &= \frac{1}{100} (\ln |y| - \ln |100-y|) \end{aligned}$$

Logo, a equação (1.69) pode ser escrita como

$$\frac{1}{100} (\ln |y| - \ln |100-y|) = kt + c_1$$

ou ainda como

$$\ln |y| - \ln |100 - y| = 100kt + c_2.$$

Usando propriedades do logaritmo podemos reescrever como

$$\ln \left| \frac{y}{100 - y} \right| = c_2 + 100kt.$$

Aplicando a exponencial a ambos os membros obtemos

$$\frac{y}{100 - y} = \pm e^{c_2} e^{100kt} = ce^{100kt}$$

Substituindo-se $(t = 0, y = 1)$ e $(t = 4, y = 5)$ na equação acima obtemos

$$c = \frac{1}{100 - 1} = \frac{1}{99},$$

$$e^{400k} = \frac{99}{19} \Rightarrow 100k = \frac{\ln \frac{99}{19}}{4}.$$

Vamos explicitar $y(t)$.

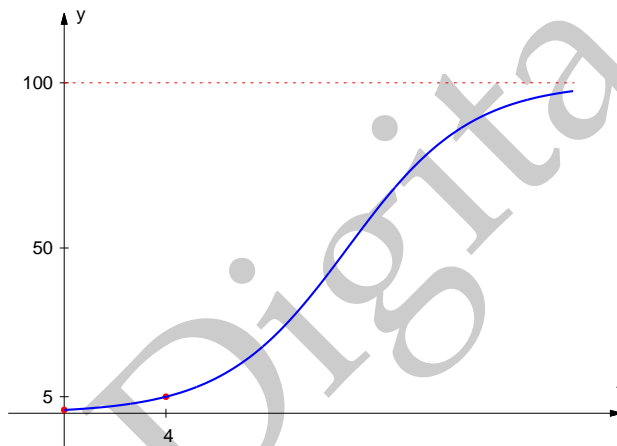
$$y = (100 - y)ce^{100kt} \Rightarrow y + ce^{100kt}y = 100ce^{100kt}$$

Portanto, a solução do problema de valor inicial é

$$y(t) = \frac{c100e^{100kt}}{1 + ce^{100kt}} = \frac{100}{\frac{1}{c}e^{-100kt} + 1} = \frac{100}{99e^{-\frac{\ln \frac{99}{19}}{4}t} + 1} = \frac{100}{99 \cdot \left(\frac{99}{19}\right)^{-t/4} + 1}$$

Usando a equação diferencial vemos que a taxa de crescimento da solução (dada por y') é positiva e crescente para $0 < y < 50$ e positiva e decrescente para $50 < y < 100$.

Além disso, $\lim_{t \rightarrow \infty} y(t) = 100$.



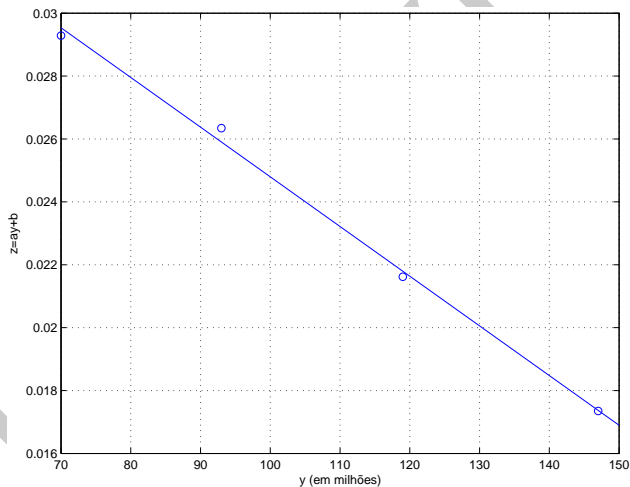
6.13.

t_i	y_i	g_i	h_i	$\frac{g_i + h_i}{2}$
1950	52 milhões	0,0346	-	
1960	70 milhões	0,0329	0,0257	0,0293
1970	93 milhões	0,0280	0,0247	0,0263
1980	119 milhões	0,0214	0,0218	0,0216
1991	147 milhões	0,0174	0,0173	0,0174
2000	170 milhões	-	0,0150	

$$\frac{1}{y} \frac{dy}{dt}(t_i) = ay(t_i) + b \approx \frac{g_i + h_i}{2},$$

para $t_i = 1960, 1970, 1980, 1991$. Usando quadrados mínimos vamos encontrar a melhor reta que se ajusta ao conjunto de pontos

y_i	$\frac{g_i+h_i}{2}$
70 milhões	0.0293
93 milhões	0.0263
119 milhões	0.0216
147 milhões	0.0174



encontrando $a = -1,58 \cdot 10^{-10}$, $b = 0,04$. Assim, obtemos $k = 1,58 \cdot 10^{-10}$ e $y_M = 257$ milhões.

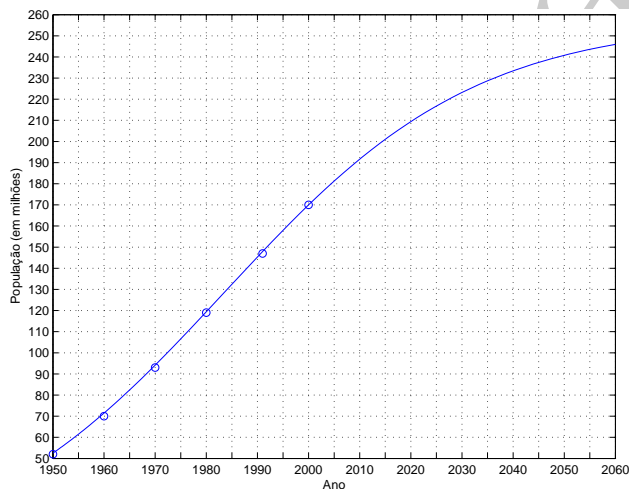
Usando $t_0 = 2000$, $y_0 = 170$ milhões obtemos

$$y(t) = \frac{257 \cdot 10^6}{1 + 0,51 \cdot e^{-0,04(t-2000)}}$$

Para $t = 2010$ temos

$$y(2010) = 191,6 \text{ milhões de habitantes.}$$

Um erro de 0,5 %.



6.14.

$$\begin{cases} \frac{dh}{dt} = k \frac{\sqrt{h}}{\frac{dV}{dh}} \\ h(0) = h_0 \end{cases}$$

Como para o cone

$$V(h) = \frac{1}{3} \pi r^2 h = \frac{1}{3} \pi \left(\frac{hR}{H} \right)^2 h = \frac{1}{3} \pi \left(\frac{R}{H} \right)^2 h^3$$

$$\frac{dV}{dh} = \pi \left(\frac{R}{H} \right)^2 h^2$$

então o problema pode ser modelado por

$$\begin{cases} \frac{dh}{dt} = kh^{-3/2} \\ h(0) = 2, h(30) = 1 \end{cases}$$

Multiplicando a equação por $h^{3/2}$

$$h^{3/2} \frac{dh}{dt} = k$$

$$\frac{d}{dh} \left(\frac{2}{5} h^{5/2} \right) \frac{dh}{dt} = k$$

ou

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{2}{5} h^{5/2} \right) = k$$

Integrando-se ambos os lados

$$\frac{2}{5} h^{5/2} = kt + C$$

ou

$$h(t) = (C' + k't)^{2/5}$$

Substituindo $t = 0$ e $h = 2$:

$$2^{5/2} = C'$$

Substituindo $t = 30$ e $h = 1$:

$$C' + 30k' = 1 \quad \Rightarrow \quad k' = \frac{1 - C'}{30} = \frac{1 - 2^{5/2}}{30}$$

Assim, a função que descreve como a altura varia com o tempo é dada por

$$h(t) = (C' + k't)^{2/5} = (2^{5/2} + \frac{1 - 2^{5/2}}{30} t)^{2/5}$$

Substituindo $h = 0$:

$$t = -\frac{C'}{k'} = -\frac{30 \cdot 2^{5/2}}{1 - 2^{5/2}} \approx 36 \text{ min}$$

6.15. (a) A temperatura registrada no termômetro, $T(t)$, é a solução do problema de valor inicial

$$\begin{cases} \frac{dT}{dt} = k(T-5). \\ T(0) = 20 \end{cases}$$

$$\frac{dT}{dt} = k(T-5)$$

$$\frac{1}{T-5} \frac{dT}{dt} = k$$

$$\frac{d}{dt} (\ln |T-5|) = k$$

$$\ln |T-5| = kt$$

$$\ln |T-5| = C_1 + kt$$

$$T(t) = 5 + Ce^{kt}$$

Substituindo $t = 0$ e $T = 20$:

$$20 = 5 + C \Rightarrow C = 15$$

$$T(t) = 5 + 15e^{kt}$$

Substituindo $t = 1/2$ e $T = 15$:

$$15 = 5 + 15e^{k/2} \Rightarrow k = 2 \ln(2/3)$$

Assim, a temperatura do café em função do tempo é dada por

$$T(t) = 5 + 15e^{2 \ln(2/3)t} = 5 + 15 \cdot \left(\frac{2}{3}\right)^{2t}$$

(b) Após 1 minuto o termômetro deve marcar

$$T(1) = 5 + 15 \left(\frac{2}{3} \right)^2 = \frac{105}{9} \approx 11,7^\circ \text{C}$$

(c) Substituindo $T = 10$ em $T(t) = 5 + 15e^{2\ln(2/3)t}$:

$$10 = 5 + 15e^{2\ln(2/3)t}$$

Logo, o tempo necessário para que o termômetro marque 10° é de

$$t = \frac{\ln(1/3)}{2\ln(2/3)} \approx 1 \text{ min e } 20 \text{ segundos}$$

6.16. (a)

$$120 \frac{dv}{dt} = 10 - 2v$$

$$\frac{120}{10 - 2v} \frac{dv}{dt} = 1$$

$$\frac{d}{dt} (-60 \ln |10 - 2v|) = 1$$

$$60 \ln |10 - 2v| = -t + C_1$$

$$\ln |10 - 2v| = \frac{C_1 - t}{60}$$

$$v(t) = 5 - Ce^{-\frac{t}{60}}$$

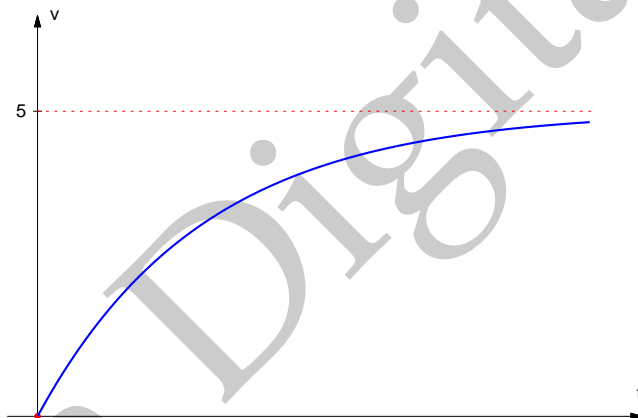
Substituindo-se $t = 0$ e $v = 0$:

$$0 = 5 - C \quad \Rightarrow \quad C = 5$$

$$v(t) = 5 - 5e^{-\frac{t}{60}}$$

(b)

$$\lim_{t \rightarrow \infty} v(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} (5 - 5e^{-\frac{t}{60}}) = 5 \text{ m/s}$$



6.17. (a)

$$\begin{cases} \frac{dS}{dt} = \frac{1}{100}S + d. \\ S(0) = 0 \end{cases}$$

A equação é linear e pode ser reescrita como

$$\frac{dS}{dt} - \frac{1}{100}S = d.$$

Para resolvê-la precisamos determinar o fator integrante

$$\mu(t) = e^{\int -\frac{1}{100} dt} = e^{-\frac{1}{100}t}$$

Multiplicando-se a equação diferencial por $\mu(t) = e^{-\frac{1}{100}t}$ obtemos

$$\frac{d}{dt}(e^{-\frac{1}{100}t}S) = de^{-\frac{1}{100}t}$$

Integrando-se ambos os membros obtemos

$$e^{-\frac{1}{100}t}S(t) = -100de^{-\frac{1}{100}t} + C$$

ou

$$S(t) = Ce^{\frac{1}{100}t} - 100d$$

Substituindo-se $t = 0$ e $S = 0$, obtemos

$$0 = Ce^{\frac{1}{100}0} - 100d \Rightarrow C = 100d$$

Ou seja, a solução do problema de valor inicial é

$$S(t) = 100d(e^{\frac{1}{100}t} - 1).$$

Substituindo-se $d = 100$, $t = 20 \cdot 12 = 240$ obtemos

$$S(240) = 10000(e^{2,4} - 1) \approx \text{R\$ } 100231,00$$

(b)

$$\begin{cases} \frac{dS}{dt} = \frac{1}{100}S - d. \\ S(0) = 100231 \end{cases}$$

A solução da equação é obtida da anterior trocando-se d por $-d$.

$$S(t) = Ce^{\frac{1}{100}t} + 100d$$

Substituindo-se $t = 0$ e $S = 100231$ obtemos

$$100231 = C + 100d \Rightarrow C = 100231 - 100d$$

Assim,

$$S(t) = (100231 - 100d)e^{\frac{1}{100}t} + 100d$$

Substituindo-se $t = 20 \cdot 12 = 240$ e $S = 0$ obtemos

$$0 = (100231 - 100d)e^{2,4} + 100d$$

$$d = \frac{100231e^{2,4}}{100(e^{2,4} - 1)} \approx \text{R\$ } 1102,00$$

6.18.

$$200 \frac{dQ}{dt} + 10^4 Q = 10.$$

$$\frac{dQ}{dt} + 50Q = 5 \cdot 10^{-2}.$$

A equação é linear. Multiplicando-se a equação pelo fator integrante $\mu(t) = e^{50t}$ obtemos

$$\frac{d}{dt} (e^{50t} Q) = 5 \cdot 10^{-2} e^{50t}$$

integrando-se obtemos

$$e^{50t} Q(t) = 10^{-3} e^{50t} + k$$

ou

$$Q(t) = 10^{-3} + ke^{-50t}$$

Substituindo-se $t = 0$ e $Q = 0$ obtemos $k = -10^{-3}$ e assim a solução do problema de valor inicial é

$$Q(t) = 10^{-3} (1 - e^{-50t}) \text{ coulombs.}$$

$$I(t) = \frac{dQ}{dt} = 5 \cdot 10^{-2} e^{-50t} \text{ amperes}$$

6.19. Para este circuito a segunda lei de Kirchhoff nos dá

$$RI + L \frac{dI}{dt} = V(t).$$

Ou seja,

$$5 \cdot 10^{-1} \frac{dI}{dt} + 10^2 I = 10.$$

$$\frac{dI}{dt} + 200I = 20.$$

A equação é linear. Multiplicando-se a equação pelo fator integrante $\mu(t) = e^{200t}$ obtemos

$$\frac{d}{dt} (e^{200t} I) = 20e^{200t}$$

integrando-se obtemos

$$e^{200t} I(t) = 10^{-1} e^{200t} + k$$

ou

$$I(t) = 10^{-1} + ke^{-200t}$$

Substituindo-se $t = 0$ e $I = 0$ obtemos $k = -10^{-1}$ e assim a solução do problema de valor inicial é

$$I(t) = 10^{-1} (1 - e^{-200t}) \text{ amperes.}$$

6.20. (a)

$$\frac{dy}{dt} = -ky^2,$$

em que $y(t)$ é a concentração da substância como função do tempo e $k > 0$ é a constante cinética. Multiplicando-se a equação diferencial por $1/y^2$ obtemos a equação

$$\frac{1}{y^2} y' = -k.$$

Esta é uma equação separável. Integrando-se em relação a t e substituindo-se $y' dt = dy$ obtemos que a solução geral da equação diferencial é dada implicitamente por

$$\frac{1}{y} = kt + c.$$

Substituindo-se $t = 0$ e $y = y_0$ obtemos que $c = 1/y_0$.

$$\frac{1}{y} = kt + \frac{1}{y_0}.$$

Explicitando-se $y(t)$ obtemos que a concentração da substância em função do tempo é dada por

$$y(t) = \frac{1}{kt + 1/y_0}.$$

$$y(t) = \frac{1}{5 \times 10^{-4}t + 20}.$$

(b) Para a meia-vida $t = t_{1/2}$, teremos $y = y_0/2$. Assim,

$$\frac{2}{y_0} = kt_{1/2} + \frac{1}{y_0}.$$

Logo a meia-vida da substância é dada por

$$t_{1/2} = \frac{1}{ky_0}.$$

$$t_{1/2} = \frac{1}{2 \times 10^{-6}} = 5 \times 10^5 \text{ s}.$$

6.21. (a) O triângulo QOP é isósceles e assim

$$y' = \tan \alpha = \frac{y}{x + ||OP||} = \frac{y}{x + ||OQ||} = \frac{y}{x + \sqrt{x^2 + y^2}}.$$

(b) Multiplicando-se numerador e denominador da equação anterior por $x - \sqrt{x^2 + y^2}$ obtemos

$$y' = \frac{y(x - \sqrt{x^2 + y^2})}{x^2 - (x^2 + y^2)} = \frac{x - \sqrt{x^2 + y^2}}{-y}$$

ou

$$\frac{x - \sqrt{x^2 + y^2}}{y} + y' = 0.$$

Multiplicando-se a equação por $\mu(x, y) = \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}}$ obtemos

$$\frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}} - 1 + \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}} \frac{dy}{dx} = 0.$$

Sejam $M(x, y) = \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}} - 1$ e $N(x, y) = \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}}$.

$$\frac{\partial M}{\partial y} = -\frac{xy}{(y^2 + x^2)^{\frac{3}{2}}} = \frac{\partial N}{\partial x}.$$

Logo a equação é exata. Seja

$$\psi(x, y) = \int M dx = \int \left(\frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}} - 1 \right) dx = \sqrt{x^2 + y^2} - x + h(y).$$

$$N = \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}} = \frac{\partial \psi}{\partial y} = \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}} + h'(y).$$

Logo $h'(y) = 0$ e assim $h(y) = c_1$. Assim, a solução geral da equação diferencial é dada implicitamente por

$$\psi(x, y) = \sqrt{x^2 + y^2} - x = c.$$

ou ou

$$\text{dist}(P, O) = \text{dist}(P, r),$$

em que $r : x = -c$.

As curvas são parábolas.

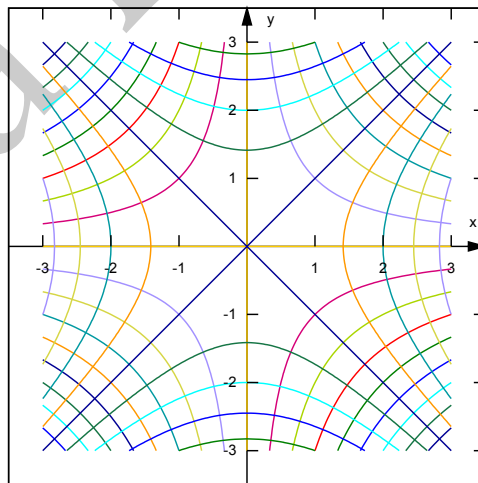
- 6.22. (a) Da equação das hipérbolas obtemos que $c = xy$. Derivando a equação da família dada obtemos a equação diferencial para as hipérbolas dadas é

$$\frac{dy}{dx} = -\frac{c}{x^2} = -\frac{y}{x}$$

Portanto, a equação diferencial para as trajetórias ortogonais é

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

$$\frac{y^2}{2} - \frac{x^2}{2} = c$$



(b) Da equação da família dada temos que $c = \frac{x^2 + y^2}{2y}$. Derivando a equação da família dada obtemos

$$2x + 2(y - c) \frac{dy}{dx} = 0$$

Assim, a equação diferencial para a família de curvas dadas é

$$\frac{dy}{dx} = \frac{2xy}{x^2 - y^2}$$

E para a família de trajetórias ortogonais

$$\frac{dy}{dx} = -\frac{x^2 - y^2}{2xy}$$

cujas solução é

$$\frac{y^2}{x} + x = c_1.$$

Multiplicando-se por x obtemos

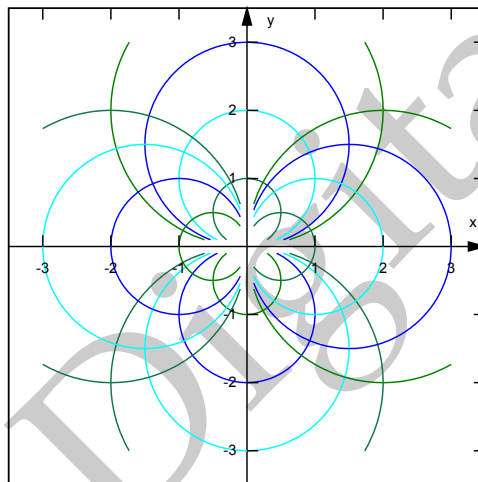
$$y^2 + x^2 = c_1x \quad \text{ou} \quad y^2 + x^2 - c_1x = 0.$$

Completando-se o quadrado obtemos

$$y^2 + (x - c_1/2)^2 - (c_1/2)^2 = 0 \quad \text{ou} \quad y^2 + (x - c_1/2)^2 = (c_1/2)^2.$$

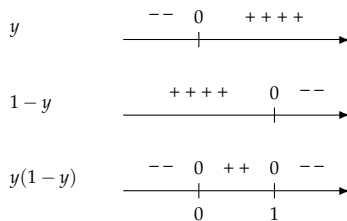
Trocando-se $c_1/2$ por c obtemos

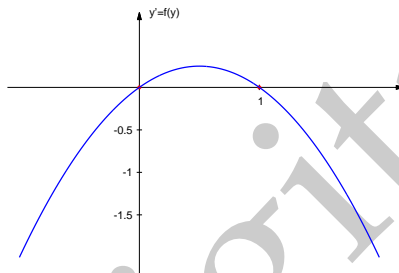
$$(x - c)^2 + y^2 = c^2$$



7. Análise Qualitativa de Equações Autônomas (página 150)

7.1. (a) Os pontos de equilíbrio são $y_1 = 0$ e $y_2 = 1$.





$y_1 = 0$ é ponto de equilíbrio instável pois para valores de y próximos de $y_1 = 0$ temos

- $\frac{dy}{dt} = f(y) < 0$, para $y < y_1 = 0$
- $\frac{dy}{dt} = f(y) > 0$, para $y > y_1 = 0$.

O que implica que se $y(0)$ é próximo de $y_1 = 0$ a solução correspondente $y(t)$ está se afastando de $y_1 = 0$, quando t cresce.

$y_2 = 1$ é ponto de equilíbrio estável pois para valores de y próximos de $y_2 = 1$ temos

- $\frac{dy}{dt} = f(y) > 0$, para $y < y_2 = 1$
- $\frac{dy}{dt} = f(y) < 0$, para $y > y_2 = 1$.

O que implica que se $y(0)$ é próximo de $y_2 = 1$ a solução correspondente $y(t)$ está se aproximando de $y_2 = 1$, quando t cresce.

- (b) Como $\frac{dy}{dt} = y - y^2 > 0$, para $0 < y < 1$, então as soluções são crescentes para $0 < y < 1$. Como $\frac{dy}{dt} = y - y^2 < 0$, para $y < 0$ e para $y > 1$, então as soluções são decrescentes para $y < 0$ e para $y > 1$.

(c)

$$\frac{d^2y}{dt^2} = \frac{d}{dt} \frac{dy}{dt} = \frac{d}{dt}(y - y^2).$$

Mas pela regra da cadeia

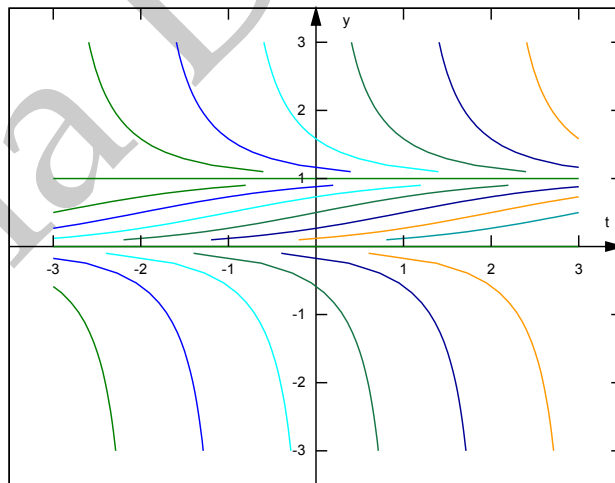
$$\frac{d}{dt}(y - y^2) = (1 - 2y) \frac{dy}{dt} = (1 - 2y)(y - y^2).$$

Assim,

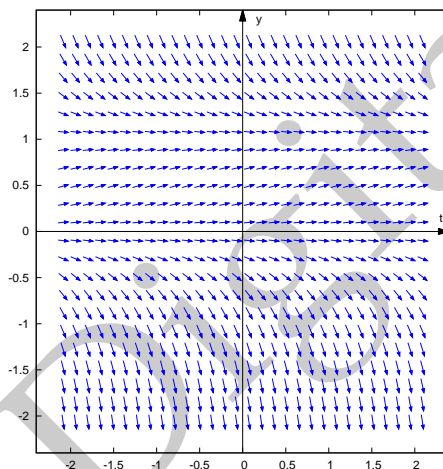
$$\frac{d^2y}{dt^2} = (1 - 2y)(y - y^2).$$

Logo, as soluções têm pontos de inflexão para $y = 1/2$, $y = 0$ e $y = 1$.

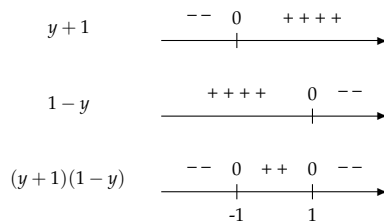
(d)

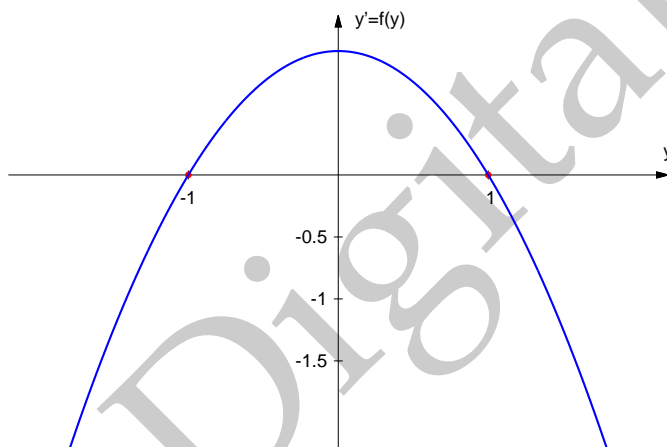


(e)



7.2. (a) Os pontos de equilíbrio são $y_1 = -1$ e $y_2 = 1$.





$y_1 = -1$ é ponto de equilíbrio instável pois para valores de y próximos de $y_1 = -1$ temos

- $\frac{dy}{dt} = f(y) < 0$, para $y < y_1 = -1$
- $\frac{dy}{dt} = f(y) > 0$, para $y > y_1 = -1$.

O que implica que se $y(0)$ é próximo de $y_1 = -1$ a solução correspondente $y(t)$ está se afastando de $y_1 = -1$, quando t cresce.

$y_2 = 1$ é ponto de equilíbrio estável pois para valores de y próximos de $y_2 = 1$ temos

- $\frac{dy}{dt} = f(y) > 0$, para $y < y_2 = 1$
- $\frac{dy}{dt} = f(y) < 0$, para $y > y_2 = 1$.

O que implica que se $y(0)$ é próximo de $y_2 = 1$ a solução correspondente $y(t)$ está se aproximando de $y_2 = 1$, quando t cresce.

(b) Como $\frac{dy}{dt} = 1 - y^2 > 0$, para $-1 < y < 1$, então as soluções são crescentes para $-1 < y < 1$. Como $\frac{dy}{dt} = 1 - y^2 < 0$, para $y < -1$ e para $y > 1$, então as soluções são decrescentes para $y < -1$ e para $y > 1$.

(c)

$$\frac{d^2y}{dt^2} = \frac{d}{dt} \frac{dy}{dt} = \frac{d}{dt} (1 - y^2).$$

Mas pela regra da cadeia

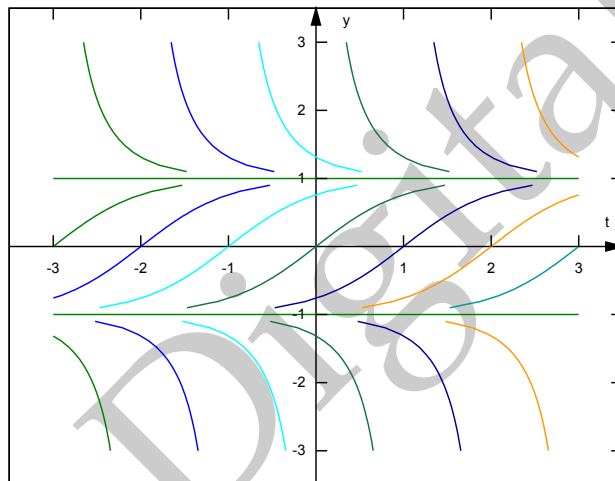
$$\frac{d}{dt} (1 - y^2) = -2y \frac{dy}{dt} = -2y(1 - y^2).$$

Assim,

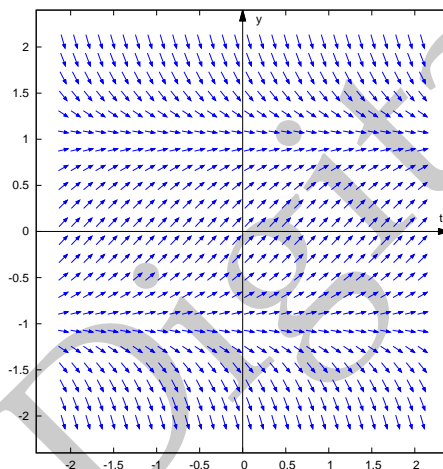
$$\frac{d^2y}{dt^2} = -2y(1 - y^2).$$

Logo, as soluções têm pontos de inflexão para $y = -1$, $y = 0$ e $y = 1$.

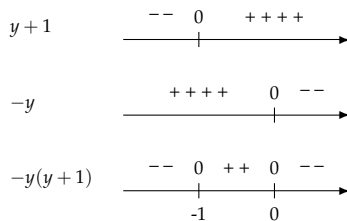
(d)

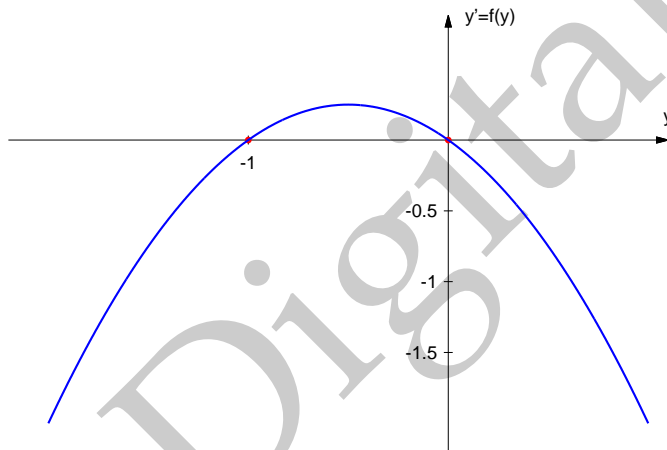


(e)



7.3. (a) Os pontos de equilíbrio são $y_1 = -1$ e $y_2 = 0$.





$y_1 = -1$ é ponto de equilíbrio instável pois para valores de y próximos de $y_1 = -1$ temos

- $\frac{dy}{dt} = f(y) < 0$, para $y < y_1 = -1$
- $\frac{dy}{dt} = f(y) > 0$, para $y > y_1 = -1$.

O que implica que se $y(0)$ é próximo de $y_1 = -1$ a solução correspondente $y(t)$ está se afastando de $y_1 = -1$, quando t cresce.

$y_2 = 0$ é ponto de equilíbrio estável pois para valores de y próximos de $y_2 = 0$ temos

- $\frac{dy}{dt} = f(y) > 0$, para $y < y_2 = 0$
- $\frac{dy}{dt} = f(y) < 0$, para $y > y_2 = 0$.

O que implica que se $y(0)$ é próximo de $y_2 = 0$ a solução correspondente $y(t)$ está se aproximando de $y_2 = 0$, quando t cresce.

- (b) Como $\frac{dy}{dt} = -y - y^2 > 0$, para $-1 < y < 0$, então as soluções são crescentes para $-1 < y < 0$.
Como $\frac{dy}{dt} = -y - y^2 < 0$, para $y < -1$ e para $y > 0$, então as soluções são decrescentes para $y < -1$ e para $y > 0$.

(c)

$$\frac{d^2y}{dt^2} = \frac{d}{dt} \frac{dy}{dt} = \frac{d}{dt} (-y^2 - y).$$

Mas pela regra da cadeia

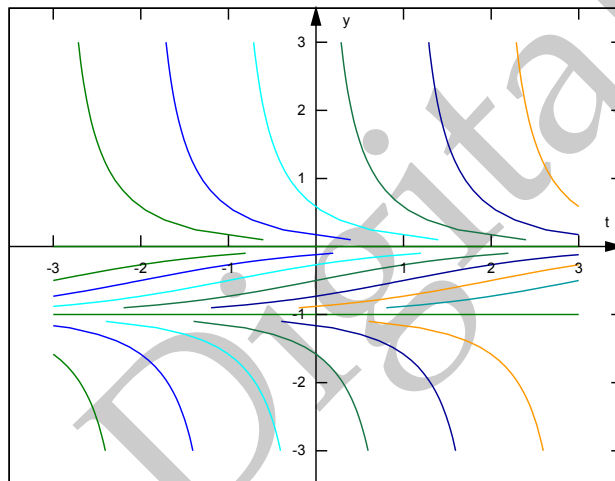
$$\frac{d}{dt} (-y^2 - y) = -(2y + 1) \frac{dy}{dt} = (2y + 1)(y^2 + y).$$

Assim,

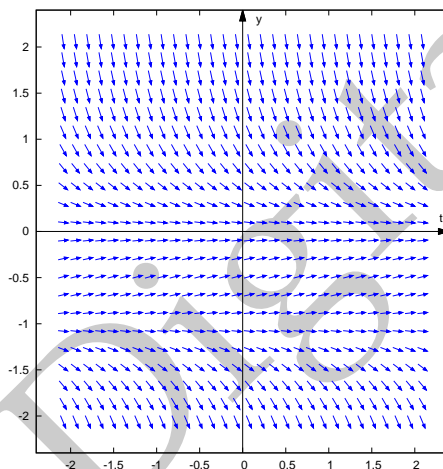
$$\frac{d^2y}{dt^2} = (2y + 1)(y^2 + y).$$

Logo, as soluções têm pontos de inflexão para $y = -1$, $y = 0$ e $y = -1/2$.

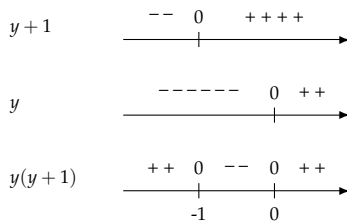
(d)

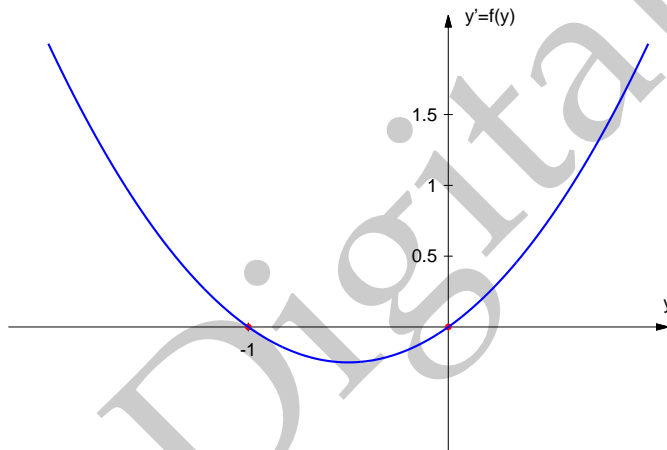


(e)



7.4. (a) Os pontos de equilíbrio são $y_1 = -1$ e $y_2 = 0$.





$y_1 = -1$ é ponto de equilíbrio estável pois para valores de y próximos de $y_1 = -1$ temos

- $\frac{dy}{dt} = f(y) > 0$, para $y < y_1 = -1$
- $\frac{dy}{dt} = f(y) < 0$, para $y > y_1 = -1$.

O que implica que se $y(0)$ é próximo de $y_1 = -1$ a solução correspondente $y(t)$ está se aproximando de $y_1 = -1$, quando t cresce.

$y_2 = 0$ é ponto de equilíbrio instável pois para valores de y próximos de $y_2 = 0$ temos

- $\frac{dy}{dt} = f(y) < 0$, para $y < y_2 = 0$
- $\frac{dy}{dt} = f(y) > 0$, para $y > y_2 = 0$.

O que implica que se $y(0)$ é próximo de $y_2 = 0$ a solução correspondente $y(t)$ está se afastando de $y_2 = 0$, quando t cresce.

- (b) Como $\frac{dy}{dt} = y + y^2 < 0$, para $-1 < y < 0$, então as soluções são decrescentes para $-1 < y < 0$.
Como $\frac{dy}{dt} = y + y^2 < 0$, para $y < -1$ e para $y > 0$, então as soluções são crescentes para $y < -1$ e para $y > 0$.

(c)

$$\frac{d^2y}{dt^2} = \frac{d}{dt} \frac{dy}{dt} = \frac{d}{dt}(y^2 + y).$$

Mas pela regra da cadeia

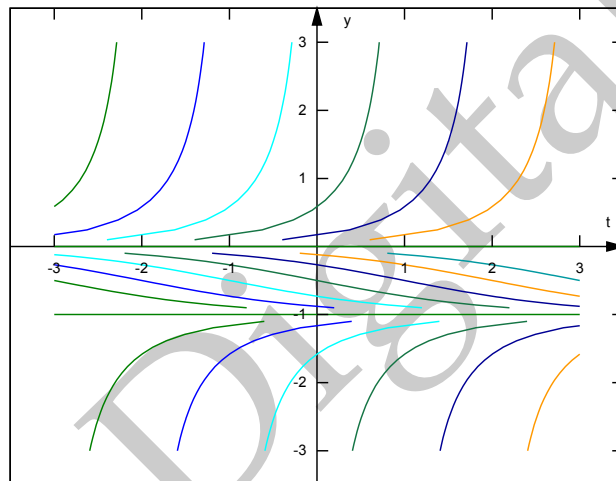
$$\frac{d}{dt}(y^2 + y) = (2y + 1) \frac{dy}{dt} = (2y + 1)(y^2 + y).$$

Assim,

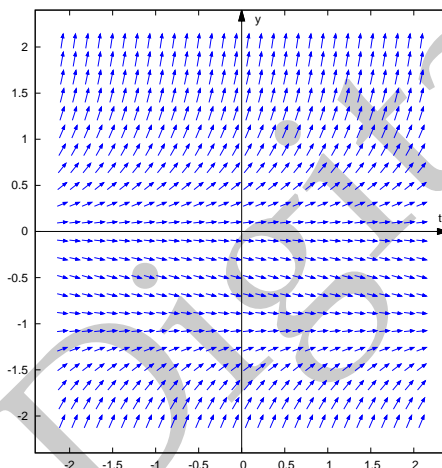
$$\frac{d^2y}{dt^2} = (2y + 1)(y^2 + y).$$

Logo, as soluções têm pontos de inflexão para $y = -1$, $y = 0$ e $y = -1/2$.

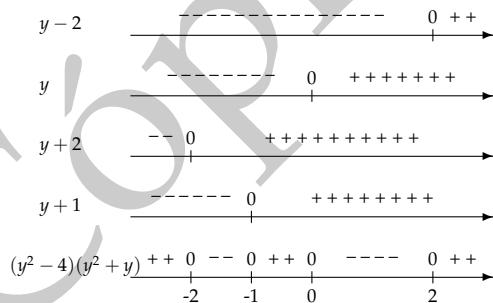
(d)

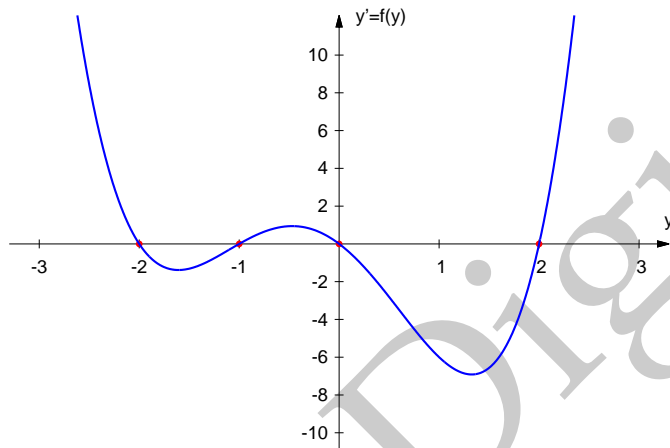


(e)



- 7.5. (a) Os pontos de equilíbrio são as raízes de $f(y) = (y^2 - 4)(y^2 + y)$, ou seja, $y_1 = -2$, $y_2 = -1$, $y_3 = 0$ e $y_4 = 2$.





i. $y_1 = -2$ é ponto de equilíbrio estável pois para valores de y próximos de $y_1 = -2$ temos

- $y' = f(y) > 0$, para $y < y_1 = -2$
- $y' = f(y) < 0$, para $y > y_1 = -2$.

O que implica que se $y_0 = y(0)$ é próximo de $y_1 = -2$ a solução correspondente $y(t)$ está se aproximando de $y_1 = -2$, quando t cresce.

ii. $y_2 = -1$ é ponto de equilíbrio instável pois para valores de y próximos de $y_2 = -1$ temos

- $y' = f(y) > 0$, para $y < y_2 = -1$
- $y' = f(y) < 0$, para $y > y_2 = -1$.

O que implica que se $y(0)$ é próximo de $y_2 = -1$ a solução correspondente $y(t)$ está se afastando de $y_2 = -1$, quando t cresce.

iii. $y_3 = 0$ é ponto de equilíbrio estável pois para valores de y próximos de $y_3 = 0$ temos

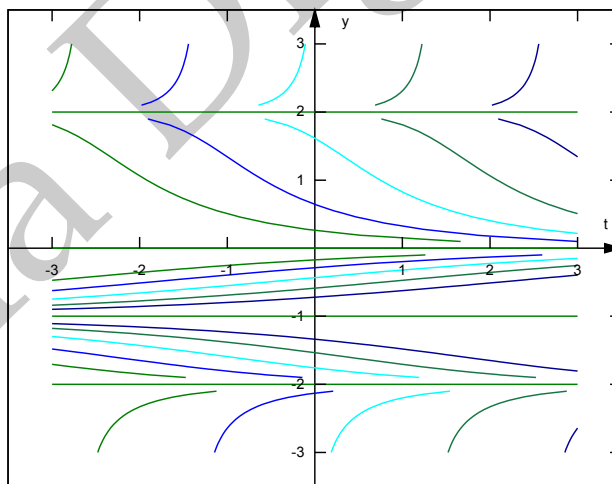
- $y' = f(y) > 0$, para $y < y_3 = 0$
- $y' = f(y) < 0$, para $y > y_3 = 0$.

O que implica que se $y_0 = y(0)$ é próximo de $y_3 = 0$ a solução correspondente $y(t)$ está se aproximando de $y_3 = 0$, quando t cresce.

iv. $y_4 = 2$ é ponto de equilíbrio instável pois para valores de y próximos de $y_4 = 2$ temos

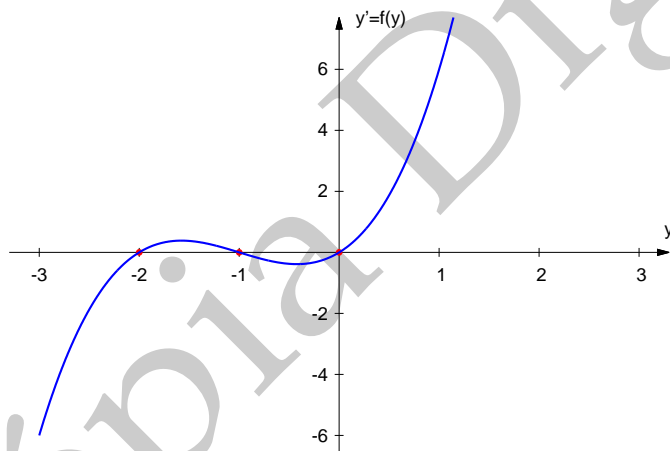
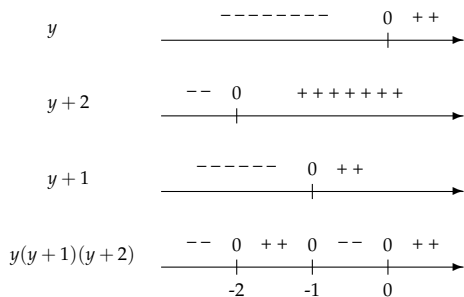
- $y' = f(y) > 0$, para $y < y_4 = 2$
- $y' = f(y) < 0$, para $y > y_4 = 2$.

O que implica que se $y(0)$ é próximo de $y_4 = 2$ a solução correspondente $y(t)$ está se afastando de $y_4 = 2$, quando t cresce.



(b) Os pontos de equilíbrio são as raízes de

$$f(y) = y(y^2 + 3y + 2), \text{ ou seja, } y_1 = -2, y_2 = -1 \text{ e } y_3 = 0.$$



- i. $y_1 = -2$ é ponto de equilíbrio instável pois para valores de y próximos de $y_1 = -2$ temos
- $y' = f(y) < 0$, para $y < y_1 = -2$
 - $y' = f(y) > 0$, para $y > y_1 = -2$.

O que implica que se $y_0 = y(0)$ é próximo de $y_1 = -2$ a solução correspondente $y(t)$ está se afastando de $y_1 = -2$, quando t cresce.

ii. $y_2 = -1$ é ponto de equilíbrio estável pois para valores de y próximos de $y_2 = -1$ temos

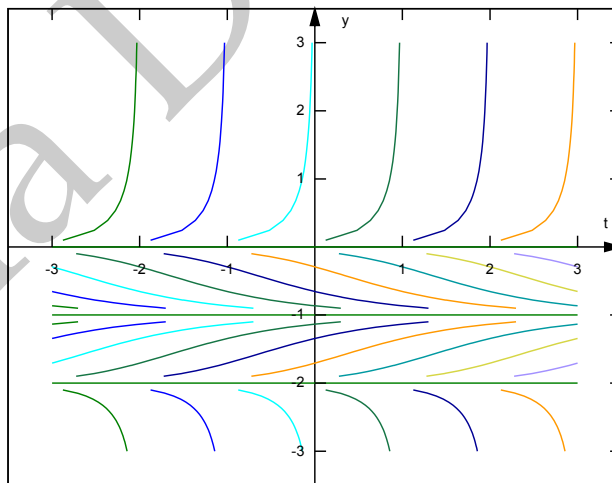
- $y' = f(y) > 0$, para $y < y_2 = -1$
- $y' = f(y) < 0$, para $y > y_2 = -1$.

O que implica que se $y_0 = y(0)$ é próximo de $y_2 = -1$ a solução correspondente $y(t)$ está se aproximando de $y_2 = -1$, quando t cresce.

iii. $y_3 = 0$ é ponto de equilíbrio instável pois para valores de y próximos de $y_3 = 0$ temos

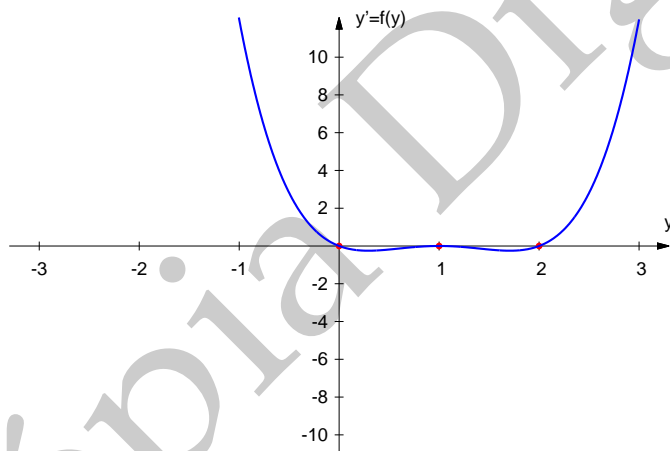
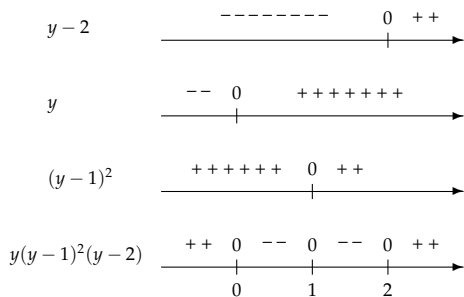
- $y' = f(y) < 0$, para $y < y_3 = 0$
- $y' = f(y) > 0$, para $y > y_3 = 0$.

O que implica que se $y(0)$ é próximo de $y_3 = 0$ a solução correspondente $y(t)$ está se afastando de $y_3 = 0$, quando t cresce.



(c) Os pontos de equilíbrio são as raízes de

$$f(y) = y(y-1)^2(y-2), \text{ ou seja, } y_1 = 2, y_2 = 1 \text{ e } y_3 = 0.$$



i. $y_1 = 2$ é ponto de equilíbrio instável pois para valores de y próximos de $y_1 = 2$ temos

- $y' = f(y) < 0$, para $y < y_1 = 2$
- $y' = f(y) > 0$, para $y > y_1 = 2$.

O que implica que se $y_0 = y(0)$ é próximo de $y_1 = -2$ a solução correspondente $y(t)$ está se afastando de $y_1 = 2$, quando t cresce.

ii. $y_2 = 1$ é ponto de equilíbrio instável pois para valores de y próximos de $y_2 = 1$ temos

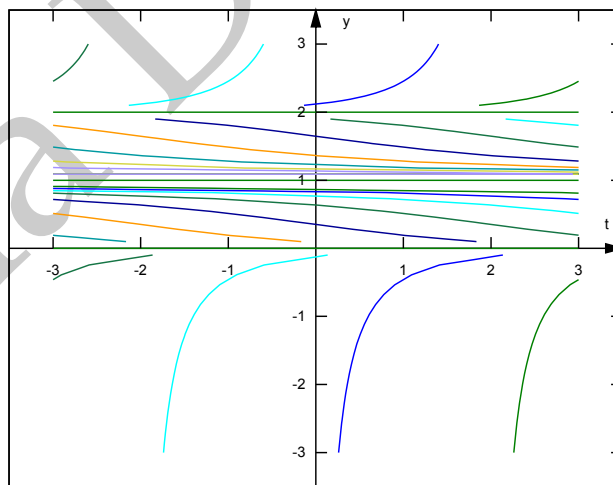
- $y' = f(y) < 0$, para $y < y_2 = 1$
- $y' = f(y) < 0$, para $y > y_2 = 1$.

O que implica que se $y_0 = y(0)$ é próximo de $y_2 = 1$, com $y_0 < y_2 = 1$, a solução correspondente $y(t)$ está se afastando de $y_2 = 1$, quando t cresce.

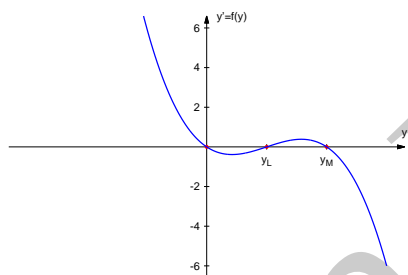
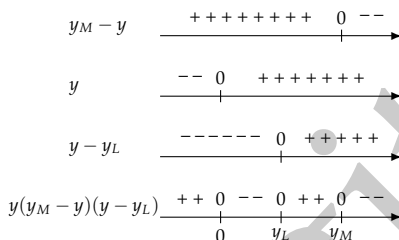
iii. $y_3 = 0$ é ponto de equilíbrio estável pois para valores de y próximos de $y_3 = 0$ temos

- $y' = f(y) > 0$, para $y < y_3 = 0$
- $y' = f(y) < 0$, para $y > y_3 = 0$.

O que implica que se $y(0)$ é próximo de $y_3 = 0$ a solução correspondente $y(t)$ está se aproximando de $y_3 = 0$, quando t cresce.



7.6. Os pontos de equilíbrio são $y_1 = 0$, $y_2 = y_L$ e $y_3 = y_M$.



(a) $y_1 = 0$ é ponto de equilíbrio estável pois para valores de y próximos de $y_1 = 0$ temos

- $y' = f(y) > 0$, para $y < y_1 = 0$
- $y' = f(y) < 0$, para $y > y_3 = 0$.

O que implica que se $y_0 = y(0)$ é próximo de $y_1 = 0$ a solução correspondente $y(t)$ está se aproximando de $y_1 = 0$, quando t cresce.

(b) $y_2 = y_L$ é ponto de equilíbrio instável pois para valores de y próximos de $y_2 = y_L$ temos

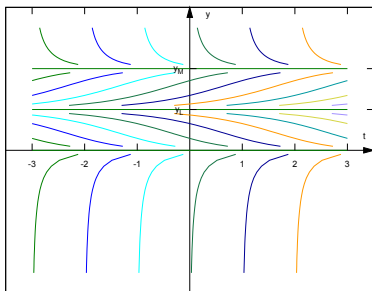
- $y' = f(y) > 0$, para $y < y_2 = y_L$
- $y' = f(y) < 0$, para $y > y_2 = y_L$.

O que implica que se $y(0)$ é próximo de $y_2 = y_L$ a solução correspondente $y(t)$ está se afastando de $y_2 = y_L$, quando t cresce.

(c) $y_3 = y_M$ é ponto de equilíbrio estável pois para valores de y próximos de $y_3 = y_M$ temos

- $y' = f(y) > 0$, para $y < y_3 = y_M$
- $y' = f(y) < 0$, para $y > y_3 = y_M$.

O que implica que se $y_0 = y(0)$ é próximo de $y_3 = y_M$ a solução correspondente $y(t)$ está se aproximando de $y_3 = y_M$, quando t cresce.



8. Existência e Unicidade (página 163)

8.1. (a)

$$f(t, y) = \sqrt{y^2 - 4} \Rightarrow \frac{\partial f}{\partial y} = \frac{y}{\sqrt{y^2 - 4}}.$$

Para os pontos $(t_0, y_0) \in \mathbb{R}^2$ tais que $y_0 < -2$ ou $y_0 > 2$ o problema de valor inicial tem solução única.

(b)

$$f(t, y) = \sqrt{ty} \Rightarrow \frac{\partial f}{\partial y} = \frac{t}{2\sqrt{ty}}.$$

Para os pontos $(t_0, y_0) \in \mathbb{R}^2$ tais que $y_0 t_0 > 0$ o problema de valor inicial tem solução única.

(c)

$$f(t, y) = \frac{y^2}{t^2 + y^2} \Rightarrow \frac{\partial f}{\partial y} = \frac{2t^2 y}{(t^2 + y^2)^2}.$$

Para os pontos $(t_0, y_0) \in \mathbb{R}^2$ tais que $(t_0, y_0) \neq (0, 0)$ o problema de valor inicial tem solução única.

(d)

$$f(t, y) = t\sqrt{1 - y^2} \Rightarrow \frac{\partial f}{\partial y} = -\frac{ty}{\sqrt{1 - y^2}}.$$

Para os pontos $(t_0, y_0) \in \mathbb{R}^2$ tais que $-1 < y_0 < 1$ o problema de valor inicial tem solução única.

(e)

$$f(t, y) = \frac{2t - y}{t - 2y} \Rightarrow \frac{\partial f}{\partial y} = \frac{3t}{(t - 2y)^2}$$

Para os pontos $(t_0, y_0) \in \mathbb{R}^2$ tais que $y_0 \neq t_0/2$ o problema de valor inicial tem solução única.

(f)

$$f(t, y) = \frac{2ty}{y - t^2} \Rightarrow \frac{\partial f}{\partial y} = \frac{-2t^3}{(y - t^2)^2}$$

Para os pontos $(t_0, y_0) \in \mathbb{R}^2$ tais que $y_0 \neq t_0^2$ o problema de valor inicial tem solução única.

8.2. (a)

$$p(t) = \frac{t - 2}{t^2 - 1} = \frac{t - 2}{(t - 1)(t + 1)}$$

$$q(t) = \frac{t}{t^2 - 1} = \frac{t}{(t - 1)(t + 1)}.$$

Como $t_0 = 0$, então o problema de valor inicial tem solução no intervalo $-1 < t < 1$.

(b)

$$p(t) = \frac{t}{t^2 - 1} = \frac{t}{(t - 1)(t + 1)}$$

$$q(t) = \frac{t^2}{t^2 - 1} = \frac{t^2}{(t-1)(t+1)}.$$

Como $t_0 = 2$, então o problema de valor inicial tem solução no intervalo $t > 1$.

(c)

$$p(t) = \frac{t+1}{t^2-t} = \frac{t+1}{t(t-1)}$$

$$q(t) = \frac{e^t}{t^2-t} = \frac{e^t}{t(t-1)}.$$

Como $t_0 = -1$, então o problema de valor inicial tem solução no intervalo $t < 0$.

(d)

$$p(t) = \frac{t+3}{t^2-t} = \frac{t+3}{t(t-1)}$$

$$q(t) = \frac{\cos t}{t^2-t} = \frac{\cos t}{t(t-1)}.$$

Como $t_0 = 2$, então o problema de valor inicial tem solução no intervalo $t > 1$.

8.3. Seja t fixo, tal que $\alpha < t < \beta$. Pelo Teorema do Valor Médio, dados y e z com $\delta < y, z < \gamma$ existe ξ entre y e z tal que

$$f(t, y) - f(t, z) = \frac{\partial f}{\partial y}(t, \xi) (y - z).$$

Seja $a = \max_{\delta < w < \gamma} \left| \frac{\partial f}{\partial y}(t, w) \right|$. Tomando-se o módulo da equação acima obtemos

$$|f(t, y) - f(t, z)| = \left| \frac{\partial f}{\partial y}(t, \xi) \right| |y - z| \leq a |y - z|.$$

8.4. Seja α^* o máximo entre α , o valor de $t < t_0$ tal que $\frac{b}{a} \left(e^{a|t-t_0|} - 1 \right) = \gamma$ e o valor de $t < t_0$ tal que $-\frac{b}{a} \left(e^{a|t-t_0|} - 1 \right) = \delta$. Seja β^* o mínimo entre β , o valor de $t > t_0$ tal que $\frac{b}{a} \left(e^{a|t-t_0|} - 1 \right) = \gamma$ e o valor de $t > t_0$ tal que $-\frac{b}{a} \left(e^{a|t-t_0|} - 1 \right) = \delta$. Vamos mostrar, por indução, que

$$|y_n(t) - y_0| \leq \frac{b}{a} \left(e^{a|t-t_0|} - 1 \right), \quad \text{para } \alpha^* < t < \beta^*$$

e assim que $\delta < y_n(t) < \gamma$, para $\alpha^* < t < \beta^*$.

$$\begin{aligned} |y_1(t) - y_0| &\leq b|t - t_0| \\ &= b \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a^{n-1}|t - t_0|^n}{n!} = \frac{b}{a} \left(e^{a|t-t_0|} - 1 \right) \end{aligned}$$

Vamos supor, por indução, que

$$|y_{n-1}(t) - y_{n-2}(t)| \leq a^{n-2}b \frac{|t - t_0|^{n-1}}{(n-1)!}$$

e

$$|y_k(t) - y_0| \leq \frac{b}{a} \left(e^{a|t-t_0|} - 1 \right),$$

para $k = 1, \dots, n-1$ e $\alpha^* < t < \beta^*$ e assim que $\delta < y_k(t) < \gamma$, para $k = 1, \dots, n-1$ e $\alpha^* < t < \beta^*$. Então, por (1.65) na página 159,

$$|y_n(t) - y_{n-1}(t)| \leq a^{n-1}b \frac{|t - t_0|^n}{n!}$$

e assim

$$\begin{aligned} |y_n(t) - y_0| &\leq \sum_{k=1}^n |y_k(t) - y_{k-1}(t)| \\ &\leq b \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a^{n-1}|t - t_0|^n}{n!} = \frac{b}{a} \left(e^{a|t-t_0|} - 1 \right) \end{aligned}$$

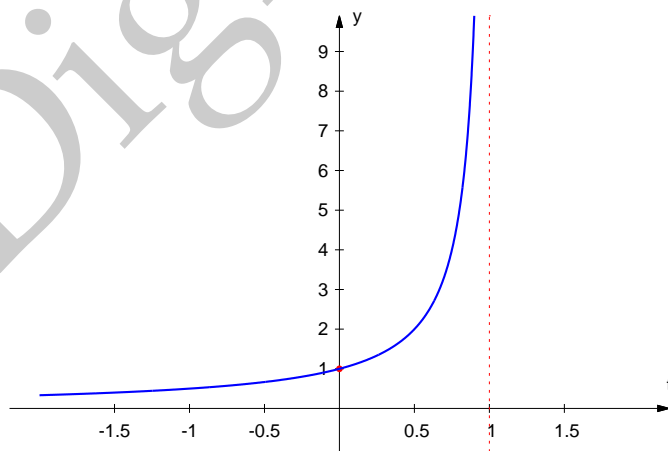


Figura 1.52. Solução do problema de valor inicial do Exemplo 1.35 para $t_0 = 0$ e $y_0 = 1$.

2

EQUAÇÕES DIFERENCIAIS LINEARES DE 2ª ORDEM

Para as equações diferenciais lineares de 2ª ordem é válido um resultado semelhante ao que é válido para equações lineares de 1ª ordem ([Teorema 1.2 na página 156](#)) com relação a existência e unicidade de soluções, mas a demonstração, infelizmente, não é tão simples quanto naquele caso e será apresentada somente ao final do Capítulo 4.

Teorema 2.1 (Existência e Unicidade). *O problema de valor inicial*

$$\begin{cases} y'' + p(t)y' + q(t)y = f(t) \\ y(t_0) = y_0, \quad y'(t_0) = y'_0, \end{cases}$$

para $p(t), q(t)$ e $f(t)$ funções contínuas em um intervalo aberto I contendo t_0 tem uma única solução neste intervalo.

Exemplo 2.1. Vamos determinar o intervalo máximo em que o problema de valor inicial

$$\begin{cases} y'' + \frac{1}{t-2}y' + \frac{\sin t}{t+2}y = \frac{e^t}{t} \\ y(t_0) = y_0, \quad y'(t_0) = y'_0, \end{cases}$$

tem solução. Para esta equação

$$p(t) = \frac{1}{t-2}, \quad q(t) = \frac{\sin t}{t+2}, \quad f(t) = \frac{e^t}{t}.$$

Assim, $p(t), q(t)$ e $f(t)$ são contínuas para $t \neq \pm 2, 0$. Se $t_0 < -2$ (por exemplo, $t_0 = -3$), então o PVI tem uma única solução no intervalo $t < -2$. Se $-2 < t_0 < 0$ (por exemplo, $t_0 = -1$), então o problema de valor inicial tem uma única solução no intervalo $-2 < t < 0$. Se $0 < t_0 < 2$ (por exemplo, $t_0 = 1$), então o problema de valor inicial tem uma única solução no intervalo $0 < t < 2$. Se $t_0 > 2$ (por exemplo, $t_0 = 3$), então o PVI tem uma única solução no intervalo $t > 2$.

2.1 Equações Homogêneas - Parte I

Uma equação diferencial linear de 2ª ordem é **homogênea** se ela pode ser escrita como

$$y'' + p(t)y' + q(t)y = 0. \quad (2.1)$$

Para as equações lineares homogêneas é válido o **princípio da superposição**.

Teorema 2.2 (Princípio da Superposição). Se $y_1(t)$ e $y_2(t)$ são soluções da equação homogênea (2.1), então

$$y(t) = c_1 y_1(t) + c_2 y_2(t) \quad (2.2)$$

para c_1 e c_2 constantes, também o é.

Demonstração. Vamos verificar que realmente $y(t)$ dado por (2.2) é solução de (2.1).

$$\begin{aligned} y''(t) + p(t)y'(t) + q(t)y(t) &= \\ &= (c_1 y_1(t) + c_2 y_2(t))'' + p(t)(c_1 y_1(t) + c_2 y_2(t))' + q(t)(c_1 y_1(t) + c_2 y_2(t)) \\ &= c_1 y_1''(t) + c_2 y_2''(t) + c_1 p(t)y_1'(t) + c_2 p(t)y_2'(t) + c_1 q(t)y_1(t) + c_2 q(t)y_2(t) \\ &= c_1 \underbrace{(y_1''(t) + p(t)y_1'(t) + q(t)y_1(t))}_{=0} + c_2 \underbrace{(y_2''(t) + p(t)y_2'(t) + q(t)y_2(t))}_{=0} \\ &= c_1 \cdot 0 + c_2 \cdot 0 = 0, \end{aligned}$$

pois $y_1(t)$ e $y_2(t)$ são soluções de (2.1). ■

Observe que a função nula, que é igual a zero para todo t é solução da equação homogênea (2.1). Usando a linguagem da Álgebra Linear podemos dizer que o conjunto das soluções de uma equação diferencial linear homogênea é um subespaço vetorial.

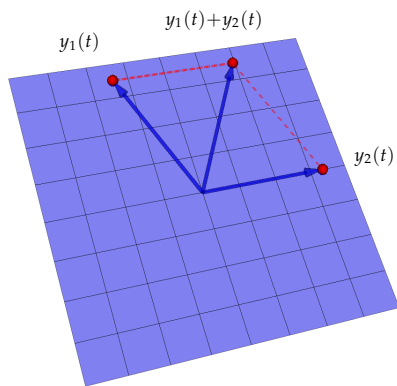


Figura 2.1. Soma de soluções de uma equação diferencial homogênea

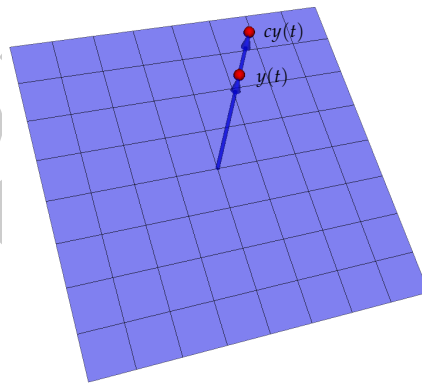


Figura 2.2. Multiplicação de solução de uma equação diferencial homogênea por escalar

2.1.1 Soluções Fundamentais

Considere, agora, o problema de valor inicial

$$\begin{cases} y'' + p(t)y' + q(t)y = 0, \\ y(t_0) = y_0, \quad y'(t_0) = y'_0, \end{cases} \quad (2.3)$$

em que y_0 e y'_0 são condições iniciais dadas no problema.

Vamos determinar condições sobre duas soluções $y_1(t)$ e $y_2(t)$ de (2.1) para que existam constantes c_1 e c_2 tais que $y(t) = c_1 y_1(t) + c_2 y_2(t)$ seja solução do problema de valor inicial (2.3).

Substituindo-se $t = t_0$ na solução da equação diferencial, $y(t) = c_1 y_1(t) + c_2 y_2(t)$, e na sua derivada, $y'(t) = c_1 y_1'(t) + c_2 y_2'(t)$, obtemos o sistema (algébrico) de equações lineares

$$\begin{cases} c_1 y_1(t_0) + c_2 y_2(t_0) = y_0 \\ c_1 y_1'(t_0) + c_2 y_2'(t_0) = y_0' \end{cases}$$

que pode ser escrito na forma

$$AX = B$$

em que

$$A = \begin{bmatrix} y_1(t_0) & y_2(t_0) \\ y_1'(t_0) & y_2'(t_0) \end{bmatrix}, \quad X = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad B = \begin{bmatrix} y_0 \\ y_0' \end{bmatrix}.$$

Se a matriz do sistema A é invertível, então para todo par de condições iniciais (y_0, y_0') o sistema tem uma única solução (c_1, c_2) (a solução é $X = A^{-1}B$). Mas uma matriz quadrada é invertível se, e somente se, o seu determinante é diferente de zero. Ou seja, se

$$\det \begin{bmatrix} y_1(t_0) & y_2(t_0) \\ y_1'(t_0) & y_2'(t_0) \end{bmatrix} \neq 0,$$

então para todo par de condições iniciais (y_0, y_0') existe um único par de constantes (c_1, c_2) tal que $y(t) = c_1 y_1(t) + c_2 y_2(t)$ é solução do problema de valor inicial (2.3).

Se além disso as soluções $y_1(t)$ e $y_2(t)$ estão definidas num intervalo I , onde $p(t)$ e $q(t)$ são contínuas, então pelo Teorema 2.1 de Existência e Unicidade,

$$y(t) = c_1 y_1(t) + c_2 y_2(t)$$

é a única solução do PVI no intervalo I e assim temos o resultado a seguir:

Teorema 2.3. *Sejam $y_1(t)$ e $y_2(t)$ duas soluções da equação (2.1) em um intervalo aberto I , onde $p(t)$ e $q(t)$ são contínuas, tais que, em um ponto $t_0 \in I$,*

$$\det \begin{bmatrix} y_1(t_0) & y_2(t_0) \\ y_1'(t_0) & y_2'(t_0) \end{bmatrix} \neq 0.$$

Então, para todo par de condições iniciais (y_0, y_0') , existem constantes c_1 e c_2 tais que o problema de valor inicial

$$\begin{cases} y'' + p(t)y' + q(t)y = 0, \\ y(t_0) = y_0, \quad y'(t_0) = y_0' \end{cases}$$

tem como única solução no intervalo I ,

$$y(t) = c_1 y_1(t) + c_2 y_2(t).$$

Definição 2.1. (a) O determinante

$$W[y_1, y_2](t_0) = \det \begin{bmatrix} y_1(t_0) & y_2(t_0) \\ y_1'(t_0) & y_2'(t_0) \end{bmatrix}$$

é chamado **wronskiano** das funções $y_1(t)$ e $y_2(t)$ em t_0 .

(b) Se duas soluções $y_1(t)$ e $y_2(t)$ de (2.1), em um intervalo aberto I , onde $p(t)$ e $q(t)$ são contínuas, são tais que o seu wronskiano é diferente de zero em um ponto $t_0 \in I$ dizemos que elas são **soluções fundamentais no intervalo I** da equação diferencial (2.1).

Teorema 2.4. Se $y_1(t)$ e $y_2(t)$ são soluções fundamentais de (2.1) em um intervalo aberto I , onde $p(t)$ e $q(t)$ são contínuas, então a família de soluções

$$y(t) = c_1 y_1(t) + c_2 y_2(t), \quad (2.4)$$

para constantes c_1 e c_2 arbitrárias é a solução geral de (2.1) em I .

Demonstração. Seja $z(t)$ uma solução qualquer de (2.1) no intervalo I . Como $y_1(t)$ e $y_2(t)$ são soluções fundamentais em I , existe um ponto $t_0 \in I$ tal que $W[y_1, y_2](t_0) \neq 0$. Considere o PVI formado por (2.1) e as

condições iniciais $y(t_0) = z(t_0)$ e $y'(t_0) = z'(t_0)$, então pelo Teorema 2.3 existem constantes c_1 e c_2 tais que $z(t) = c_1 y_1(t) + c_2 y_2(t)$. ■

Assim, para encontrar a solução geral de uma equação diferencial linear homogênea de 2ª ordem (2.1) em um intervalo I , precisamos encontrar duas soluções fundamentais da equação (2.1), ou seja, duas soluções $y_1(t)$ e $y_2(t)$ tais que em um ponto $t_0 \in I$

$$\det \begin{bmatrix} y_1(t_0) & y_2(t_0) \\ y_1'(t_0) & y_2'(t_0) \end{bmatrix} \neq 0.$$

Exemplo 2.2. Seja b um número real não nulo. Vamos mostrar que $y_1(t) = \cos bt$ e $y_2(t) = \sin bt$ são soluções fundamentais da equação

$$y'' + b^2 y = 0.$$

Como $y_1'(t) = -b \sin bt$, $y_1''(t) = -b^2 \cos bt$, $y_2'(t) = b \cos bt$ e $y_2''(t) = -b^2 \sin bt$, então

$$y_1'' + b^2 y_1 = -b^2 \cos bt + b^2 \cos bt = 0$$

e

$$y_2'' + b^2 y_2 = -b^2 \sin bt + b^2 \sin bt = 0.$$

Assim, $y_1(t)$ e $y_2(t)$ são soluções da equação $y'' + b^2 y = 0$. Além disso,

$$\det \begin{bmatrix} y_1(t) & y_2(t) \\ y_1'(t) & y_2'(t) \end{bmatrix} = \det \begin{bmatrix} \cos bt & \sin bt \\ -b \sin bt & b \cos bt \end{bmatrix} = b(\cos^2 bt + \sin^2 bt) = b \neq 0 \quad \text{para todo } t \in \mathbb{R}.$$

Portanto, $y_1(t) = \cos bt$ e $y_2(t) = \sin bt$ são soluções fundamentais de $y'' + b^2 y = 0$ e a solução geral da equação diferencial é

$$y(t) = c_1 \cos bt + c_2 \sin bt.$$

Dependência Linear

Dizemos que duas funções $y_1(t)$ e $y_2(t)$ são **linearmente dependentes (LD)** em um intervalo I , se uma das funções é um múltiplo escalar da outra, ou seja, se

$$y_1(t) = \alpha y_2(t) \quad \text{ou} \quad y_2(t) = \alpha y_1(t), \quad \text{para todo } t \in I.$$

Caso contrário, dizemos que elas são **linearmente independentes (LI)**.

Se duas funções são LD em um intervalo I , então

$$W[y_1, y_2](t) = \det \begin{bmatrix} y_1(t) & y_2(t) \\ y_1'(t) & y_2'(t) \end{bmatrix} = 0, \quad \text{para todo } t \in I,$$

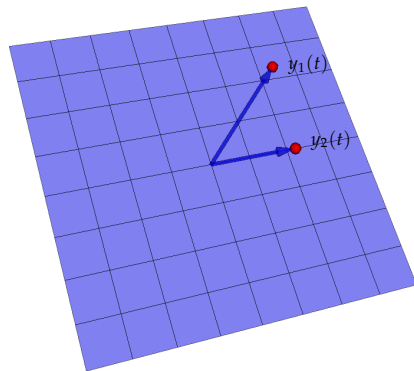
pois uma coluna da matriz acima é um múltiplo escalar da outra. Assim, vale o seguinte resultado.

Teorema 2.5. Se $y_1(t)$ e $y_2(t)$ são funções diferenciáveis em um intervalo I , tais que

$$W[y_1, y_2](t_0) = \det \begin{bmatrix} y_1(t_0) & y_2(t_0) \\ y_1'(t_0) & y_2'(t_0) \end{bmatrix} \neq 0, \quad \text{para algum } t_0 \in I,$$

então $y_1(t)$ e $y_2(t)$ são linearmente independentes (LI) em I .

Figura 2.3. $y_1(t)$ e $y_2(t)$ soluções fundamentais de uma equação diferencial linear homogênea



Usando a linguagem da Álgebra Linear podemos dizer que duas soluções fundamentais formam uma base para o subespaço das soluções de uma equação homogênea (2.1), pois elas são LI e geram o subespaço (toda solução é uma combinação linear delas).

Observe que o wronskiano pode ser calculado para quaisquer par de funções mesmo que elas não sejam soluções de uma equação diferencial. Também os conceitos de dependência e independência linear são definidos para duas funções que podem ou não ser soluções de uma equação diferencial.

Exemplo 2.3. Seja b um número real não nulo. Mostramos no exemplo anterior que $y_1(t) = \cos bt$ e $y_2(t) = \sin bt$ são soluções fundamentais da equação

$$y'' + b^2y = 0.$$

Portanto, elas são soluções LI da equação diferencial.

A recíproca do Teorema 2.5 não é verdadeira, ou seja, duas funções podem ser LI com

$$W[y_1, y_2](t) = 0, \quad \text{para todo } t \in \mathbb{R}.$$

Vejamos o próximo exemplo.

Exemplo 2.4. Sejam $y_1(t) = t^2$ e $y_2(t) = t|t| = \begin{cases} t^2 & \text{se } t \geq 0 \\ -t^2 & \text{se } t < 0 \end{cases}$.

$$W[y_1, y_2](t) = \det \begin{bmatrix} t^2 & t|t| \\ 2t & 2|t| \end{bmatrix} = 0.$$

Apesar do wronskiano ser zero para todo $t \in \mathbb{R}$ as funções y_1 e y_2 são LI, pois uma função não é múltiplo escalar da outra. Pois, para $t \geq 0$, $y_2(t) = y_1(t)$ e para $t < 0$, $y_2(t) = -y_1(t)$.

2.1.2 Fórmula de Euler

Considere um número complexo $r = a + ib$. Queremos definir a função exponencial $y(t) = e^{(a+ib)t}$, $t \in \mathbb{R}$, de forma que satisfaça as propriedades

$$e^{(a+ib)t} = e^{at}e^{ibt} \quad (2.5)$$

$$\frac{d}{dt}(e^{rt}) = re^{rt} \quad (2.6)$$

Observamos que a função $z(t) = e^{ibt}$ é solução da equação $z'' + b^2z = 0$. Pois pela propriedade (2.6):

$$z'(t) = ibe^{ibt}, \quad z''(t) = -b^2e^{ibt} = -b^2z(t)$$

e assim

$$z''(t) + b^2z(t) = 0.$$

Portanto, $z(t) = e^{ibt}$ é solução do problema de valor inicial

$$\begin{cases} z'' + b^2z = 0, \\ z(0) = 1, z'(0) = ib. \end{cases}$$

Como mostramos no [Exemplo 2.2 na página 280](#) que $y_1(t) = \cos bt$ e $y_2(t) = \sin bt$ são soluções fundamentais de $z'' + b^2z = 0$, então pelo [Teorema 2.3 na página 278](#) existem constantes c_1 e c_2 tais que

$$z(t) = e^{ibt} = c_1 \cos bt + c_2 \sin bt. \quad (2.7)$$

Vamos determinar estas constantes c_1 e c_2 . Substituindo-se $t = 0$ na equação (2.7) obtemos que $c_1 = 1$. Derivando a equação (2.7) em relação a t obtemos

$$ibe^{ibt} = -c_1b \sin bt + c_2b \cos bt. \quad (2.8)$$

Substituindo-se $t = 0$ na equação (2.8) obtemos que $c_2 = i$. Assim, substituindo-se $c_1 = 1$ e $c_2 = i$ já obtidos na equação (2.7) obtemos

$$e^{ibt} = \cos bt + i \operatorname{sen} bt.$$

Tomando $t = 1$ obtemos

$$e^{ib} = \cos b + i \operatorname{sen} b, \quad (2.9)$$

que é conhecida como **fórmula de Euler**.

Pela propriedade (2.5), temos que

$$e^{(a+ib)t} = e^{at} e^{ibt} = e^{at} (\cos bt + i \operatorname{sen} bt). \quad (2.10)$$

Exemplo 2.5. Usando a fórmula de Euler temos que

$$e^{i\pi} = -1, \quad e^{i\frac{\pi}{2}} = i, \quad e^{\ln 2 + \frac{\pi}{4}i} = \sqrt{2} + i\sqrt{2},$$

que foram obtidas fazendo em (2.10) $t = 1$ e

$$a = 0, b = \pi; \quad a = 0, b = \frac{\pi}{2}; \quad a = \ln 2, b = \frac{\pi}{4},$$

respectivamente.

Exercícios (respostas na página 412)

1.1. Considere a equação diferencial $y'' - \omega^2 y = 0$, para $\omega > 0$.

- (a) Mostre que $y(t) = c_1 e^{-\omega(t-a)} + c_2 e^{\omega(t-a)}$, para $a \in \mathbb{R}$ fixo, é solução geral da equação diferencial.
- (b) Mostre que $y(t) = c_1 \cosh(\omega(t-a)) + c_2 \sinh(\omega(t-a))$, para $a \in \mathbb{R}$ fixo, é solução geral da equação diferencial.

1.2. Considere a equação diferencial

$$(x+3)y'' + (x+2)y' - y = 0.$$

- (a) Encontre uma solução da equação diferencial da forma

$$y_1(x) = e^{rx},$$

para r um número real fixo.

- (b) Encontre uma solução da equação diferencial que seja uma função de 1º grau.
- (c) Encontre a solução geral da equação diferencial.
- (d) Encontre a solução do PVI

$$\begin{cases} (x+3)y'' + (x+2)y' - y = 0, \\ y(1) = 1, y'(1) = 3. \end{cases}$$

1.3. As equações de Euler são equações que podem ser escritas na forma

$$x^2 y'' + bxy' + cy = 0, \quad \text{em que } b, c \in \mathbb{R}. \quad (2.11)$$

Mostre que existem valores constantes de r tais que $y(x) = x^r$ é uma solução de (2.11). Além disso, mostre que $y(x) = x^r$ é solução da equação (2.11) se, e somente se,

$$r^2 + (b-1)r + c = 0, \quad (2.12)$$

A equação (2.12) é chamada **equação indicial de (2.11)**.

- 1.4. Mostre que se a equação indicial (2.12) tem duas raízes reais (distintas), r_1 e r_2 , então

$$y_1(x) = x^{r_1} \quad \text{e} \quad y_2(x) = x^{r_2}$$

são soluções fundamentais de (2.11) e portanto

$$y(x) = c_1 x^{r_1} + c_2 x^{r_2}$$

é a solução geral de (2.11), para $x > 0$.

- 1.5. Se a equação indicial (2.12) tem duas raízes complexas, $r_1 = \alpha + i\beta$ e $r_2 = \alpha - i\beta$, use a fórmula de Euler para escrever a solução geral complexa em termos das soluções reais, para $x > 0$,

$$u(x) = x^\alpha \cos(\beta \ln x) \quad \text{e} \quad v(x) = x^\alpha \sin(\beta \ln x).$$

Mostre que estas soluções são soluções fundamentais de (2.11) e portanto

$$y(x) = c_1 x^\alpha \cos(\beta \ln x) + c_2 x^\alpha \sin(\beta \ln x)$$

é a solução geral de (2.11), para $x > 0$.

- 1.6. Se a equação indicial (2.12) tem somente uma raiz real, mostre que $y_1(x) = x^{\frac{1-b}{2}}$ e $y_2(x) = x^{\frac{1-b}{2}} \ln x$ são soluções fundamentais de (2.11) e portanto a solução geral de (2.11), para $x > 0$, é

$$y(x) = c_1 x^{\frac{1-b}{2}} + c_2 x^{\frac{1-b}{2}} \ln x.$$

- 1.7. Use os exercícios anteriores para encontrar a solução geral das seguintes equações:

(a) $x^2 y'' + 4xy' + 2y = 0$

(b) $x^2 y'' - 3xy' + 4y = 0$

(c) $x^2 y'' + 3xy' + 5y = 0$

1.8. Baseado no Teorema 2.1 na página 274, determine um intervalo em que os problemas de valor inicial abaixo têm uma única solução, sem resolvê-los:

(a)
$$\begin{cases} (t^2 - 1)y'' + (t - 2)y = t \\ y(0) = y_0, \quad y'(0) = y'_0 \end{cases}$$

(c)
$$\begin{cases} (t^2 - t)y'' + (t + 1)y' + y = e^t \\ y(-1) = y_0, \quad y'(-1) = y'_0 \end{cases}$$

(b)
$$\begin{cases} (t^2 - 1)y'' + y' + ty = t^2 \\ y(2) = y_0, \quad y'(2) = y'_0 \end{cases}$$

(d)
$$\begin{cases} (t^2 - t)y' + (t + 3)y' + 2y = \cos t \\ y(2) = y_0, \quad y'(2) = y'_0 \end{cases}$$

1.9. Considere a equação homogênea $y'' + p(t)y' + q(t)y = 0$, com $p(t)$ e $q(t)$ funções contínuas num intervalo I . Usando o Teorema 2.1 na página 274 mostre que esta equação tem soluções fundamentais.

1.10. Mostre que $y(t) = \sin(t^2)$ não pode ser solução de uma equação diferencial $y'' + p(t)y' + q(t)y = 0$, com $p(t)$ e $q(t)$ contínuas num intervalo contendo $t = 0$.

1.11. Considere a equação

$$ty'' - (2 + t^2)y' + 3ty = 0.$$

Mostre que $y_1(t) = t^3$ e $y_2(t) = t^2|t|$ são soluções LI desta equação válidas para todo $t \in \mathbb{R}$, embora $W[y_1, y_2](t) = 0$, para todo $t \in \mathbb{R}$.

1.12. Considere a equação homogênea $y'' + p(t)y' + q(t)y = 0$, com $p(t)$ e $q(t)$ funções contínuas num intervalo aberto I . Sejam $y_1(t)$ e $y_2(t)$ duas soluções desta equação no intervalo I . Mostre que se $y_1(t)$ e $y_2(t)$ são LI, então elas são soluções fundamentais da equação diferencial em I . Sugestão: mostre que se $y_1(t)$ e $y_2(t)$ não são soluções fundamentais da equação diferencial, então $y_1(t)$ e $y_2(t)$ são LD.

1.13. (Teorema de Abel) Considere a equação homogênea $y'' + p(t)y' + q(t)y = 0$, com $p(t)$ e $q(t)$ funções contínuas num intervalo I . Sejam $y_1(t)$ e $y_2(t)$ duas soluções desta equação no intervalo I . Seja $W[y_1, y_2](t)$ o wronskiano de $y_1(t)$ e $y_2(t)$ no intervalo I . Mostre que:

(a) $W[y_1, y_2]'(t) = y_1(t)y_2''(t) - y_2(t)y_1''(t)$

(b) $W[y_1, y_2](t)$ satisfaz a equação diferencial $y' + p(t)y = 0$ no intervalo I .

(c) $W[y_1, y_2](t) = ce^{-\int p(t)dt}$.

(d) $W[y_1, y_2](t) = 0$, para todo $t \in I$ ou $W[y_1, y_2](t) \neq 0$, para todo $t \in I$.

1.14. Mostre que se $y_1(t)$ e $y_2(t)$ são soluções fundamentais da equação $y'' + p(t)y' + q(t)y = 0$ num intervalo I , então

$$p(t) = \frac{y_2(t)y_1''(t) - y_1(t)y_2''(t)}{W[y_1, y_2](t)} \quad \text{e} \quad q(t) = -\frac{y_2'(t)y_1''(t) - y_1'(t)y_2''(t)}{W[y_1, y_2](t)}, \quad \text{para } t \in I.$$

Sugestão: substitua $y_1(t)$ e $y_2(t)$ na equação diferencial e resolva o sistema correspondente para $p(t)$ e $q(t)$.

2.2 Equações Homogêneas - Parte II

2.2.1 Obtendo-se uma Segunda Solução (Redução de Ordem)

Considere uma equação linear de 2a. ordem homogênea

$$y'' + p(t)y' + q(t)y = 0. \quad (2.13)$$

Seja $y_1(t)$ uma solução conhecida da equação acima num intervalo I onde $p(t)$ e $q(t)$ são contínuas e tal que $y_1(t) \neq 0$ para todo $t \in I$. Vamos procurar uma segunda solução da equação (2.13) da forma

$$y(t) = v(t)y_1(t).$$

Derivando-se esta expressão obtemos

$$y'(t) = vy_1' + y_1v' \quad \text{e} \quad y''(t) = vy_1'' + 2y_1'v' + y_1v''.$$

Substituindo-se $y(t)$, $y'(t)$ e $y''(t)$ na equação (2.13) obtemos

$$(vy_1'' + 2y_1'v' + y_1v'') + p(t)(vy_1' + y_1v') + q(t)vy_1 = 0.$$

Colocando-se em evidência v'' , v' e v obtemos

$$y_1v'' + (2y_1' + p(t)y_1)v' + (y_1'' + p(t)y_1' + q(t)y_1)v = 0.$$

Como $y_1(t)$ é solução da equação (2.13), então $y_1'' + p(t)y_1' + q(t)y_1 = 0$ e assim a equação anterior se torna

$$y_1v'' + (2y_1' + p(t)y_1)v' = 0. \quad (2.14)$$

Fazendo a mudança de variáveis $w(t) = v'(t)$, a equação (2.14) se transforma em

$$y_1w' + (2y_1' + p(t)y_1)w = 0.$$

Esta é uma equação de 1a. ordem linear, que pode ser transformada na equação separável

$$\frac{w'}{w} = -\frac{2y_1'}{y_1} - p(t).$$

Integrando-se em relação a t obtemos

$$\ln |w| = -2 \ln |y_1| - \int p(t) dt + c,$$

que usando propriedade do logaritmo pode ser reescrita como

$$\ln |wy_1^2| = - \int p(t) dt + c.$$

Explicitando $w(t)$ obtemos

$$w(t) = \pm \frac{e^c e^{-\int p(t) dt}}{y_1(t)^2} = \tilde{c}_1 \frac{e^{-\int p(t) dt}}{y_1(t)^2}, \text{ em que } \tilde{c}_1 = \pm e^c.$$

Como $w(t) = v'(t)$, então

$$v(t) = \int w(t) dt = \tilde{c}_1 \int \frac{e^{-\int p(t) dt}}{y_1(t)^2} dt + \tilde{c}_2. \quad (2.15)$$

Tomando-se $\tilde{c}_2 = 0$ e $\tilde{c}_1 = 1$ obtemos

$$v(t) = \int \frac{e^{-\int p(t) dt}}{y_1(t)^2} dt.$$

Substituindo-se $v(t)$ em $y(t) = v(t)y_1(t)$ obtemos uma segunda solução da equação (2.13)

$$y_2(t) = v(t)y_1(t) = y_1(t) \int \frac{e^{-\int p(t) dt}}{y_1(t)^2} dt. \quad (2.16)$$

Vamos ver que $y_1(t)$ dada e $y_2(t)$ obtida por (2.16) são soluções fundamentais da equação (2.13).

$$\begin{aligned} W[y_1, y_2](t) &= \det \begin{bmatrix} y_1(t) & y_2(t) \\ y_1'(t) & y_2'(t) \end{bmatrix} = \det \begin{bmatrix} y_1(t) & y_1(t) \int \frac{e^{-\int p(t)dt}}{y_1(t)^2} dt \\ y_1'(t) & y_1'(t) \int \frac{e^{-\int p(t)dt}}{y_1(t)^2} dt + \frac{e^{-\int p(t)dt}}{y_1(t)} \end{bmatrix} \\ &= e^{-\int p(t)dt} \neq 0 \quad \text{para todo } t \in I. \end{aligned}$$

Assim, se $y_1(t)$ é uma solução conhecida da equação (2.13) e $y_2(t)$ é dada por (2.16) então

$$y(t) = c_1 y_1(t) + c_2 y_2(t)$$

é solução geral da equação (2.13).

Atenção: Atribuindo-se diferentes valores a \tilde{c}_1 e a \tilde{c}_2 em (2.15) obtemos uma infinidade de funções $v(t)$, mas precisamos de apenas uma tal que $W[y_1, v y_1](t_0) \neq 0$ para algum ponto t_0 . Você pode escolher \tilde{c}_1 e \tilde{c}_2 da maneira que você quiser, com exceção de $\tilde{c}_1 = 0$, pois neste caso teríamos $y_2(t) = y_1(t)v(t) = \tilde{c}_2 y_1(t)$ e assim teríamos $W[y_1, y_2](t) = 0$, para todo $t \in I$.

No próximo exemplo vamos usar a equação (2.14) para encontrar uma 2a. solução da equação diferencial.

Exemplo 2.6. Sejam $a, b, c \in \mathbb{R}$, com $a \neq 0$. Considere a equação

$$ay'' + by' + cy = 0 \quad \text{com } b^2 - 4ac = 0. \quad (2.17)$$

Deixamos como exercício verificar que $y_1(t) = e^{-\frac{b}{2a}t}$ é uma solução da equação diferencial (2.17). Vamos procurar uma segunda solução da forma

$$y(t) = v(t)y_1(t) = v(t)e^{-\frac{b}{2a}t}.$$

Vimos na equação (2.14) que $v(t)$ é solução da equação diferencial

$$y_1 v'' + (2y_1' + p(t)y_1)v' = 0.$$

Como, aqui, $p(t) = b/a$, então $v(t)$ é solução da equação

$$e^{-\frac{b}{2a}t} v'' + \left(-\frac{b}{a}e^{-\frac{b}{2a}t} + \frac{b}{a}e^{-\frac{b}{2a}t}\right)v' = 0.$$

Dividindo-se por $e^{-\frac{b}{2a}t}$ obtemos

$$v'' = 0.$$

Seja $w(t) = v'(t)$. Então, a equação $v'' = 0$ torna-se $w' = 0$ que tem solução $w(t) = \tilde{c}_1$. Resolvendo-se a equação $v'(t) = w(t) = \tilde{c}_1$ obtemos

$$v(t) = \tilde{c}_1 t + \tilde{c}_2 \quad \text{e} \quad y(t) = v(t)y_1(t) = (\tilde{c}_1 t + \tilde{c}_2)e^{rt}.$$

Tomando-se $\tilde{c}_2 = 0$ e $\tilde{c}_1 = 1$ obtemos uma segunda solução, que chamamos de $y_2(t)$, da equação diferencial (2.17)

$$y_2(t) = te^{rt}.$$

Vamos ver que $y_1(t) = e^{rt}$ e $y_2(t) = te^{rt}$, em que $r = -\frac{b}{2a}$, são soluções fundamentais da equação diferencial (2.17)

$$\begin{aligned} \det \begin{bmatrix} y_1(t) & y_2(t) \\ y_1'(t) & y_2'(t) \end{bmatrix} &= \det \begin{bmatrix} e^{rt} & te^{rt} \\ re^{rt} & (1+rt)e^{rt} \end{bmatrix} \\ &= e^{2rt} \det \begin{bmatrix} 1 & t \\ r & (1+rt) \end{bmatrix} \\ &= e^{2rt} \neq 0, \quad \text{para todo } t \in \mathbb{R}. \end{aligned}$$

Assim,

$$y(t) = c_1 e^{rt} + c_2 t e^{rt}, \quad \text{em que } r = -\frac{b}{2a}$$

é a solução geral da equação $ay'' + by' + cy = 0$, tal que $b^2 - 4ac = 0$ e $a \neq 0$.

2.2.2 Equações Homogêneas com Coeficientes Constantes

Vamos tratar equações da forma

$$ay'' + by' + cy = 0, \quad \text{para } a, b, c \in \mathbb{R}, a \neq 0. \quad (2.18)$$

Vamos mostrar que para esta equação existem valores constantes de r tais que $y(t) = e^{rt}$ é uma solução.

Substituindo-se $y(t) = e^{rt}$, $y'(t) = re^{rt}$ e $y''(t) = r^2 e^{rt}$ em (2.18) obtemos

$$ar^2 e^{rt} + bre^{rt} + ce^{rt} = (ar^2 + br + c)e^{rt} = 0.$$

Dividindo-se por $e^{rt} \neq 0$, obtemos que $y(t) = e^{rt}$ é solução de (2.18) se, e somente se, r é solução da equação

$$ar^2 + br + c = 0, \quad (2.19)$$

que é chamada **equação característica** de (2.18).

Observe que a equação característica pode ser obtida da equação diferencial com coeficientes constantes trocando-se y'' por r^2 , y' por r e y por 1.

Como uma equação de 2º grau pode ter duas raízes reais, somente uma raiz real ou duas raízes complexas, usando a equação característica podemos chegar a três situações distintas.

A Equação Característica Tem Duas Raízes Reais

Se $\Delta = b^2 - 4ac > 0$, então a equação característica de (2.18) tem duas raízes reais (distintas), r_1 e r_2 . Neste caso

$$y_1(t) = e^{r_1 t} \quad \text{e} \quad y_2(t) = e^{r_2 t}$$

são soluções fundamentais, pois o wronskiano de $y_1(t) = e^{r_1 t}$ e $y_2(t) = e^{r_2 t}$ é

$$\begin{aligned} W[y_1, y_2](t) &= \det \begin{bmatrix} y_1(t) & y_2(t) \\ y_1'(t) & y_2'(t) \end{bmatrix} = \det \begin{bmatrix} e^{r_1 t} & e^{r_2 t} \\ r_1 e^{r_1 t} & r_2 e^{r_2 t} \end{bmatrix} \\ &= e^{r_1 t} e^{r_2 t} \det \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ r_1 & r_2 \end{bmatrix} \\ &= (r_2 - r_1) e^{(r_1 + r_2)t} \neq 0, \quad \text{para todo } t \in \mathbb{R}. \end{aligned}$$

Assim, no caso em que a equação característica tem duas raízes reais distintas r_1 e r_2 ,

$$y(t) = c_1 e^{r_1 t} + c_2 e^{r_2 t}$$

é a solução geral de (2.18).

Exemplo 2.7. Seja ω um número real positivo. Vamos encontrar a solução geral da equação

$$y'' - \omega^2 y = 0.$$

A equação característica desta equação diferencial é $r^2 - \omega^2 = 0$, que tem como raízes $r_1 = \omega$ e $r_2 = -\omega$. Assim, a solução geral da equação diferencial acima é

$$y(t) = c_1 e^{\omega t} + c_2 e^{-\omega t}.$$

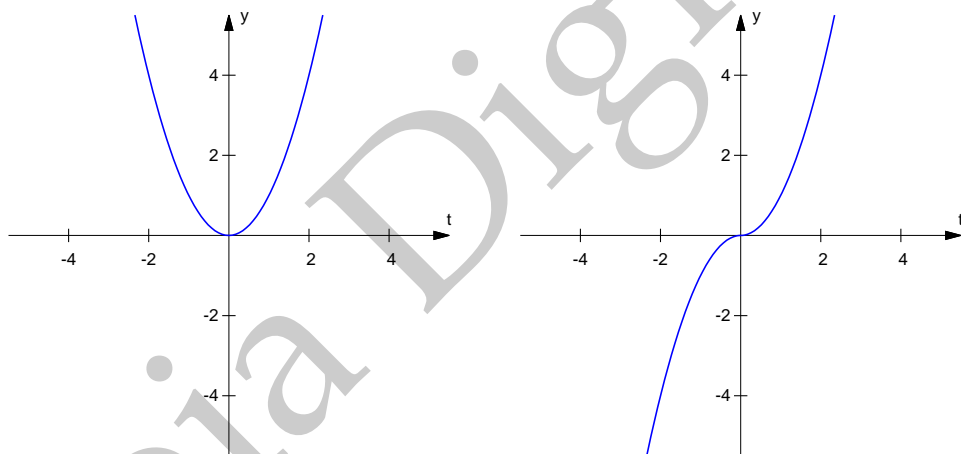


Figura 2.4. $y_1(t) = t^2$ e $y_2(t) = t|t|$ são LI mas o wronskiano é igual a zero para todo t

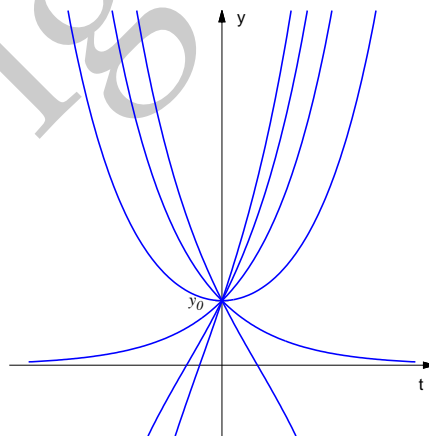


Figura 2.5. Algumas soluções da equação do Exemplo 2.7 tais que $y(0) = y_0$

A Equação Característica Tem Somente Uma Raiz Real

Se $\Delta = b^2 - 4ac = 0$, então a equação característica (2.19) tem somente uma raiz real $r = -\frac{b}{2a}$. Neste caso,

$$y_1(t) = e^{rt} = e^{-\frac{b}{2a}t}$$

é solução da equação diferencial (2.18).

No Exemplo 2.6 na página 294 mostramos como encontrar uma segunda solução para esta equação. Lá mostramos que $y_2(t) = te^{rt} = te^{-\frac{b}{2a}t}$ também é solução da equação (2.18) e que $y_1(t) = e^{-\frac{b}{2a}t}$ e $y_2(t) = te^{-\frac{b}{2a}t}$ são soluções fundamentais da equação diferencial (2.18).

Portanto, no caso em que a equação característica tem somente uma raiz real $r = -\frac{b}{2a}$,

$$y(t) = c_1 e^{-\frac{b}{2a}t} + c_2 t e^{-\frac{b}{2a}t}$$

é a solução geral de (2.18).

Exemplo 2.8. Vamos encontrar a solução geral da equação

$$y'' + 2y' + y = 0.$$

A equação característica é $r^2 + 2r + 1 = 0$ que tem como raiz $r_1 = -1$. Assim, a solução geral da equação é

$$y(t) = c_1 e^{-t} + c_2 t e^{-t}.$$

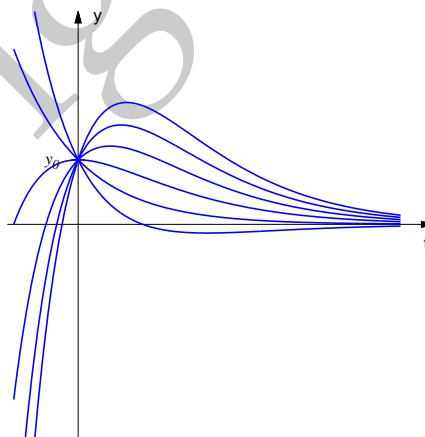


Figura 2.6. Algumas soluções da equação do Exemplo 2.8 tais que $y(0) = y_0$

A Equação Característica Tem Duas Raízes Complexas

Se $\Delta = b^2 - 4ac < 0$, então a equação característica (2.19) tem duas raízes complexas, que são conjugadas, ou seja, se $r_1 = \alpha + i\beta$ é uma raiz da equação característica (2.19), então a outra raiz é $r_2 = \alpha - i\beta$. Neste caso, pela fórmula de Euler (2.10) temos:

$$\begin{aligned} y_1(t) &= e^{r_1 t} = e^{(\alpha + i\beta)t} = e^{\alpha t}(\cos \beta t + i \operatorname{sen} \beta t) \quad \text{e} \\ y_2(t) &= e^{r_2 t} = e^{(\alpha - i\beta)t} = e^{\alpha t}(\cos(-\beta t) + i \operatorname{sen}(-\beta t)) = e^{\alpha t}(\cos \beta t - i \operatorname{sen} \beta t). \end{aligned}$$

Pela análise feita no início dessa seção sabemos que $y_1(t) = e^{r_1 t}$ e $y_2(t) = e^{r_2 t}$ são soluções (complexas) da equação diferencial (2.18). Além disso, assim como quando r_1 e r_2 são reais, o wronskiano

$$\begin{aligned} W[y_1, y_2](t) &= \det \begin{bmatrix} y_1(t) & y_2(t) \\ y_1'(t) & y_2'(t) \end{bmatrix} = \det \begin{bmatrix} e^{r_1 t} & e^{r_2 t} \\ r_1 e^{r_1 t} & r_2 e^{r_2 t} \end{bmatrix} \\ &= e^{r_1 t} e^{r_2 t} \det \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ r_1 & r_2 \end{bmatrix} \\ &= (r_2 - r_1) e^{(r_1 + r_2)t} = -2i\beta e^{2\alpha t} \neq 0, \quad \forall t \in \mathbb{R}, \end{aligned}$$

ou seja, $y_1(t)$ e $y_2(t)$ são soluções fundamentais de (2.18). Assim, no caso em que a equação característica tem duas raízes complexas $r_1 = \alpha + i\beta$ e $r_2 = \alpha - i\beta$,

$$y(t) = C_1 e^{r_1 t} + C_2 e^{r_2 t}, \quad C_1, C_2 \in \mathbb{C}$$

é a solução geral complexa de (2.18).

Vamos encontrar um conjunto fundamental de soluções reais. A solução geral complexa pode ser escrita como

$$\begin{aligned} y(t) &= C_1 e^{(\alpha + i\beta)t} + C_2 e^{(\alpha - i\beta)t} \\ &= C_1 e^{\alpha t}(\cos \beta t + i \operatorname{sen} \beta t) + C_2 e^{\alpha t}(\cos \beta t - i \operatorname{sen} \beta t) \\ &= (C_1 + C_2) e^{\alpha t} \cos \beta t + i(C_1 - C_2) e^{\alpha t} \operatorname{sen} \beta t \end{aligned} \quad (2.20)$$

Tomando $C_1 = C_2 = \frac{1}{2}$ em (2.20), temos a solução real $u(t) = e^{\alpha t} \cos \beta t$.

Tomando $C_1 = -C_2 = \frac{1}{2i}$, temos a solução real $v(t) = e^{\alpha t} \sin \beta t$.

Vamos mostrar, agora, que se as raízes da equação característica são complexas, então $u(t)$ e $v(t)$ são soluções fundamentais de (2.18).

$$\begin{aligned} W[u, v](t) &= \det \begin{bmatrix} u(t) & v(t) \\ u'(t) & v'(t) \end{bmatrix} = \det \begin{bmatrix} e^{\alpha t} \cos \beta t & e^{\alpha t} \sin \beta t \\ e^{\alpha t}(\alpha \cos \beta t - \beta \sin \beta t) & e^{\alpha t}(\alpha \sin \beta t + \beta \cos \beta t) \end{bmatrix} \\ &= e^{2\alpha t} \left(\alpha \det \begin{bmatrix} \cos \beta t & \sin \beta t \\ \cos \beta t & \sin \beta t \end{bmatrix} + \beta \det \begin{bmatrix} \cos \beta t & \sin \beta t \\ -\sin \beta t & \cos \beta t \end{bmatrix} \right) \\ &= \beta e^{2\alpha t} \neq 0, \quad \text{para todo } t \in \mathbb{R}. \end{aligned}$$

Assim, no caso em que a equação característica tem duas raízes complexas $r_1 = \alpha + i\beta$ e $r_2 = \alpha - i\beta$,

$$y(t) = c_1 e^{\alpha t} \cos \beta t + c_2 e^{\alpha t} \sin \beta t$$

é a solução geral de (2.18).

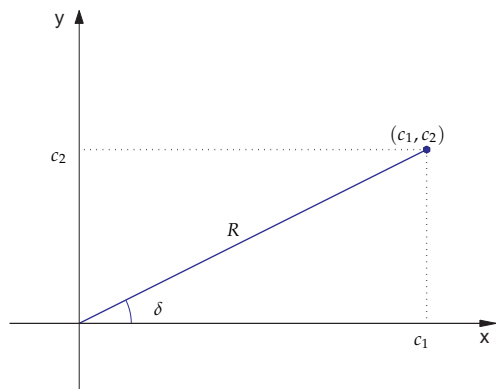
Exemplo 2.9. Seja ω um número real positivo. Vamos encontrar a solução geral da equação

$$y'' + \omega^2 y = 0.$$

A equação característica desta equação diferencial é $r^2 + \omega^2 = 0$, que tem como raízes $r_1 = i\omega$ e $r_2 = -i\omega$. Assim, a solução geral da equação diferencial acima é

$$y(t) = c_1 \cos \omega t + c_2 \sin \omega t. \quad (2.21)$$

Escrevendo o par (c_1, c_2) em coordenadas polares temos que



$$\begin{cases} c_1 = R \cos \delta, \\ c_2 = R \sin \delta. \end{cases} \quad (2.22)$$

Substituindo-se os valores de c_1 e c_2 na equação (2.21) obtemos

$$y(t) = R (\cos \delta \cos(\omega t) + \sin \delta \sin(\omega t)) = R \cos(\omega t - \delta),$$

em que $R = \sqrt{c_1^2 + c_2^2}$ e δ são obtidos de (2.22).

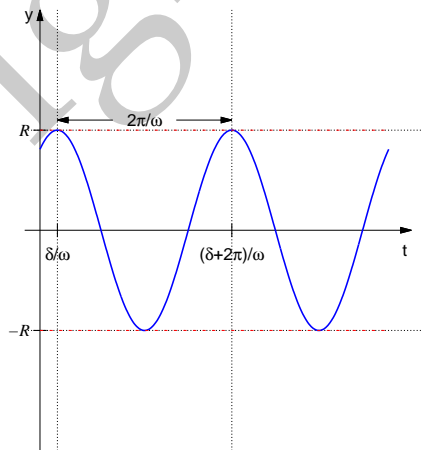


Figura 2.7. Uma solução da equação do Exemplo 2.9

Resumo

Para resolver a equação diferencial da forma

$$ay'' + by' + cy = 0, \quad \text{para } a, b, c \in \mathbb{R}, a \neq 0.$$

encontramos a equação característica

$$ar^2 + br + c = 0.$$

(a) Se $\Delta = b^2 - 4ac > 0$, então a solução geral da equação diferencial é

$$y(t) = c_1 e^{r_1 t} + c_2 e^{r_2 t}, \text{ em que } r_{1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{\Delta}}{2a}.$$

(b) Se $\Delta = b^2 - 4ac = 0$, então a solução geral da equação diferencial é

$$y(t) = c_1 e^{-\frac{b}{2a}t} + c_2 t e^{-\frac{b}{2a}t}.$$

(c) Se $\Delta = b^2 - 4ac < 0$, então a solução geral da equação diferencial é

$$y(t) = c_1 e^{\alpha t} \cos \beta t + c_2 e^{\alpha t} \sin \beta t, \text{ em que } \alpha = \frac{-b}{2a}, \beta = \frac{\sqrt{-\Delta}}{2a}.$$

Exercícios (respostas na página 422)

2.1. Mostre que $y_1(x) = x^3$ é solução da equação diferencial

$$2x^2y'' - xy' - 9y = 0.$$

Encontre uma função $u(x)$ tal que $y_2(x) = u(x)y_1(x)$ seja solução da equação dada. Prove que as duas soluções $y_1(x)$ e $y_2(x)$ são soluções fundamentais.

2.2. Mostre que $y_1(x) = x^{-1}$, $x > 0$, é solução da equação diferencial

$$x^2y'' + 3xy' + y = 0.$$

Encontre uma função $u(x)$ tal que $y_2(x) = u(x)y_1(x)$ seja solução da equação dada. Prove que as duas soluções $y_1(x)$ e $y_2(x)$ são soluções fundamentais.

2.3. As equações de Euler são equações que podem ser escritas na forma

$$x^2y'' + bxy' + cy = 0, \quad \text{em que } b, c \in \mathbb{R}. \quad (2.23)$$

Existem valores constantes de r tais que $y(x) = x^r$ é uma solução de (2.23). Além disso, $y(x) = x^r$ é solução da equação (2.23) se, e somente se,

$$r^2 + (b-1)r + c = 0, \quad (2.24)$$

que é chamada **equação indicial de (2.23)**. Se a equação indicial tem somente uma raiz real, $r = \frac{1-b}{2}$, determine uma segunda solução linearmente independente da forma

$$y_2(x) = v(x)y_1(x) = v(x)x^{\frac{1-b}{2}}, \quad \text{para } x > 0.$$

2.4. (a) Determine qual ou quais das funções $z_1(x) = x^2$, $z_2(x) = x^3$ e $z_3(x) = e^{-x}$ são soluções da equação

$$(x+3)y'' + (x+2)y' - y = 0$$

- (b) Seja $y_1(x)$ uma das soluções obtidas no item anterior. Determine uma segunda solução $y_2(x)$ de forma que $y_1(x)$ e $y_2(x)$ sejam soluções fundamentais da equação.
- (c) Determine a solução geral da equação

$$(x+3)y'' + (x+2)y' - y = 0$$

e obtenha a solução do problema de valor inicial

$$\begin{cases} (x+3)y'' + (x+2)y' - y = 0, \\ y(1) = 1, y'(1) = 3. \end{cases}$$

Justifique sua resposta!

- 2.5. Mostre que a solução do problema $y'' + 2y' = 0, y(0) = a, y'(0) = b$ tende para uma constante quando $t \rightarrow +\infty$. Determine esta constante.
- 2.6. Mostre que se $0 < b < 2$, então toda solução de $y'' + by' + y = 0$ tende a zero quando $t \rightarrow +\infty$.
- 2.7. Considere o problema $y'' - 4y = 0, y(0) = 0, y'(0) = b \neq 0$. Mostre que $y(t) \neq 0$ para todo $t \neq 0$.
- 2.8. Considere o problema $y'' - y' + \frac{1}{4}y = 0, y(0) = 2, y'(0) = b$. Determine os valores de b para os quais a solução $y(t) \rightarrow +\infty$ quando $t \rightarrow +\infty$.
- 2.9. Considere a equação $y'' + 2by' + y = 0$. Para quais valores de b a solução $y(t)$ tende a zero quando $t \rightarrow +\infty$, independente das condições iniciais.
- 2.10. (a) Encontre a solução geral da equação
- $$y'' + 2y' + \alpha y = 0$$
- para $\alpha > 1$, para $\alpha = 1$ e para $\alpha < 1$.
- (b) Para quais valores de α todas as soluções tendem a zero quando $t \rightarrow +\infty$.

2.3 Equações Não Homogêneas

Uma equação diferencial linear de 2ª ordem é **não homogênea** se ela pode ser escrita como

$$y'' + p(t)y' + q(t)y = f(t). \quad (2.25)$$

com $f(t)$ uma função não-nula.

Teorema 2.6. *Seja $y_p(t)$ uma solução particular da equação (2.25). Sejam $y_1(t)$ e $y_2(t)$ soluções fundamentais da equação homogênea correspondente. Então, a solução geral da equação não homogênea (2.25) é*

$$y(t) = c_1 y_1(t) + c_2 y_2(t) + y_p(t).$$

Ou seja, a solução geral da equação diferencial linear de 2ª ordem não homogênea é a soma da solução geral da equação homogênea correspondente, $y_h(t) = c_1 y_1(t) + c_2 y_2(t)$, com uma solução particular da equação diferencial não homogênea, $y_p(t)$.

Demonstração. Seja $y(t)$ uma solução qualquer de (2.25) e $y_p(t)$ uma solução particular de (2.25). Vamos mostrar que $Y(t) = y(t) - y_p(t)$ é solução da equação homogênea associada

$$y'' + p(t)y' + q(t)y = 0. \quad (2.26)$$

$$\begin{aligned}
 Y''(t) + p(t)Y'(t) + q(t)Y(t) &= (y(t) - y_p(t))'' + p(t)(y(t) - y_p(t))' + q(t)(y(t) - y_p(t)) \\
 &= \underbrace{(y''(t) + p(t)y'(t) + q(t)y(t))}_{=f(t)} - \underbrace{(y_p''(t) + p(t)y_p'(t) + q(t)y_p(t))}_{=f(t)} \\
 &= f(t) - f(t) = 0.
 \end{aligned}$$

Assim, se $y_1(t)$ e $y_2(t)$ são soluções fundamentais da equação homogênea associada (2.26), existem constantes c_1 e c_2 tais que

$$Y(t) = y(t) - y_p(t) = c_1 y_1(t) + c_2 y_2(t),$$

ou seja, se $y(t)$ é uma solução qualquer de (2.25) e $y_1(t)$ e $y_2(t)$ são soluções fundamentais da equação homogênea associada (2.26), então

$$y(t) = c_1 y_1(t) + c_2 y_2(t) + y_p(t). \quad (2.27)$$

■

Portanto, para encontrar a solução geral de uma equação linear de 2ª ordem não homogênea precisamos encontrar uma solução particular e duas soluções fundamentais da equação homogênea correspondente.

Exemplo 2.10. Verifique que a função $y_p(t) = \frac{t}{4}$ é solução da equação diferencial

$$y'' + 4y = t.$$

Já vimos no Exemplo 2.9 na página 303 que a solução geral da equação diferencial homogênea correspondente, $y'' + 4y = 0$, é

$$y_h(t) = c_1 \cos 2t + c_2 \sin 2t.$$

Logo, a solução geral da equação não homogênea $y'' + 4y = t$ é

$$y(t) = c_1 \cos 2t + c_2 \sin 2t + \frac{t}{4}.$$

Exemplo 2.11. A função $y_p(t) = \frac{t}{2} \sin(2t)$ é solução da equação

$$y'' + 4y = 2 \cos(2t).$$

Verifique! Vimos no [Exemplo 2.9 na página 303](#) que a solução geral da equação diferencial homogênea correspondente, $y'' + 4y = 0$, é

$$y_h(t) = c_1 \cos 2t + c_2 \sin 2t.$$

Logo,

$$y(t) = c_1 \cos 2t + c_2 \sin 2t + \frac{t}{2} \sin(2t)$$

é solução geral da equação diferencial

$$y'' + 4y = 2 \cos(2t).$$

Teorema 2.7 (Princípio da Superposição para Equações Não Homogêneas). Se $y_p^{(1)}(t)$ é uma solução de

$$y'' + p(t)y' + q(t)y = f_1(t)$$

e $y_p^{(2)}(t)$ é uma solução de

$$y'' + p(t)y' + q(t)y = f_2(t),$$

então $y_p(t) = y_p^{(1)}(t) + y_p^{(2)}(t)$ é solução de

$$y'' + p(t)y' + q(t)y = f_1(t) + f_2(t).$$

Demonstração.

$$\begin{aligned} y_p(t)'' + p(t)y_p'(t) + q(t)y_p(t) &= \\ &= (y_p^{(1)}(t) + y_p^{(2)}(t))'' + p(t)(y_p^{(1)}(t) + y_p^{(2)}(t))' + q(t)(y_p^{(1)}(t) + y_p^{(2)}(t)) = \\ &= \underbrace{y_p^{(1)}(t)'' + p(t)y_p^{(1)}(t)' + q(t)y_p^{(1)}(t)}_{=f_1(t)} + \underbrace{y_p^{(2)}(t)'' + p(t)y_p^{(2)}(t)' + q(t)y_p^{(2)}(t)}_{=f_2(t)} = \\ &= f_1(t) + f_2(t), \end{aligned}$$

pois $y_p^{(1)}(t)$ é solução da equação

$$y'' + p(t)y' + q(t)y = f_1(t)$$

e $y_p^{(2)}(t)$, da equação

$$y'' + p(t)y' + q(t)y = f_2(t).$$



Exemplo 2.12. Vimos no [Exemplo 2.10](#) que a função $y_p^{(1)}(t) = \frac{t}{4}$ é uma solução da equação diferencial

$$y'' + 4y = t$$

e no [Exemplo 2.11](#) que a função $y_p^{(2)}(t) = \frac{t}{2} \sin(2t)$ é uma solução da equação

$$y'' + 4y = 2 \cos(2t).$$

Pelo Princípio da Superposição para Equações Não Homogêneas ([Teorema 2.7](#))

$$y_p(t) = \frac{t}{4} + \frac{t}{2} \sin(2t)$$

é uma solução particular da equação

$$y'' + 4y = 2 \cos(2t) + t$$

e assim a solução geral desta equação é

$$y(t) = c_1 \cos(2t) + c_2 \sin(2t) + \frac{t}{4} + \frac{t}{2} \sin(2t).$$

2.3.1 Método de Variação dos Parâmetros

Este método funciona para qualquer equação linear de 2a. ordem

$$y'' + p(t)y' + q(t)y = f(t),$$

para qual se conheça duas soluções fundamentais $y_1(t)$ e $y_2(t)$ da equação homogênea correspondente em um intervalo I , onde o wronskiano $W[y_1, y_2](t) \neq 0$, para todo $t \in I$.

Lembramos que neste caso a solução geral da equação homogênea correspondente é

$$y(t) = c_1 y_1(t) + c_2 y_2(t).$$

Vamos procurar uma solução particular da equação não homogênea que tenha a forma da solução geral da homogênea, mas substituindo os parâmetros (constantes) c_1 e c_2 por funções a determinar $u_1(t)$ e $u_2(t)$, respectivamente, ou seja, da forma

$$y_p(t) = u_1(t)y_1(t) + u_2(t)y_2(t). \quad (2.28)$$

com a condição de que

$$y'_p(t) = u_1(t)y'_1(t) + u_2(t)y'_2(t),$$

ou equivalentemente que

$$u'_1(t)y_1(t) + u'_2(t)y_2(t) = 0 \quad (2.29)$$

Assim,

$$y''_p(t) = u'_1(t)y'_1(t) + u_1(t)y''_1(t) + u'_2(t)y'_2(t) + u_2(t)y''_2(t)$$

Substituindo-se $y_p(t)$, $y'_p(t)$ e $y''_p(t)$ na equação obtemos

$$\begin{aligned} & u'_1(t)y'_1(t) + u_1(t)y''_1(t) + u'_2(t)y'_2(t) + u_2(t)y''_2(t) \\ & + p(t)(u_1(t)y'_1(t) + u_2(t)y'_2(t)) \\ & + q(t)(u_1(t)y_1(t) + u_2(t)y_2(t)) = f(t) \end{aligned}$$

Agrupando os termos que contém $u'_1(t)$, $u'_2(t)$, $u_1(t)$ e $u_2(t)$ obtemos a equação diferencial de 1a. ordem para $u_1(t)$ e $u_2(t)$

$$\begin{aligned} & u'_1(t)y'_1(t) + u'_2(t)y'_2(t) + u_1(t) \underbrace{(y''_1(t) + p(t)y'_1(t) + q(t)y_1(t))}_{=0} \\ & + u_2(t) \underbrace{(y''_2(t) + p(t)y'_2(t) + q(t)y_2(t))}_{=0} = f(t) \quad (2.30) \end{aligned}$$

Portanto, $u_1(t)$ e $u_2(t)$ satisfazem além da equação (2.29) a equação

$$u_1'(t)y_1'(t) + u_2'(t)y_2'(t) = f(t) \quad (2.31)$$

Assim, juntando as equações (2.29) e (2.31) obtemos o sistema de equações lineares para $u_1'(t)$ e $u_2'(t)$

$$\begin{cases} y_1(t)u_1'(t) + y_2(t)u_2'(t) = 0 \\ y_1'(t)u_1'(t) + y_2'(t)u_2'(t) = f(t) \end{cases}$$

que pode ser escrito na forma

$$AX = B$$

em que

$$A = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1(t) & y_2(t) \\ y_1'(t) & y_2'(t) \end{bmatrix}, \quad X = \begin{bmatrix} u_1'(t) \\ u_2'(t) \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ f(t) \end{bmatrix}.$$

que tem solução

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} u_1'(t) \\ u_2'(t) \end{bmatrix} &= X = A^{-1}B = \frac{1}{\det(A)} \begin{bmatrix} d & -b \\ -c & a \end{bmatrix} B = \frac{1}{W[y_1, y_2](t)} \begin{bmatrix} y_2'(t) & -y_2(t) \\ -y_1'(t) & y_1(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ f(t) \end{bmatrix} \\ &= \frac{1}{W[y_1, y_2](t)} \begin{bmatrix} -y_2(t)f(t) \\ y_1(t)f(t) \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Obtemos assim duas equações diferenciais de 1a. ordem

$$u_1'(t) = -\frac{y_2(t)f(t)}{W[y_1, y_2](t)}$$

$$u_2'(t) = \frac{y_1(t)f(t)}{W[y_1, y_2](t)}$$

que podem ser resolvidas simplesmente integrando-se

$$u_1(t) = - \int \frac{y_2(t)f(t)}{W[y_1, y_2](t)} dt$$

$$u_2(t) = \int \frac{y_1(t)f(t)}{W[y_1, y_2](t)} dt$$

Substituindo $u_1(t)$ e $u_2(t)$ na equação (2.28) obtemos uma solução particular

$$y_p(t) = -y_1(t) \int \frac{y_2(t)f(t)}{W[y_1, y_2](t)} dt + y_2(t) \int \frac{y_1(t)f(t)}{W[y_1, y_2](t)} dt.$$

Atenção: Não se deve memorizar a fórmula obtida. O que fizemos aqui foi mostrar o caminho que deve ser seguido para encontrar uma solução particular da equação linear não homogênea de 2ª ordem.

No próximo exemplo vamos seguir os mesmos passos que seguimos no caso geral.

Exemplo 2.13. Vamos resolver o problema de valor inicial

$$\begin{cases} y'' + y = \sec t \\ y(0) = 1, y'(0) = -2. \end{cases}$$

A solução geral da equação homogênea correspondente, $y'' + y = 0$, é

$$y_h(t) = c_1 \cos t + c_2 \sin t.$$

Vamos procurar uma solução particular da forma

$$y_p(t) = u_1(t) \cos t + u_2(t) \sin t, \quad (2.32)$$

com a condição

$$y'_p(t) = u_1(t)(-\sin t) + u_2(t) \cos t \quad (2.33)$$

ou equivalentemente

$$u'_1(t) \cos t + u'_2(t) \sin t = 0. \quad (2.34)$$

Substituindo-se $y_p(t)$, $y'_p(t)$ e $y''_p(t)$ na equação diferencial e simplificando (veja a equação 2.30) obtemos

$$u'_1(t)(-\sin t) + u'_2(t) \cos t = \sec t. \quad (2.35)$$

Resolvendo-se o sistema linear obtido das equações (2.34) e (2.35) obtemos

$$\begin{bmatrix} u'_1(t) \\ u'_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{\sec t}{\cos t} \\ 1 \end{bmatrix}$$

Integrando-se cada equação obtemos

$$u_1(t) = \int -\frac{\sec t}{\cos t} dt = \ln |\cos t| + c_1, \quad u_2(t) = \int 1 dt = t + c_2.$$

Tomando $c_1 = 0$ e $c_2 = 0$ e substituindo-se em (2.32) obtemos a solução particular

$$y_p(t) = (\ln |\cos t|) \cos t + t \sin t.$$

Portanto, a solução geral da equação é

$$y(t) = (\ln |\cos t|) \cos t + t \sin t + c_1 \cos t + c_2 \sin t. \quad (2.36)$$

Substituindo-se $t = 0$ e $y = 1$ em (2.36) obtemos $c_1 = 1$. Por (2.33), a derivada da solução particular é

$$y'_p(t) = -u_1(t) \sin t + u_2(t) \cos t = -(\ln |\cos t|) \sin t + t \cos t$$

e assim a derivada da solução geral (2.36) é dada por

$$y'(t) = -(\ln |\cos t|) \operatorname{sen} t + t \cos t - c_1 \operatorname{sen} t + c_2 \cos t. \quad (2.37)$$

Substituindo-se $t = 0$ e $y' = -2$ em (2.37) obtemos $c_2 = -2$. Logo, a solução do PVI é

$$y(t) = (\ln |\cos t|) \cos t + t \operatorname{sen} t + \cos t - 2 \operatorname{sen} t, \quad \text{para } -\frac{\pi}{2} < t < \frac{\pi}{2}.$$

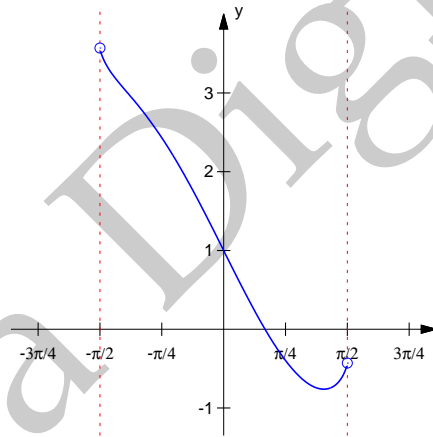


Figura 2.8. A solução do problema de valor inicial do Exemplo 2.13

2.3.2 Método dos Coeficientes a Determinar para Equações com Coeficientes Constantes

Vamos tratar equações lineares não homogêneas com coeficientes constantes, ou seja, da forma

$$ay'' + by' + cy = f(t). \quad (2.38)$$

em que a, b e c são números reais, $a \neq 0$.

Este método funciona quando a função $f(t)$ tem uma das seguintes formas:

(Caso 1) $f(t) = a_0 + \dots + a_n t^n$, em que $a_0, \dots, a_n \in \mathbb{R}$.

Neste caso deve-se procurar uma solução particular da forma

$$y_p(t) = t^s (A_0 + \dots + A_n t^n),$$

em que s é o menor inteiro não negativo que garanta que nenhuma parcela de $y_p(t)$ seja solução da equação homogênea correspondente e A_0, \dots, A_n são coeficientes a serem determinados substituindo-se $y_p(t)$ na equação (2.38). O

Exemplo 2.14 ilustra este caso.

(Caso 2) $f(t) = (a_0 + \dots + a_n t^n) e^{\alpha t}$, em que $a_0, \dots, a_n, \alpha \in \mathbb{R}$.

Neste caso deve-se procurar uma solução particular da forma

$$y_p(t) = t^s (A_0 + \dots + A_n t^n) e^{\alpha t},$$

em que s é o menor inteiro não negativo que garanta que nenhuma parcela de $y_p(t)$ seja solução da equação homogênea correspondente e A_0, \dots, A_n são coeficientes a serem determinados substituindo-se $y_p(t)$ na equação (2.38). O

Exemplo 2.15 ilustra este caso.

(Caso 3) $f(t) = (a_0 + \dots + a_n t^n) e^{\alpha t} \cos \beta t$ ou $f(t) = (a_0 + \dots + a_n t^n) e^{\alpha t} \sin \beta t$,

em que $a_0, \dots, a_n, \alpha, \beta \in \mathbb{R}$.

Neste caso deve-se procurar uma solução particular da forma

$$y_p(t) = t^s [(A_0 + \dots + A_n t^n) e^{\alpha t} \cos \beta t + (B_0 + \dots + B_n t^n) e^{\alpha t} \sin \beta t],$$

em que s é o menor inteiro não negativo que garanta que nenhuma parcela de $y_p(t)$ seja solução da equação homogênea correspondente e $A_0, \dots, A_n, B_0, \dots, B_n$ são coeficientes a serem determinados substituindo-se $y_p(t)$ na equação (2.38).

O Exemplo 2.16 ilustra este caso.

Observe que os três casos não são excludentes. O Caso 1 é um caso particular do Caso 2 com $\alpha = 0$. O Caso 2 é um caso particular do Caso 3 com $\beta = 0$.

Exemplo 2.14. Vamos encontrar a solução do problema de valor inicial

$$\begin{cases} y'' + y' = 2 + t^2 \\ y(0) = 1, \quad y'(0) = 2. \end{cases}$$

Precisamos encontrar a solução geral da equação homogênea correspondente

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

A equação característica é

$$r^2 + r = 0 \iff r = 0 \text{ ou } r = -1.$$

Assim, a solução geral da equação homogênea correspondente $y'' + y' = 0$ é

$$y_h(t) = c_1 + c_2 e^{-t}.$$

O segundo membro da equação diferencial, $f(t) = 2 + t^2$, é da forma do Caso 1. Este é um polinômio de grau 2, ou seja, é um caso particular de $f(t) = a_0 + \dots + a_n t^n$, em que $a_0 = 2, a_1 = 0, a_2 = 1, n = 2$. Vamos procurar uma solução particular da forma

$$y_p(t) = t^1(A_0 + A_1 t + A_2 t^2) = A_0 t + A_1 t^2 + A_2 t^3.$$

O valor de s é igual a 1, pois para $s = 0$, a parcela A_0 é solução da equação homogênea ($c_2 = 0$ e $c_1 = A_0$).

$$y_p'(t) = A_0 + 2A_1t + 3A_2t^2$$

$$y_p''(t) = 2A_1 + 6A_2t.$$

Substituindo-se $y_p'(t)$ e $y_p''(t)$ na equação $y'' + y' = 2 + t^2$ obtemos

$$(2A_1 + 6A_2t) + (A_0 + 2A_1t + 3A_2t^2) = 2 + t^2.$$

Comparando-se os termos de mesmo grau obtemos o sistema linear

$$\begin{cases} A_0 + 2A_1 = 2 \\ 2A_1 + 6A_2 = 0 \\ 3A_2 = 1 \end{cases}$$

que tem solução $A_0 = 4$, $A_1 = -1$ e $A_2 = 1/3$. Assim, uma solução particular da equação não homogênea é

$$y_p(t) = 4t - t^2 + \frac{1}{3}t^3$$

e a solução geral da equação não homogênea é

$$y(t) = c_1 + c_2 e^{-t} + 4t - t^2 + \frac{1}{3}t^3. \quad (2.39)$$

Para resolvermos o problema de valor inicial vamos calcular a derivada da solução geral da equação não homogênea

$$y'(t) = -c_2 e^{-t} + t^2 - 2t + 4. \quad (2.40)$$

Substituindo-se $t = 0$ e $y = 1$ em (2.39) e $t = 0$ e $y' = 2$ em (2.40) obtemos

$$\begin{cases} c_1 + c_2 = 1 \\ 4 - c_2 = 2 \end{cases}$$

de onde obtemos $c_1 = -1$ e $c_2 = 2$. Logo, a solução do PVI é

$$y(t) = -1 + 2e^{-t} + 4t - t^2 + \frac{1}{3}t^3.$$

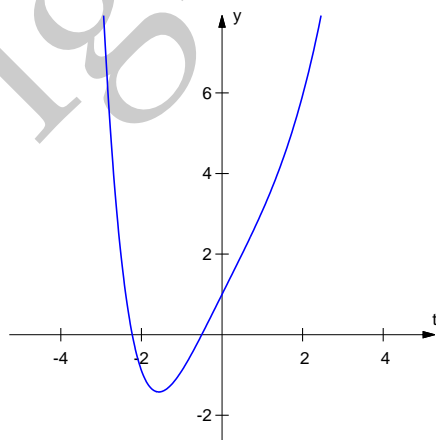


Figura 2.9. A solução do problema de valor inicial do Exemplo 2.14

Exemplo 2.15. Vamos encontrar a solução geral da equação

$$y'' + 2y' + y = (2 + t)e^{-t}.$$

Precisamos encontrar a solução geral da equação homogênea correspondente

$$y'' + 2y' + y = 0.$$

A equação característica é

$$r^2 + 2r + 1 = 0 \iff r = -1$$

Assim, a solução geral da equação homogênea correspondente $y'' + 2y' + y = 0$ é

$$y_h(t) = c_1 e^{-t} + c_2 t e^{-t}.$$

O segundo membro da equação diferencial, $f(t) = (2 + t)e^{-t}$, é da forma do Caso 2. É um caso particular de $f(t) = (a_0 + \dots + a_n t^n)e^{\alpha t}$ em que $a_0 = 2$, $a_1 = 1$, $n = 1$ e $\alpha = -1$. Vamos procurar uma solução particular da forma

$$y_p(t) = t^2(A_0 + A_1 t)e^{-t} = (A_0 t^2 + A_1 t^3)e^{-t}.$$

O valor de s é igual a 2, pois para $s = 0$ as parcelas $A_0 e^{-t}$ e $A_1 t e^{-t}$ são soluções da equação homogênea ($c_1 = A_0$, $c_2 = 0$ e $c_1 = 0$, $c_2 = A_1$) e para $s = 1$ a parcela $A_0 t e^{-t}$ é solução da equação homogênea ($c_1 = 0$ e $c_2 = A_0$).

$$y_p'(t) = (2A_0 t + (3A_1 - A_0)t^2 - A_1 t^3)e^{-t},$$

$$y_p''(t) = (2A_0 + (6A_1 - 4A_0)t + (A_0 - 6A_1)t^2 + A_1 t^3)e^{-t}.$$

Substituindo-se $y_p(t)$, $y_p'(t)$ e $y_p''(t)$ na equação $y'' + 2y' + y = (2+t)e^{-t}$ obtemos

$$\begin{aligned} & \left(2A_0 + (6A_1 - 4A_0)t + (A_0 - 6A_1)t^2 + A_1t^3\right)e^{-t} + \\ & + 2\left(2A_0t + (3A_1 - A_0)t^2 - A_1t^3\right)e^{-t} + \\ & + (A_0t^2 + A_1t^3)e^{-t} = (2+t)e^{-t}. \end{aligned}$$

Simplificando-se obtemos

$$2A_0 + 6A_1t = 2 + t.$$

Comparando os termos de mesmo grau obtemos o sistema linear

$$\begin{cases} 2A_0 & = 2 \\ 6A_1 & = 1 \end{cases}$$

que tem solução $A_0 = 1$ e $A_1 = 1/6$. Assim, uma solução particular da equação não homogênea é

$$y_p(t) = \left(t^2 + \frac{1}{6}t^3\right)e^{-t}$$

e a solução geral da equação não homogênea é

$$y(t) = c_1e^{-t} + c_2te^{-t} + \left(t^2 + \frac{1}{6}t^3\right)e^{-t}.$$

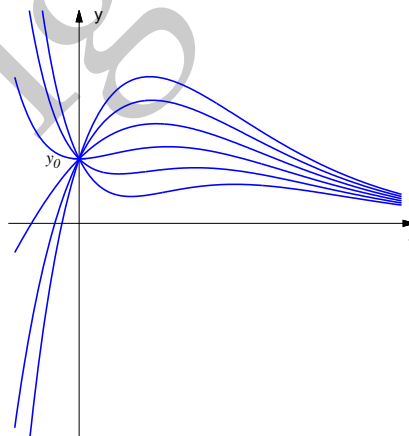


Figura 2.10. Algumas soluções da equação do Exemplo 2.15 tais que $y(0) = y_0$

Exemplo 2.16. Vamos encontrar a solução geral da equação

$$y'' + 2y' + 2y = e^t \cos t.$$

Precisamos encontrar a solução geral da equação homogênea correspondente

$$y'' + 2y' + 2y = 0.$$

A equação característica é

$$r^2 + 2r + 2 = 0 \iff r = -1 \pm i.$$

Assim, a solução geral da equação homogênea correspondente $y'' + 2y' + 2y = 0$ é

$$y_h(t) = c_1 e^{-t} \cos t + c_2 e^{-t} \sin t.$$

O segundo membro da equação diferencial, $f(t) = e^t \cos t$, é da forma do Caso 3. É um caso particular de $f(t) = (a_0 + \dots + a_n t^n) e^{\alpha t} \cos \beta t$, em que $a_0 = 1$, $n = 0$, $\alpha = 1$ e $\beta = 1$. Vamos procurar uma solução particular da forma

$$y_p(t) = t^0 (Ae^t \cos t + Be^t \sin t) = Ae^t \cos t + Be^t \sin t.$$

O valor de s é igual a 0, pois nenhuma parcela de $y_p(t)$ é solução da equação homogênea.

$$y'_p(t) = A(e^t \cos t - e^t \sin t) + B(e^t \sin t + e^t \cos t) = (A + B)e^t \cos t + (B - A)e^t \sin t$$

$$y''_p(t) = 2Be^t \cos t - 2Ae^t \sin t.$$

Substituindo-se $y_p(t)$, $y'_p(t)$ e $y''_p(t)$ na equação $y'' + 2y' + 2y = e^t \cos t$ obtemos

$$\begin{aligned} 2Be^t \cos t - 2Ae^t \sin t + 2((A + B)e^t \cos t + (B - A)e^t \sin t) \\ + 2(Ae^t \cos t + Be^t \sin t) = e^t \cos t. \end{aligned}$$

Simplificando-se obtemos

$$(4A + 4B) \cos t + (4B - 4A) \sin t = \cos t.$$

Substituindo $t = 0$ e $t = \pi/2$ obtemos o sistema linear

$$\begin{cases} 4A + 4B = 1 \\ -4A + 4B = 0 \end{cases}$$

que tem solução $A = 1/8$ e $B = 1/8$. Assim, uma solução particular da equação não homogênea é

$$y_p(t) = \frac{1}{8}e^t \cos t + \frac{1}{8}e^t \sin t$$

e a solução geral da equação não homogênea é

$$y(t) = c_1 e^{-t} \cos t + c_2 e^{-t} \sin t + \frac{1}{8}e^t (\cos t + \sin t).$$

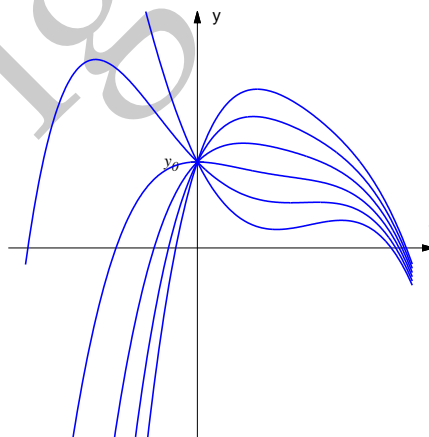


Figura 2.11. Algumas soluções da equação do Exemplo 2.16 tais que $y(0) = y_0$

Exercícios (respostas na página 431)

3.1. Encontre a solução geral das equações:

(a) $y'' + 5y' + 6y = xe^{-5x}$.

(b) $y'' - 4y' + 6y = 3x$.

(c) $y'' + y = \operatorname{cosec} t$

(d) $y'' - y = (1 + e^{-t})^{-2}$

(e) $y'' + 4y = 2 \operatorname{sen}(2t) + t$

(f) $y'' + 2y = e^t + 2$

3.2. Resolva os problemas de valor inicial:

(a) $y'' + y' - 2y = t^2 + 3$, $y(0) = 0$, $y'(0) = 0$

(b) $y'' + 2y' + y = 3 \operatorname{sen}(2t)$, $y(0) = 0$, $y'(0) = 0$

(c) $y'' - 4y' + 4y = 3e^{-t}$, $y(0) = 0$, $y'(0) = 0$

(d) $2y'' + 2y' + y = t^2$, $y(0) = 0$, $y'(0) = 0$

3.3. (a) Encontre a solução geral da equação

$$y'' + 2y' + \alpha y = 0$$

para $\alpha > 1$, para $\alpha = 1$ e para $\alpha < 1$.

(b) Determine a forma adequada para uma solução particular da equação

$$y'' + 2y' + \alpha y = te^{-t} \operatorname{sen}(\sqrt{\alpha - 1} t)$$

para $\alpha > 1$.

2.4 Oscilações Livres

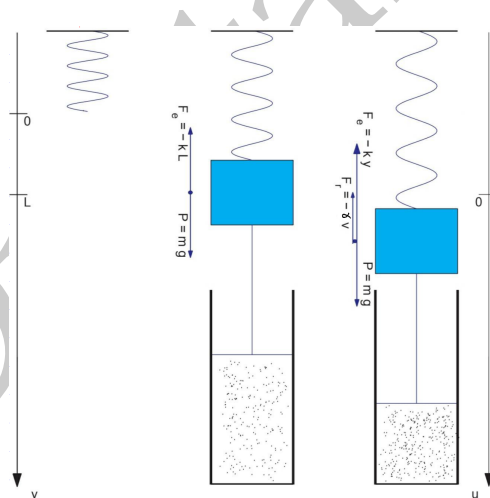


Figura 2.12. Sistema massa-mola na vertical

Considere um sistema massa-mola na vertical. Seja L o comprimento da deformação provocada na mola pela colocação de um corpo de massa m quando o sistema está em equilíbrio. Neste caso a magnitude da força elástica é proporcional a deformação e igual a magnitude da força peso, ou seja,

$$mg = kL. \quad (2.41)$$

Aqui k é chamada **constante da mola**. Vamos agora colocar o sistema em movimento. Seja $y(t)$ o alongamento da mola em um instante t . Neste caso a origem, $y = 0$, é o ponto de equilíbrio da mola. Sobre o corpo de massa m agem o seu peso,

$$P = mg,$$

a força da mola que é proporcional a sua deformação e tem sentido oposto a ela,

$$F_e = -ky(t),$$

uma força de resistência proporcional à velocidade,

$$F_r = -\gamma y'(t).$$

Aqui γ é a **constante de amortecimento**.

Pela segunda lei de Newton, temos que

$$my''(t) = mg - ky(t) - \gamma y'(t).$$

Definindo a nova função

$$u(t) = y(t) - L,$$

ou seja, fazendo uma translação de forma que a nova origem seja o ponto de equilíbrio do sistema massa-mola, obtemos

$$mu''(t) = mg - k(L + u(t)) - \gamma u'(t). \quad (2.42)$$

Assim, por (2.41) e (2.42), $u(t)$ satisfaz a seguinte equação diferencial

$$mu''(t) + \gamma u'(t) + ku(t) = 0. \quad (2.43)$$

que é a mesma equação que satisfaz $x(t)$ no caso em que o sistema massa-mola se movimenta na horizontal sobre uma superfície lisa. Verifique!

2.4.1 Sem Amortecimento

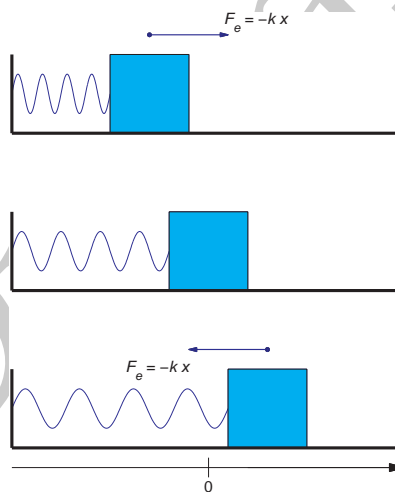


Figura 2.13. Sistema massa-mola livre não amortecido

Vamos considerar inicialmente o caso em que não há amortecimento, ou seja, $\gamma = 0$. Assim, a equação (2.43) para o movimento do sistema massa-mola é

$$mu'' + ku = 0$$

A equação característica é

$$mr^2 + k = 0 \Leftrightarrow r = \pm \sqrt{\frac{k}{m}} i$$

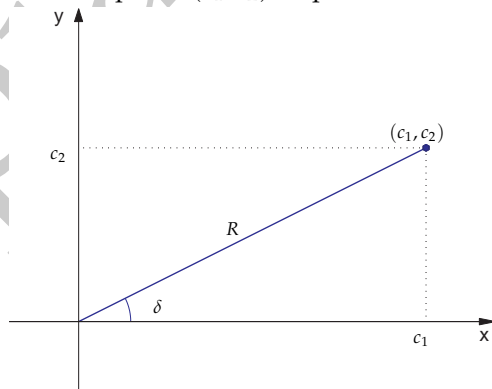
Assim, a solução geral da equação é

$$u(t) = c_1 \cos\left(\sqrt{\frac{k}{m}} t\right) + c_2 \sin\left(\sqrt{\frac{k}{m}} t\right)$$

Seja $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$. Então, a equação acima pode ser escrita em termos de ω_0 como

$$u(t) = c_1 \cos(\omega_0 t) + c_2 \sin(\omega_0 t). \quad (2.44)$$

Marcando o ponto (c_1, c_2) no plano e escrevendo em coordenadas polares temos que



$$\begin{cases} c_1 = R \cos \delta, \\ c_2 = R \sin \delta. \end{cases} \quad (2.45)$$

Substituindo-se os valores de c_1 e c_2 obtidos de (2.45) na equação (2.44) obtemos

$$\begin{aligned}u(t) &= R \cos \delta \cos(\omega_0 t) + R \sin \delta \sin(\omega_0 t) \\&= R (\cos \delta \cos(\omega_0 t) + \sin \delta \sin(\omega_0 t)) \\&= R \cos(\omega_0 t - \delta),\end{aligned}$$

Aqui foi usada a relação

$$\cos(a - b) = \cos a \cos b + \sin a \sin b.$$

ω_0 é chamada **frequência natural** do sistema, δ a **fase** e R a **amplitude**.

Neste caso a solução da equação é periódica de **período** $T = \frac{2\pi}{\omega_0}$. Este movimento oscilatório é chamado **movimento harmônico simples**.

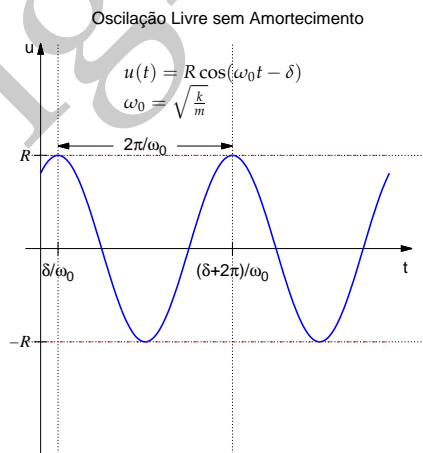


Figura 2.14. Solução do sistema massa-mola livre não amortecido

Exemplo 2.17. Sabendo-se que o problema de valor inicial que descreve um sistema massa-mola é dado por

$$u'' + 3u = 0, \quad u(0) = -1, \quad u'(0) = 3$$

- (a) Encontre a solução geral da equação diferencial e resolva o problema de valor inicial. Determine a amplitude, a frequência, a fase e o período.
- (b) Esboce o gráfico da solução obtida.

Solução:

- (a) Equação característica é $r^2 + 3 = 0$, que tem como raízes $r = \pm\sqrt{3}i$. Logo, a solução geral da equação diferencial é :

$$u(t) = c_1 \cos(\sqrt{3} t) + c_2 \sin(\sqrt{3} t).$$

Para resolver o PVI precisamos calcular a derivada da solução geral:

$$u'(t) = -c_1 \sqrt{3} \sin(\sqrt{3} t) + c_2 \sqrt{3} \cos(\sqrt{3} t)$$

Substituindo-se $t = 0$, $u = -1$, $u' = 3$ obtemos:

$$c_1 = -1, \quad c_2 = \sqrt{3}.$$

A solução do PVI é portanto

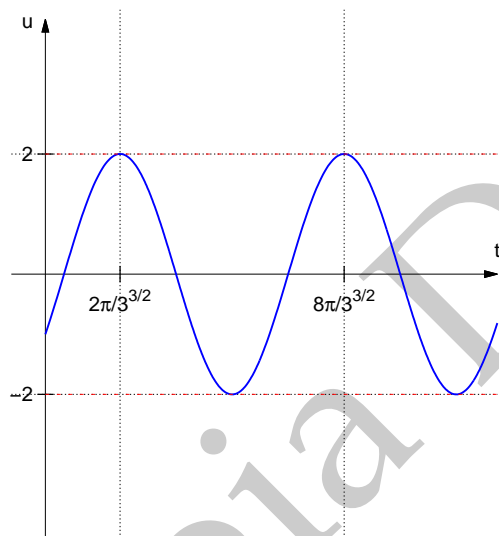
$$u(t) = -\cos(\sqrt{3} t) + \sqrt{3} \sin(\sqrt{3} t).$$

Marcando o ponto $(c_1, c_2) = (-1, \sqrt{3})$ no plano obtemos que $R = 2$ e $\delta = \frac{2\pi}{3}$, ou seja,

$$u(t) = 2 \cos\left(\sqrt{3} t - \frac{2\pi}{3}\right)$$

A amplitude é igual a 2, a frequência é igual a $\sqrt{3}$, a fase é igual a $\frac{2\pi}{3}$ e o período é igual a $2\pi/\sqrt{3}$.

(b)



2.4.2 Com Amortecimento

Neste caso a equação (2.43) para o movimento do sistema massa-mola é

$$mu'' + \gamma u' + ku = 0$$

A equação característica é $mr^2 + \gamma r + k = 0$ e $\Delta = \gamma^2 - 4km$

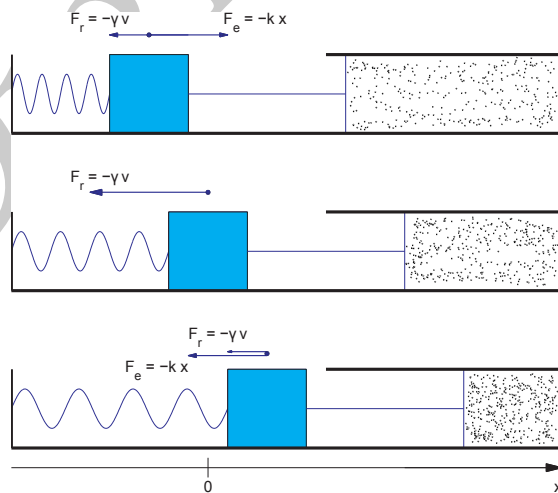


Figura 2.15. Sistema massa-mola livre com amortecimento

Aqui temos três casos a considerar:

- (a) Se $\Delta = \gamma^2 - 4km > 0$ ou $\gamma > 2\sqrt{km}$, neste caso

$$u(t) = c_1 e^{r_1 t} + c_2 e^{r_2 t},$$

em que

$$r_{1,2} = \frac{-\gamma \pm \sqrt{\Delta}}{2m} = \frac{-\gamma \pm \sqrt{\gamma^2 - 4km}}{2m} < 0$$

Este caso é chamado **superamortecimento** e a solução

$$u(t) \rightarrow 0 \quad \text{quando } t \rightarrow +\infty.$$

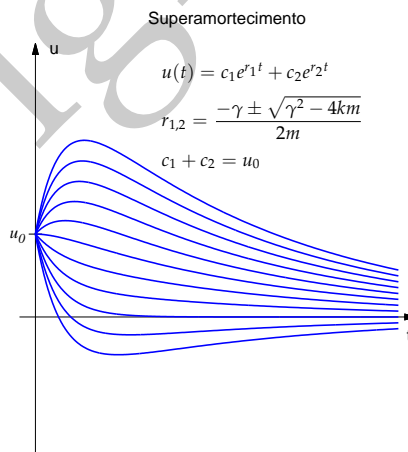


Figura 2.16. Algumas soluções do sistema massa-mola livre com superamortecimento

(b) Se $\Delta = \gamma^2 - 4km = 0$ ou $\gamma = 2\sqrt{km}$, neste caso

$$u(t) = c_1 e^{-\frac{\gamma t}{2m}} + c_2 t e^{-\frac{\gamma t}{2m}}$$

Este caso é chamado **amortecimento crítico** e a solução

$$u(t) \rightarrow 0 \quad \text{quando } t \rightarrow +\infty.$$

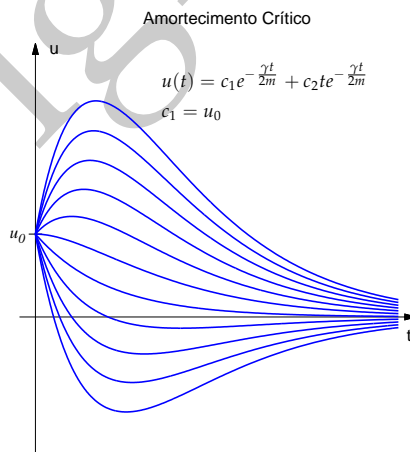


Figura 2.17. Algumas soluções do sistema massa-mola livre com amortecimento crítico

(c) Se $\Delta = \gamma^2 - 4km < 0$ ou $0 < \gamma < 2\sqrt{km}$, neste caso

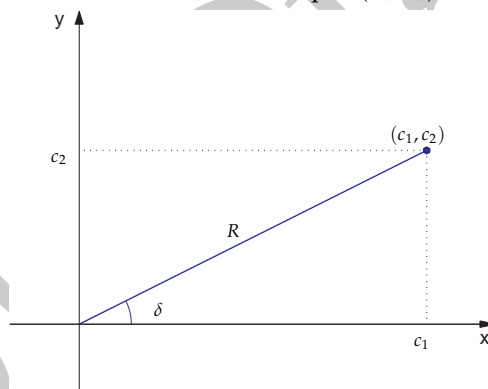
$$u(t) = e^{-\frac{\gamma t}{2m}} (c_1 \cos \mu t + c_2 \sin \mu t) \quad (2.46)$$

em que

$$\mu = \frac{\sqrt{4km - \gamma^2}}{2m} = \sqrt{\omega_0^2 - \frac{\gamma^2}{4m^2}} < \omega_0$$

Aqui, μ é chamado **quase frequência** e $T = \frac{2\pi}{\mu}$ é chamado **quase período**.

Escrevendo novamente o par (c_1, c_2) em coordenadas polares temos que



$$\begin{cases} c_1 = R \cos \delta, \\ c_2 = R \sin \delta. \end{cases} \quad (2.47)$$

Substituindo-se os valores de c_1 e c_2 na equação (2.46) obtemos

$$u(t) = e^{-\frac{\gamma t}{2m}} (R \cos \delta \cos \mu t + R \sin \delta \sin \mu t) = R e^{-\frac{\gamma t}{2m}} \cos(\mu t - \delta),$$

em que $R = \sqrt{c_1^2 + c_2^2}$ e δ são obtidos de (2.47).

Este caso é chamado **subamortecimento** e a solução

$$u(t) \rightarrow 0 \quad \text{quando } t \rightarrow +\infty.$$

Este é um movimento oscilatório com amplitude $Re^{-\frac{\gamma t}{2m}}$ e é chamado **quase periódico**.

Observe que nos três casos a solução $u(t) \rightarrow 0$ quando $t \rightarrow +\infty$.

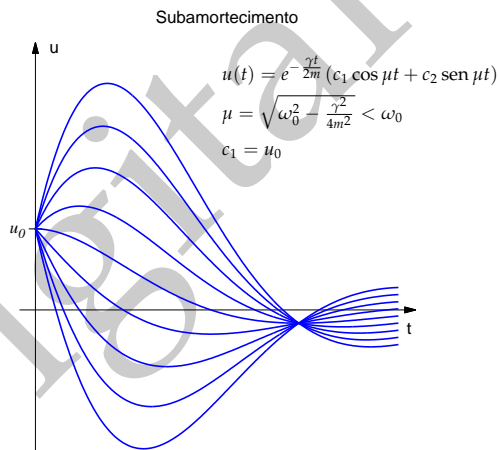


Figura 2.18. Algumas soluções do sistema massa-mola livre com subamortecimento

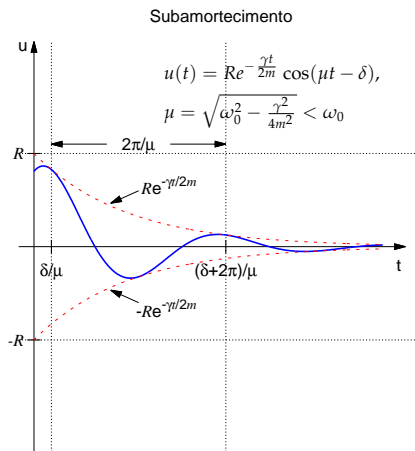


Figura 2.19. Solução típica do sistema massa-mola livre com subamortecimento

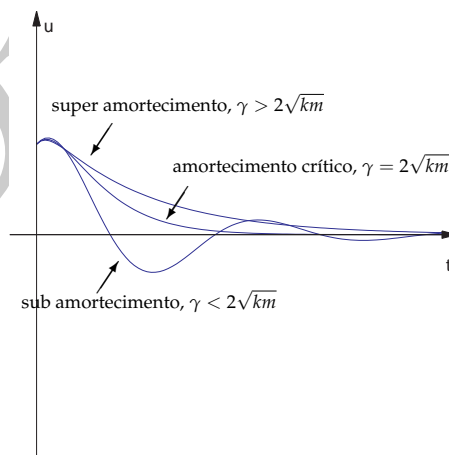


Figura 2.20. Comparação das soluções do sistema massa-mola livre com amortecimento para diferentes valores da constante de amortecimento γ

Exercícios (respostas na página 440)

- 4.1. Sabendo-se que o problema de valor inicial que descreve um sistema massa-mola é dado por

$$u'' + 3u = 0, \quad u(0) = 1, \quad u'(0) = 3$$

- (a) Encontre a solução geral da equação diferencial e resolva o problema de valor inicial. Determine a amplitude, a frequência, a fase e o período.
- (b) Esboce o gráfico da solução obtida.

- 4.2. Sabendo-se que o problema de valor inicial que descreve um sistema massa-mola é dado por

$$2u'' + 3u = 0, \quad u(0) = 1, \quad u'(0) = 0$$

- (a) Encontre a solução geral da equação e resolva o problema de valor inicial. Determine a amplitude, a frequência, a fase e o período.
- (b) Esboce o gráfico da solução obtida.

- 4.3. Se um sistema massa-mola com uma massa de 2 kg e uma mola com constante de elasticidade igual 0,5 N/m é colocado em movimento, no instante $t = 0$, num meio em que a constante de amortecimento é igual a 1 N.s/m, determine a posição da massa em qualquer instante t , considerando a posição inicial igual u_0 e a velocidade inicial u'_0 .

- 4.4. Um corpo de massa 100 gramas estica uma mola 10 centímetros. Suponha que não haja amortecimento e que a aceleração da gravidade seja de 10^3 centímetros por segundo ao quadrado. Encontre a frequência, o período e a amplitude do movimento. Determine a posição u em função do tempo t e faça um esboço do seu gráfico.

- (a) Se o sistema é colocado em movimento a partir da sua posição de equilíbrio com uma velocidade apontada para cima de 4 centímetros por segundo.
- (b) Se o sistema é puxado para baixo esticando a mola 1 centímetro e colocado em movimento com uma velocidade para baixo de 10 centímetros por segundo.

- (c) Se o sistema é puxado para baixo esticando a mola 2 centímetros e depois é solto.
- 4.5. Um corpo de massa 100 gramas estica uma mola 10 centímetros. A corpo está preso a um amortecedor viscoso. Suponha que a aceleração da gravidade seja de 10^3 centímetros por segundo ao quadrado.
- (a) Para quais valores da constante de amortecimento γ o sistema é super-amortecido, tem um amortecimento crítico e é sub-amortecido.
- (b) Suponha que o amortecedor exerce uma força de 10^4 dinas (=gramas·centímetros por segundos²) quando a velocidade é de 10 centímetros por segundo. Se o sistema é puxado para baixo 2 centímetros e depois é solto, determine a posição u em função do tempo t e faça um esboço do seu gráfico. Qual o valor do quase período?
- 4.6. O movimento de um pêndulo simples de massa m e comprimento l é descrito pela função $\theta(t)$ que satisfaz a equação diferencial

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{g}{l} \sin \theta = 0.$$

Suponha que o ângulo θ seja pequeno o suficiente para que seja válida a aproximação $\sin \theta \approx \theta$.

- (a) Encontre $\theta(t)$ sabendo-se que o pêndulo é solto de um ângulo θ_0 .
- (b) Determine a frequência, o período e a amplitude de oscilação do pêndulo.

2.5 Oscilações Forçadas

Vamos supor que uma força externa periódica da forma $F_{ext}(t) = F_0 \cos(\omega t)$, com $F_0, \omega > 0$, seja aplicada ao corpo de massa m . Então, a equação para o movimento da massa é (verifique!)

$$mu'' + \gamma u' + ku = F_0 \cos(\omega t).$$

2.5.1 Sem Amortecimento

Neste caso a equação diferencial para o movimento do sistema massa-mola é

$$mu'' + ku = F_0 \cos(\omega t). \quad (2.48)$$

Sabemos que as soluções são da forma

$$u(t) = c_1 \cos(\omega_0 t) + c_2 \sin(\omega_0 t) + u_p(t)$$

em que, pelo método dos coeficientes a determinar,

$$u_p(t) = t^s [A \cos(\omega t) + B \sin(\omega t)]$$

é uma solução particular e s é o menor inteiro não negativo que garanta que nenhuma parcela de $u_p(t)$ seja solução da equação homogênea correspondente e A e B são coeficientes a serem determinados substituindo-se $u_p(t)$ na equação diferencial (2.48).

Temos dois casos a considerar:

- (a) Se $\omega \neq \omega_0$. Neste caso $s = 0$, pois nenhuma das parcelas de $u_p(t)$ é solução da equação homogênea correspondente. Então, a solução particular é da forma

$$u_p(t) = A \cos(\omega t) + B \sin(\omega t)$$

e a solução geral da equação é da forma

$$u(t) = c_1 \cos(\omega_0 t) + c_2 \sin(\omega_0 t) + A \cos(\omega t) + B \sin(\omega t)$$

Deixamos como exercício para o leitor verificar que substituindo-se $u_p(t)$ na equação diferencial (2.48) encontramos

$$A = \frac{F_0}{m(\omega_0^2 - \omega^2)} \text{ e } B = 0.$$

Assim,

$$u(t) = c_1 \cos(\omega_0 t) + c_2 \sin(\omega_0 t) + \frac{F_0}{m(\omega_0^2 - \omega^2)} \cos(\omega t).$$

Neste caso a solução $u(t)$ é oscilatória e limitada.

- (b) Se $\omega = \omega_0$. Neste caso $s = 1$, pois para $s = 0$ as parcelas, $A \cos(\omega_0 t)$ e $B \sin(\omega_0 t)$, de $u_p(t)$, são soluções da equação homogênea correspondente. Então, a solução particular é da forma

$$u_p(t) = t[A \cos(\omega t) + B \sin(\omega t)]$$

e a solução geral da equação é da forma

$$u(t) = c_1 \cos(\omega_0 t) + c_2 \sin(\omega_0 t) + t[A \cos(\omega_0 t) + B \sin(\omega_0 t)].$$

Deixamos como exercício para o leitor verificar que substituindo-se $u_p(t)$ na equação diferencial (2.48) encontramos

$$A = 0 \text{ e } B = \frac{F_0}{2m\omega_0}.$$

Assim,

$$u(t) = c_1 \cos(\omega_0 t) + c_2 \sin(\omega_0 t) + \frac{F_0}{2m\omega_0} t \sin(\omega_0 t).$$

Neste caso $u(t)$ é oscilatória, mas fica ilimitada quando t tende a $+\infty$. Este fenômeno é conhecido como **ressonância** e a frequência $\omega = \omega_0$ é chamada **frequência de ressonância**. Pelo princípio da superposição para equações não homogêneas segue que para haver ressonância, basta que a força externa seja uma soma e que uma parcela seja da forma $F_0 \cos(\omega_0 t)$ ou $G_0 \sin(\omega_0 t)$.

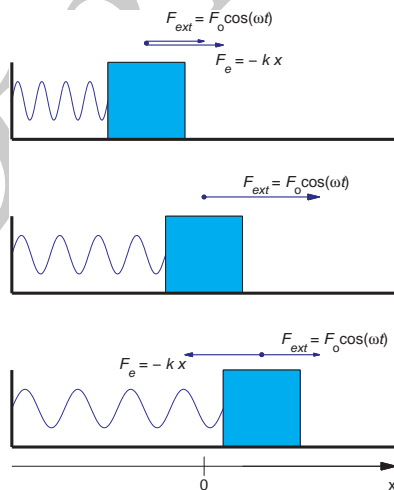


Figura 2.21. Sistema massa-mola forçado sem amortecimento

Exemplo 2.18. Vamos considerar o problema de valor inicial

$$\begin{cases} mu'' + ku = F_0 \cos(\omega t), \\ u(0) = 0, u'(0) = 0. \end{cases}$$

Temos dois casos a considerar:

(a) Se $\omega \neq \omega_0$. Vimos acima que a solução geral da equação é

$$u(t) = c_1 \cos(\omega_0 t) + c_2 \sin(\omega_0 t) + \frac{F_0}{m(\omega_0^2 - \omega^2)} \cos(\omega t)$$

Derivando e substituindo-se $t = 0$, $u = 0$ e $u' = 0$ obtemos que (verifique!)

$$c_1 = -\frac{F_0}{m(\omega_0^2 - \omega^2)}, \quad c_2 = 0.$$

Assim, a solução do problema de valor inicial é

$$u(t) = \frac{F_0}{m(\omega_0^2 - \omega^2)} (\cos(\omega t) - \cos(\omega_0 t)).$$

Como

$$\cos(A - B) - \cos(A + B) = 2 \sin A \sin B$$

então

$$u(t) = \frac{2F_0}{m(\omega_0^2 - \omega^2)} \sin(\omega_1 t) \sin(\omega_2 t),$$

em que

$$\omega_1 = \frac{\omega_0 - \omega}{2}, \quad \omega_2 = \frac{\omega_0 + \omega}{2}.$$

Como ω_1 é menor do que ω_2 , então o movimento é uma oscilação de frequência ω_2 com uma amplitude também oscilatória

$$R(t) = \frac{2F_0}{m(\omega_0^2 - \omega^2)} \sin(\omega_1 t)$$

de frequência ω_1 . Este movimento é chamado **batimento**.

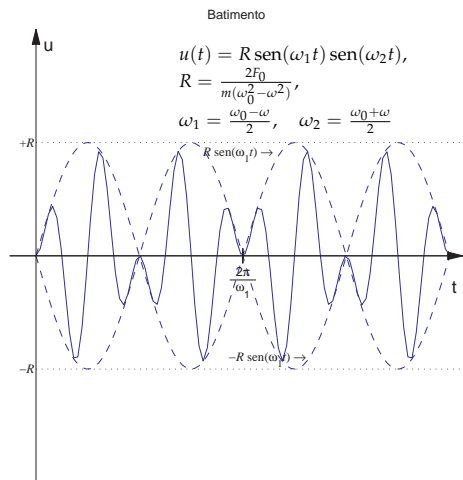


Figura 2.22. Solução do sistema massa-mola, para $u(0) = u'(0) = 0$, no caso de batimento

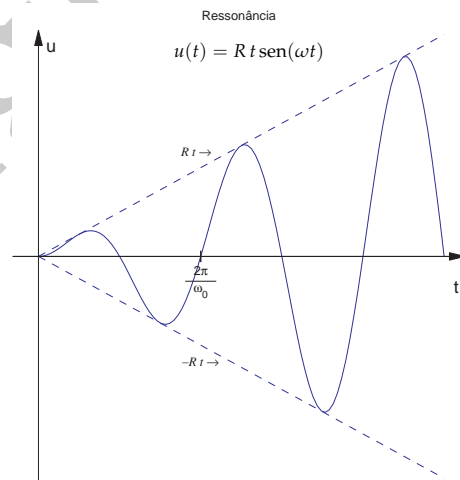


Figura 2.23. Solução do sistema massa-mola, para $u(0) = u'(0) = 0$, no caso de ressonância

- (b) Se $\omega = \omega_0$. Vimos acima que, neste caso, a solução geral da equação diferencial é

$$u(t) = c_1 \cos(\omega_0 t) + c_2 \sin(\omega_0 t) + \frac{F_0}{2m\omega_0} t \sin(\omega_0 t).$$

Já vimos que neste caso $u(t)$ fica ilimitada quando t tende a $+\infty$ que é o fenômeno da ressonância. Derivando e substituindo-se $t = 0$, $u = 0$ e $u' = 0$ obtemos que (verifique!)

$$c_1 = 0, \quad c_2 = 0.$$

Assim, a solução do problema de valor inicial é

$$u(t) = \frac{F_0}{2m\omega_0} t \sin(\omega_0 t).$$

Este movimento é uma oscilação de frequência ω_0 com uma amplitude

$$R(t) = \frac{F_0}{2m\omega_0} t$$

que aumenta proporcionalmente a t .

2.5.2 Com Amortecimento

Neste caso a equação diferencial para o movimento do sistema massa-mola é

$$mu'' + \gamma u' + ku = F_0 \cos(\omega t). \quad (2.49)$$

Seja $u(t) = c_1 u_1(t) + c_2 u_2(t)$ a solução da equação homogênea correspondente. Então, a solução geral desta equação é

$$u(t) = c_1 u_1(t) + c_2 u_2(t) + u_p(t),$$

em que $u_p(t)$ é uma solução particular. Pelo método dos coeficientes a determinar

$$u_p(t) = A \cos(\omega t) + B \sin(\omega t).$$

Deixamos como exercício para o leitor verificar que substituindo-se $u_p(t)$ e suas derivadas na equação diferencial (2.49) encontramos

$$A = \frac{F_0 m (\omega_0^2 - \omega^2)}{\Delta}, \quad B = \frac{F_0 \gamma \omega}{\Delta},$$

em que $\Delta = m^2(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \gamma^2 \omega^2$. Podemos escrever

$$u_p(t) = A \cos(\omega t) + B \sin(\omega t) = R \cos(\omega t - \delta),$$

em que $R = \sqrt{A^2 + B^2}$ e δ é tal que $A = R \cos \delta$ e $B = R \sin \delta$. Neste caso, verifique que a amplitude da solução estacionária é dada por

$$R = \frac{F_0}{\sqrt{\Delta}}.$$

Assim, a solução geral da equação é

$$u(t) = c_1 u_1(t) + c_2 u_2(t) + R \cos(\omega t - \delta).$$

A solução geral da equação homogênea correspondente, $c_1 u_1(t) + c_2 u_2(t)$, é a solução do problema de oscilação livre amortecida e já mostramos que tende a zero quando t tende a $+\infty$, por isso ela é a **termo transiente da solução**, enquanto a solução particular, $R \cos(\omega t - \delta)$, permanece e por isso é chamada **solução estacionária**.

$$u(t) = c_1 u_1(t) + c_2 u_2(t) + R \cos(\omega t - \delta) \approx R \cos(\omega t - \delta), \quad \text{para } t \text{ suficientemente grande.}$$

Vamos analisar como varia a amplitude da solução estacionária, R , com a frequência da força externa, ω .

$$R'(\omega) = -\frac{1}{2}F_0\Delta^{-3/2}\Delta'(\omega).$$

Como F_0 e Δ são maiores que zero, então $R'(\omega)$ e $\Delta'(\omega)$ têm sinais contrários.

$$\Delta'(\omega) = \left[-2m^2(\omega_0^2 - \omega^2) + \gamma^2\right] 2\omega.$$

Se $\gamma^2 - 2m^2\omega_0^2 \leq 0$ ou $\gamma \leq \sqrt{2}m\omega_0 = \sqrt{2km}$, verifique que a amplitude da solução estacionária é máxima para

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \frac{\gamma^2}{2m^2}}.$$

Se $\gamma > \sqrt{2}m\omega_0 = \sqrt{2km}$, verifique que a amplitude da solução estacionária é decrescente e portanto não tem máximo, para $\omega > 0$.

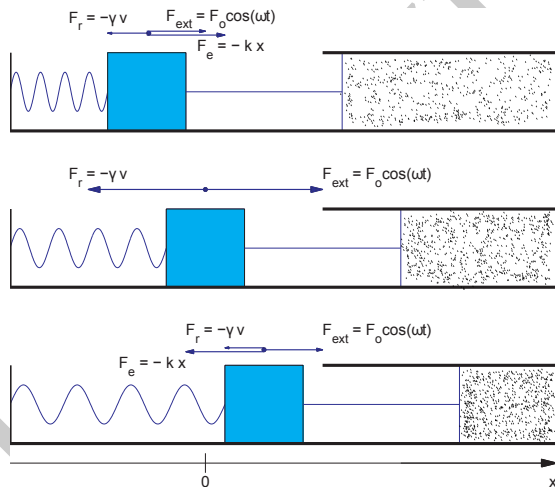


Figura 2.24. Sistema massa-mola forçado com amortecimento

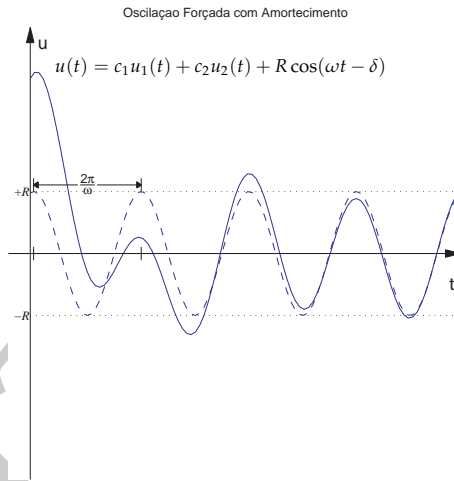


Figura 2.25. Solução do sistema massa-mola forçado com amortecimento

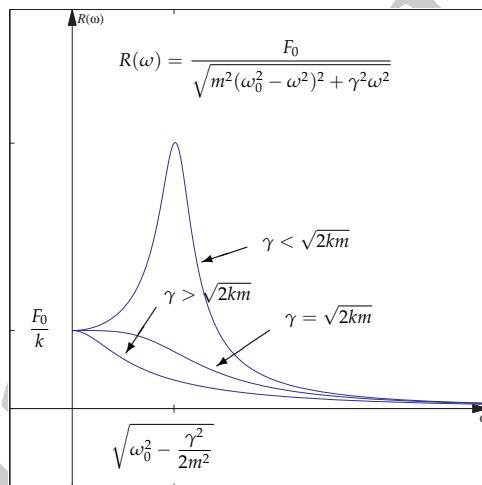


Figura 2.26. Amplitude da solução estacionária em função da frequência da força do sistema massa-mola forçado com amortecimento

2.5.3 Circuitos Elétricos

Considere um circuito elétrico formado por um capacitor, um resistor e um indutor ligados em série a um gerador como mostrado na [Figura 2.27](#).

A queda de potencial num resistor de resistência R é igual a RI , num capacitor de capacitância C é igual a $\frac{Q}{C}$ e em um indutor de indutância L é igual a $L\frac{dI}{dt}$. Pela segunda lei de Kirchhoff (lei das malhas) a soma das forças eletromotrizes (neste caso apenas $V(t)$) é igual a soma das quedas de potencial (neste caso RI na resistência, Q/C no capacitor e $L\frac{dI}{dt}$ no indutor), ou seja,

$$L\frac{dI}{dt} + RI + \frac{1}{C}Q = V(t). \quad (2.50)$$

Substituindo-se $I = \frac{dQ}{dt}$ obtemos uma equação diferencial de 2a. ordem para a carga elétrica no capacitor

$$L\frac{d^2Q}{dt^2} + R\frac{dQ}{dt} + \frac{1}{C}Q = V(t), \quad (2.51)$$

com condições iniciais $Q(0) = Q_0$ e $Q'(0) = I_0$. Uma equação diferencial de 2a. ordem para a corrente elétrica no circuito, $I(t)$, pode ser obtida derivando-se a equação (2.50), e substituindo-se $I = \frac{dQ}{dt}$:

$$L\frac{d^2I}{dt^2} + R\frac{dI}{dt} + \frac{1}{C}I = \frac{dV}{dt}(t),$$

com condições iniciais $I(0) = I_0$ e $I'(0) = \frac{V(0) - RI_0 - Q_0/C}{L}$. A última condição é obtida usando a equação (2.50).

Exemplo 2.19. Um circuito possui um capacitor de $0,5 \times 10^{-1}$ F, um resistor de 25Ω e um indutor de 5 H, em série. O capacitor se encontra descarregado. No instante $t = 0$ conecta-se esse circuito a uma bateria cuja tensão é de $10e^{-t/4}$ V, e o circuito é fechado.

Vamos determinar a carga no capacitor em qualquer instante $t > 0$. A equação diferencial para a carga no capacitor é

$$5Q'' + 25Q' + \frac{1}{0,5 \cdot 10^{-1}}Q = 10e^{-t/4}.$$

Dividindo-se por 5 obtemos a equação

$$Q'' + 5Q' + 4Q = 2e^{-t/4}.$$

A equação característica é

$$r^2 + 5r + 4 = 0,$$

cujas raízes são $r = -1, -4$.

Assim, a solução geral da equação homogênea é

$$Q(t) = c_1e^{-t} + c_2e^{-4t}.$$

Vamos procurar uma solução particular da equação não homogênea da forma

$$Q_p(t) = A_0e^{-t/4}.$$

$$Q'_p(t) = -\frac{1}{4}A_0e^{-t/4}, \quad Q''_p(t) = \frac{A_0}{16}e^{-t/4}.$$

Substituindo-se na equação $Q_p(t)$, $Q'_p(t)$ e $Q''_p(t)$ obtemos

$$\frac{A_0}{16}e^{-t/4} - \frac{5}{4}A_0e^{-t/4} + 4A_0e^{-t/4} = 2e^{-t/4}$$

De onde obtemos que

$$\frac{45}{16}A_0 = 2 \Rightarrow A_0 = \frac{32}{45}.$$

Portanto, a solução geral da equação diferencial é

$$Q(t) = c_1 e^{-t} + c_2 e^{-4t} + \frac{32}{45} e^{-t/4}$$

Derivada da solução geral:

$$Q'(t) = -c_1 e^{-t} - 4c_2 e^{-4t} - \frac{8}{45} e^{-t/4}.$$

Substituindo-se $t = 0$, $Q = 0$, $Q' = 0$ obtemos

$$\begin{cases} c_1 + c_2 + \frac{32}{45} = 0 \\ -c_1 - 4c_2 - \frac{8}{45} = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} c_1 = -8/9 \\ c_2 = 8/45 \end{cases}$$

Portanto, a solução do PVI formado pela equação diferencial e $Q(0) = 0$, $Q'(0) = 0$ é

$$Q(t) = -\frac{8}{9} e^{-t} + \frac{8}{45} e^{-4t} + \frac{32}{45} e^{-t/4}.$$

Observe que

$$\lim_{t \rightarrow \infty} Q(t) = 0.$$

Exercícios (respostas na página 450)

- 5.1. Uma mola, de um sistema massa-mola sem amortecimento, tem constante de elasticidade igual a 3 N/m. Pendura-se na mola um corpo de massa 2 kg e o sistema sofre a ação de uma força externa de $3 \cos(3t)$. Determine a função que descreve o movimento do sistema massa-mola em qualquer instante t , considerando a posição inicial igual a u_0 e a velocidade inicial u'_0 .
- 5.2. Um corpo de massa 100 gramas estica uma mola 10 centímetros. Suponha que não haja amortecimento e que a aceleração da gravidade seja de 10^3 centímetros por segundo ao quadrado. Se o sistema é colocado em movimento com uma força externa de $9600 \cos(6t)$ dinas, determine a posição do corpo como função do tempo e faça um esboço do seu gráfico.
- 5.3. Um corpo de massa 100 gramas estica uma mola 10 centímetros. Suponha que não haja amortecimento e que a aceleração da gravidade seja de 10^3 centímetros por segundo ao quadrado. Se o sistema é colocado em movimento na posição de equilíbrio com uma força externa de $1000 \cos(\omega t)$ dinas, para ω igual a frequência de ressonância, determine a posição do corpo como função do tempo e faça um esboço do seu gráfico.
- 5.4. Um corpo de massa 100 gramas estica uma mola 10 centímetros. O corpo está preso a um amortecedor viscoso. Suponha que a aceleração da gravidade seja de 10^3 centímetros por segundo ao quadrado. Suponha que o amortecedor exerce uma força de 4200 dinas quando a velocidade é de 1 centímetro por segundo. Se o corpo está sob a ação também de uma força externa de $26000 \cos(6t)$ dinas, determine a posição u em função do tempo t e faça um esboço do seu gráfico, considerando somente a solução estacionária.
- 5.5. Considere um sistema massa-mola descrito pelo problema de valor inicial

$$u'' + u' + 2u = \cos \omega t, \quad \omega > 0, \quad u(0) = 0, \quad u'(0) = 2.$$

- (a) Determine a solução geral da equação diferencial.
- (b) Determine a solução estacionária deste problema.
- (c) Encontre a amplitude da solução estacionária como função de ω .

(d) Determine a frequência para a qual a amplitude é máxima.

5.6. Considere a equação diferencial do sistema massa-mola forçado sem amortecimento

$$mu'' + ku = F_0 \cos(\omega t)$$

Mostre que a solução geral:

(a) Se $\omega \neq \omega_0$ é dada por

$$u(t) = c_1 \cos(\omega_0 t) + c_2 \sin(\omega_0 t) + \frac{F_0}{m(\omega_0^2 - \omega^2)} \cos(\omega t).$$

(b) Se $\omega = \omega_0$ é dada por

$$u(t) = c_1 \cos(\omega_0 t) + c_2 \sin(\omega_0 t) + \frac{F_0}{2m\omega_0} t \sin(\omega_0 t).$$

5.7. Mostre que a solução do PVI

$$\begin{cases} mu'' + ku = F_0 \cos(\omega t), \\ u(0) = 0, u'(0) = 0. \end{cases}$$

(a) Se $\omega \neq \omega_0$ é dada por

$$u(t) = \frac{F_0}{m(\omega_0^2 - \omega^2)} (\cos(\omega t) - \cos(\omega_0 t)).$$

(b) Se $\omega = \omega_0$ é dada por

$$u(t) = \frac{F_0}{2m\omega_0} t \sin(\omega_0 t).$$

5.8. Considere a equação diferencial

$$mu'' + \gamma u' + ku = F_0 \cos(\omega t), \quad \text{para } \omega > 0,$$

que corresponde ao sistema massa-mola forçado amortecido.

- (a) Encontre a solução estacionária da equação acima.
- (b) Mostre que a amplitude da solução estacionária é dada por

$$R = \frac{F_0}{\sqrt{\Delta}}.$$

- (c) Se $\gamma > \sqrt{2m\omega_0} = \sqrt{2km}$, verifique que a amplitude da solução estacionária é decrescente e portanto não tem máximo, para $\omega > 0$. Se $\gamma^2 - 2m^2\omega_0^2 \leq 0$ ou $\gamma \leq \sqrt{2m\omega_0} = \sqrt{2km}$, verifique que a amplitude da solução estacionária é máxima para

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \frac{\gamma^2}{2m^2}}.$$

- 5.9. Um circuito possui um capacitor de $0,125 \times 10^{-1}$ F, um resistor de 60Ω e um indutor de 10 H, em série. A carga inicial no capacitor é zero. No instante $t = 0$ conecta-se o circuito a uma bateria cuja tensão é de 12 V e o circuito é fechado.

- (a) Determine a carga no capacitor em qualquer instante $t > 0$.
- (b) Determine a carga no capacitor quando $t \rightarrow +\infty$.
- (c) Esboce o gráfico da solução obtida.

2.6 Soluções em Séries de Potências

Uma **série de potências** de x é uma expressão da forma

$$\sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \dots,$$

em que a_0, a_1, a_2, \dots são números denominados **coeficientes da série**. Podemos definir uma função $f(x)$ que associa a cada valor de x , para o qual existe o limite

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{n=0}^N a_n x^n = \lim_{N \rightarrow \infty} (a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \dots + a_N x^N),$$

o valor deste limite e escrevemos

$$f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \dots$$

O maior valor de r para o qual o limite acima existe para $|x| < r$, ou seja, a **série converge**, é chamado **raio de convergência** da série.

Exemplo 2.20. A série geométrica

$$f(x) = 1 + x + x^2 + \dots = \sum_{n=0}^{\infty} x^n = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1 - x^{N+1}}{1 - x} = \frac{1}{1 - x}, \quad \text{para } |x| < 1$$

tem raio de convergência $r = 1$.

A seguir apresentamos as propriedades das séries de potências que são usadas no estudo das soluções de equações diferenciais em série de potências. A demonstração é apresentada na página [394](#).

Proposição 2.8. *São válidas as seguintes propriedades para as séries de potências:*

(a) Se $f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n$ tem raio de convergência $r_1 > 0$ e $g(x) = \sum_{n=0}^{\infty} b_n x^n$ tem raio de convergência $r_2 > 0$, então para todos os números α e β ,

$$\alpha f(x) + \beta g(x) = \alpha \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n + \beta \sum_{n=0}^{\infty} b_n x^n = \sum_{n=0}^{\infty} (\alpha a_n + \beta b_n) x^n,$$

tem raio de convergência que é pelo menos $r = \min\{r_1, r_2\}$.

(b) Se $f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + \cdots$ tem raio de convergência $r > 0$, então para $k, l = 0, 1, 2, \dots$

$$\begin{aligned} (\alpha x^k + \beta x^l) f(x) &= \alpha x^k \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n + \beta x^l \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n = \alpha \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^{n+k} + \beta \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^{n+l} \\ &= \alpha \sum_{n'=k}^{\infty} a_{n'-k} x^{n'} + \beta \sum_{n'=l}^{\infty} a_{n'-l} x^{n'} = \alpha \sum_{n=k}^{\infty} a_{n-k} x^n + \beta \sum_{n=l}^{\infty} a_{n-l} x^n. \end{aligned}$$

(c) Se $f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + \cdots$ tem raio de convergência $r > 0$, então $f(x)$ tem derivadas

de todas as ordens, para $|x| < r$ e

$$f'(x) = a_1 + 2a_2x + 3a_3x^2 + \cdots = \sum_{n=1}^{\infty} na_nx^{n-1} = \sum_{n=0}^{\infty} (n+1)a_{n+1}x^n$$

$$f''(x) = 2a_2 + 2 \cdot 3a_3x + 3 \cdot 4a_4x^2 + \cdots = \sum_{n=2}^{\infty} (n-1)na_nx^{n-2} = \sum_{n=0}^{\infty} (n+1)(n+2)a_{n+2}x^n$$

$$f^{(k)}(x) = \sum_{n=k}^{\infty} (n-k+1) \cdots (n-1)na_nx^{n-k} = \sum_{n=0}^{\infty} (n+1)(n+2) \cdots (n+k-1)a_{n+k}x^n$$

(d) Se $\sum_{n=0}^{\infty} a_nx^n = 0$, para todo x , com $|x| < r$ e $r > 0$, então $a_n = 0$, para $n = 0, 1, 2, \dots$

Para uma equação diferencial da forma

$$P(x) \frac{d^2y}{dx^2} + Q(x) \frac{dy}{dx} + R(x)y = 0,$$

em que $P(x)$, $Q(x)$ e $R(x)$ são polinômios tais que $P(0) \neq 0$, a solução geral pode ser escrita como uma série de potências de x como estabelecemos no próximo resultado que será demonstrado apenas na página 389.

Teorema 2.9. Considere a equação

$$P(x) \frac{d^2 y}{dx^2} + Q(x) \frac{dy}{dx} + R(x)y = 0, \quad (2.52)$$

em que $P(x)$, $Q(x)$ e $R(x)$ são polinômios sem fatores comuns. Se $P(0) \neq 0$, então a equação tem solução geral em série de potências

$$y(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n = a_0 \left(1 + \sum_{n=2}^{\infty} b_n x^n \right) + a_1 \left(x + \sum_{n=2}^{\infty} c_n x^n \right),$$

em que $y_1(x) = 1 + \sum_{n=2}^{\infty} b_n x^n$ e $y_2(x) = x + \sum_{n=2}^{\infty} c_n x^n$ são soluções fundamentais da equação que convergem (pelo menos) para $|x| < r$, sendo r o raio do maior círculo no plano complexo com centro na origem tal que $P(z) \neq 0$, para todo $z \in \mathbb{C}$ com $|z| < r$. Ou seja, $r = \min\{|z_1|, \dots, |z_k|\}$, em que z_i são as raízes de $P(x)$ reais ou complexas.

Exemplo 2.21. Considere a equação

$$(1 + x^2)y'' - 2xy' + 3y = 0.$$

Pelo Teorema 2.9 a solução geral desta equação pode ser escrita como

$$y(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n = a_0 y_1(x) + a_1 y_2(x),$$

em que $y_1(x)$ e $y_2(x)$ são soluções fundamentais em série de potências de x que convergem pelo menos para $|x| < 1$. Pois como $P(z) = 1 + z^2 = 0$ se, e somente se, $z = \pm i$, então $r = \min\{|-i|, |i|\} = 1$ é o raio do maior círculo no plano complexo com centro na origem tal que $P(z) \neq 0$, para $|z| < r$, $z \in \mathbb{C}$.

Exemplo 2.22. Considere a equação

$$(x+2)(x^2-2x+2)y''-4xy'+6y=0.$$

Pelo Teorema 2.9 a solução geral desta equação pode ser escrita como

$$y(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n = a_0 y_1(x) + a_1 y_2(x),$$

em que $y_1(x)$ e $y_2(x)$ são soluções fundamentais em série de potências de x que convergem pelo menos para $|x| < r = \sqrt{2}$. Pois, como

$$P(z) = (z+2)(z^2-2z+2) = 0$$

se, e somente se, $z = 1 \pm i$ ou $z = -2$, então $r = \min\{|1-i|, |1+i|, |-2|\} = \min\{\sqrt{2}, \sqrt{2}, 2\} = \sqrt{2}$ é o raio do maior círculo no plano complexo com centro na origem tal que $P(z) \neq 0$, para $|z| < r, z \in \mathbb{C}$.

Para encontrar a solução geral em série de potências de x , escrevemos a solução $y(x)$ como uma série de potências de x , com os coeficientes a determinar,

$$y(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + \cdots,$$

e substituímos na equação (2.52) esta série, a série da primeira derivada

$$y'(x) = a_1 + 2a_2 x + 3a_3 x^2 + \cdots = \sum_{n=0}^{\infty} (n+1)a_{n+1} x^n$$

e a série da segunda derivada

$$y''(x) = 2a_2 + 2 \cdot 3a_3 x + 3 \cdot 4a_4 x^2 + \cdots = \sum_{n=0}^{\infty} (n+1)(n+2)a_{n+2} x^n.$$

Usamos as propriedades que apresentamos anteriormente de forma a escrever o lado esquerdo da equação (2.52) como uma série de potências de x cujos coeficientes são expressões dos coeficientes a ser determinados a_0, a_1, \dots . Usando estas expressões obtemos fórmulas que dão os coeficientes a_{n+k} em termos dos coeficientes anteriores $a_{n+k-1}, a_{n+k-2}, \dots$. Desta forma, obtemos qualquer coeficiente em termos dos dois primeiros coeficientes não nulos que serão as constantes arbitrárias da solução geral.

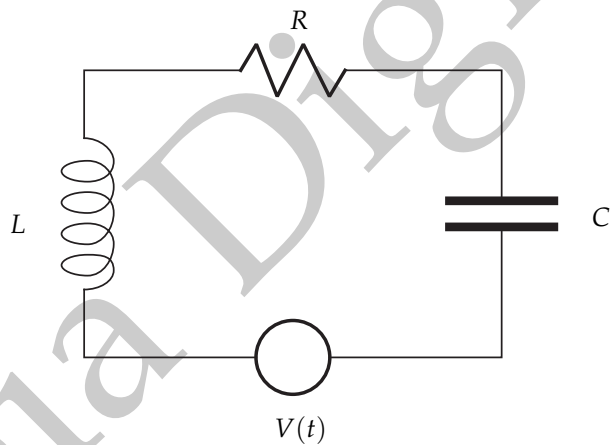


Figura 2.27. Circuito LRC

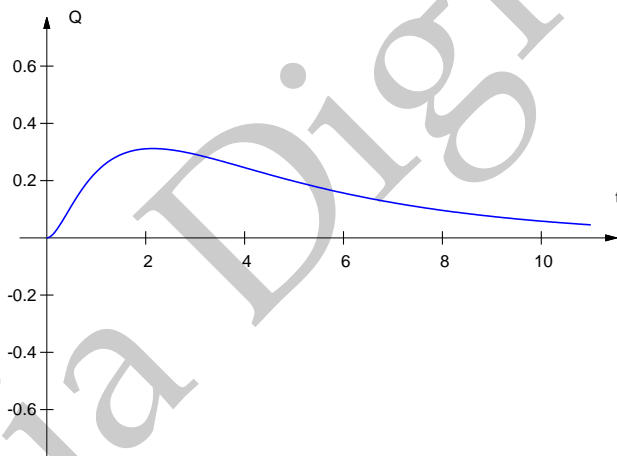


Figura 2.28. Carga no capacitor do circuito LRC do Exemplo 2.19

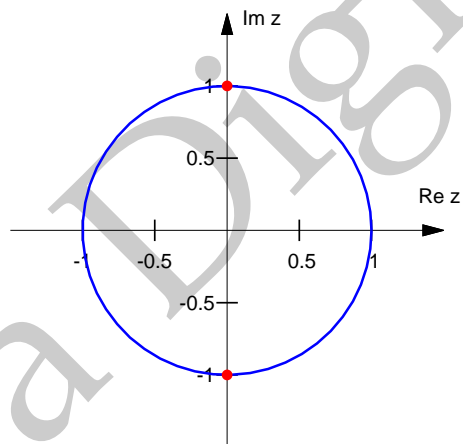


Figura 2.29. Maior círculo no plano complexo com centro na origem onde $P(z) \neq 0$, para o Exemplo 2.21

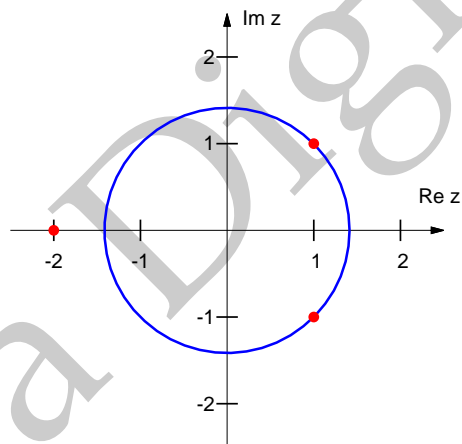


Figura 2.30. Maior círculo no plano complexo com centro na origem onde $P(z) \neq 0$, para o Exemplo 2.22

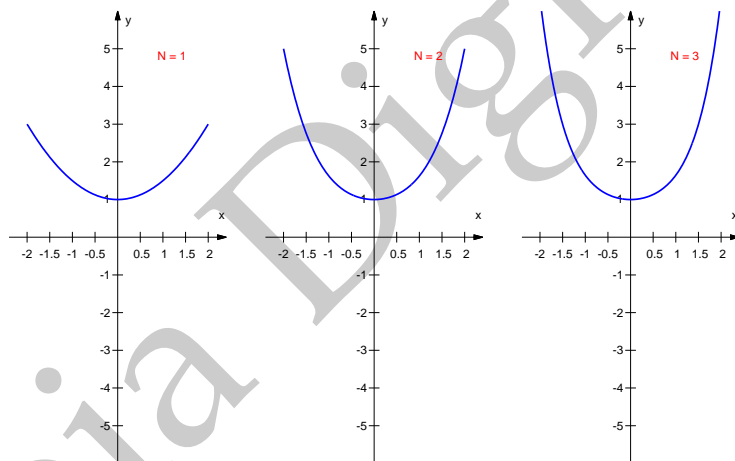


Figura 2.31. Somas parciais da solução $y_1(x)$ da equação do Exemplo 2.23

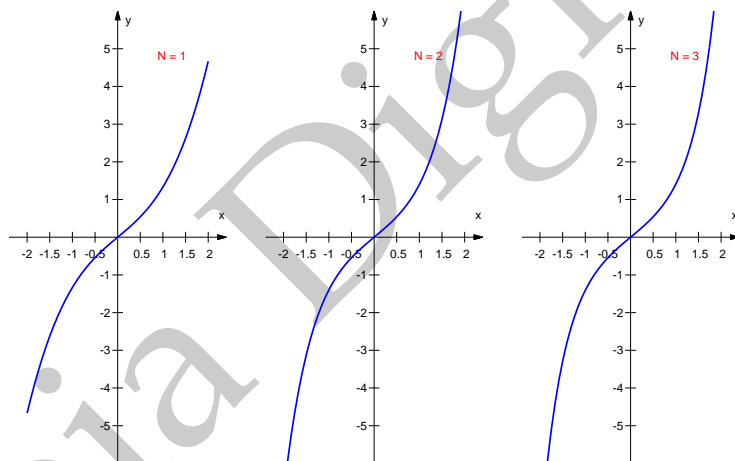


Figura 2.32. Somas parciais da solução $y_2(x)$ da equação do Exemplo 2.23

Exemplo 2.23. Considere a equação

$$y'' - xy' - y = 0.$$

Pelo [Teorema 2.9 na página 374](#) esta equação diferencial tem uma solução em série de potências válida para todo $x \in \mathbb{R}$, pois $P(z) = 1 \neq 0$, para todo $z \in \mathbb{C}$.

Substituindo-se

$$y(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n, \quad y'(x) = \sum_{n=0}^{\infty} (n+1)a_{n+1}x^n \quad \text{e} \quad y''(x) = \sum_{n=0}^{\infty} (n+2)(n+1)a_{n+2}x^n$$

na equação, obtemos

$$\sum_{n=0}^{\infty} (n+2)(n+1)a_{n+2}x^n - x \sum_{n=0}^{\infty} (n+1)a_{n+1}x^n - \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n = 0$$

Usando a propriedade [\(b\) da Proposição 2.8](#)

$$\sum_{n=0}^{\infty} (n+2)(n+1)a_{n+2}x^n - \sum_{n=0}^{\infty} (n+1)a_{n+1}x^{n+1} - \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n = 0$$

Como $\sum_{n=0}^{\infty} (n+1)a_{n+1}x^{n+1} = \sum_{n=1}^{\infty} na_n x^n$, então da equação acima obtemos

$$\sum_{n=0}^{\infty} (n+2)(n+1)a_{n+2}x^n - \sum_{n=1}^{\infty} na_n x^n - \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n = 0$$

Usando a propriedade [\(a\) Proposição 2.8](#)

$$2a_2 - a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [(n+2)(n+1)a_{n+2} - na_n - a_n]x^n = 0, \quad \forall x \in \mathbb{R}$$

Como esta é a série nula, então pela propriedade (d) **Proposição 2.8** os seus coeficientes têm que ser iguais a zero, ou seja,

$$\begin{cases} 2a_2 - a_0 = 0 \\ (n+2)(n+1)a_{n+2} - na_n - a_n = 0, \quad n = 1, 2, 3, \dots \end{cases}$$

De onde obtemos a **fórmula de recorrência**

$$\begin{cases} a_2 = \frac{1}{2}a_0 \\ a_{n+2} = \frac{n+1}{(n+2)(n+1)}a_n = \frac{1}{n+2}a_n, \quad n = 1, 2, 3, \dots \end{cases}$$

Usando a fórmula de recorrência $a_{n+2} = \frac{1}{n+2}a_n$, a partir do a_0 podemos obter o a_2 , a partir do a_2 podemos obter o a_4 e assim por diante, ou seja,

$$a_4 = \frac{1}{4}a_2 = \frac{1}{4 \cdot 2}a_0, \quad a_6 = \frac{1}{6}a_4 = \frac{1}{6 \cdot 4 \cdot 2}a_0, \quad \dots$$

Assim, os coeficientes de índice par (múltiplos de 2) são dados por

$$a_{2k} = \frac{1}{2k}a_{2k-2} = \frac{1}{2k(2k-2)}a_{2k-4} = \frac{1}{2k(2k-2) \dots 2}a_0, \quad k = 1, 2, \dots$$

Usando a fórmula de recorrência $a_{n+2} = \frac{1}{n+2}a_n$, a partir do a_1 podemos obter o a_3 , a partir do a_3 podemos obter o a_5 e assim por diante, ou seja,

$$a_3 = \frac{1}{3}a_1, \quad a_5 = \frac{1}{5}a_3 = \frac{1}{5 \cdot 3}a_1, \quad \dots$$

Assim, os coeficientes de índice ímpar (múltiplos de 2 mais 1) são dados por

$$a_{2k+1} = \frac{1}{2k+1}a_{2k-1} = \frac{1}{(2k+1)(2k-1)}a_{2k-3} = \frac{1}{(2k+1)(2k-1) \dots 3}a_1, \quad k = 1, 2, \dots$$

Separando-se a série de $y(x)$ em duas séries, uma que só contém termos de potência par e outra que só contém termos de potência ímpar e substituindo-se os valores dos coeficientes a_{2k} e a_{2k+1} encontrados acima obtemos

$$\begin{aligned} y(x) &= \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n = \sum_{k=0}^{\infty} a_{2k} x^{2k} + \sum_{k=0}^{\infty} a_{2k+1} x^{2k+1} = \\ &= a_0 \left(1 + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{(2k)(2k-2) \cdots 2} x^{2k} \right) + \\ &\quad + a_1 \left(x + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{(2k+1)(2k-1) \cdots 3} x^{2k+1} \right) \end{aligned}$$

Portanto, a solução geral é

$$y(x) = a_0 y_1(x) + a_1 y_2(x),$$

em que

$$\begin{aligned} y_1(x) &= 1 + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{(2k)(2k-2) \cdots 2} x^{2k}, \\ y_2(x) &= x + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{(2k+1)(2k-1) \cdots 3} x^{2k+1} \end{aligned}$$

convergem para todo $x \in \mathbb{R}$.

Exemplo 2.24. Considere a equação

$$(x+1)y'' + y = 0.$$

Pelo Teorema 2.9 na página 374 esta equação diferencial tem uma solução em série de potências que converge pelo menos para $|x| < 1$.

Substituindo-se

$$y(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n, \quad y'(x) = \sum_{n=0}^{\infty} (n+1)a_{n+1}x^n \quad \text{e} \quad y''(x) = \sum_{n=0}^{\infty} (n+2)(n+1)a_{n+2}x^n$$

na equação $(x+1)y'' + y = 0$, obtemos

$$(x+1) \sum_{n=0}^{\infty} (n+2)(n+1)a_{n+2}x^n + \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n = 0$$

Usando a propriedade (b) da Proposição 2.8

$$x \sum_{n=0}^{\infty} (n+2)(n+1)a_{n+2}x^n + \sum_{n=0}^{\infty} (n+2)(n+1)a_{n+2}x^n + \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n = 0$$

$$\sum_{n=0}^{\infty} (n+2)(n+1)a_{n+2}x^{n+1} + \sum_{n=0}^{\infty} (n+2)(n+1)a_{n+2}x^n + \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n = 0$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} (n+1)na_{n+1}x^n + \sum_{n=0}^{\infty} (n+2)(n+1)a_{n+2}x^n + \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n = 0$$

Usando a propriedade (a) da Proposição 2.8

$$2a_2 + a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [(n+1)na_{n+1} + (n+2)(n+1)a_{n+2} + a_n]x^n = 0, \quad \forall x \text{ tal que } |x| < 1.$$

O que implica pela propriedade (d) da Proposição 2.8 que

$$\begin{cases} 2a_2 + a_0 = 0 \\ (n+1)na_{n+1} + (n+2)(n+1)a_{n+2} + a_n = 0, \quad n = 1, 2, 3, \dots \end{cases}$$

De onde obtemos a fórmula de recorrência

$$\begin{cases} a_2 = -\frac{1}{2}a_0 \\ a_{n+2} = -\frac{n}{n+2}a_{n+1} - \frac{1}{(n+2)(n+1)}a_n, \quad n = 1, 2, 3, \dots \end{cases}$$

$$a_3 = -\frac{1}{3}a_2 - \frac{1}{3 \cdot 2}a_1 = \frac{1}{3 \cdot 2}a_0 - \frac{1}{3 \cdot 2}a_1$$

$$a_4 = -\frac{1}{2}a_3 - \frac{1}{4 \cdot 3}a_2 = -\frac{1}{3 \cdot 2^2}a_0 + \frac{1}{3 \cdot 2^2}a_1 + \frac{1}{4 \cdot 3 \cdot 2}a_0 = -\frac{1}{4 \cdot 3 \cdot 2}a_0 + \frac{1}{3 \cdot 2^2}a_1$$

Substituindo-se os valores a_n encontrados acima, na série de $y(x)$ obtemos

$$\begin{aligned} y(x) &= \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n \\ &= a_0 \left(1 - \frac{1}{2}x^2 + \frac{1}{3 \cdot 2}x^3 - \frac{1}{4 \cdot 3 \cdot 2}x^4 + \dots \right) + a_1 \left(x - \frac{1}{3 \cdot 2}x^3 + \frac{1}{3 \cdot 4}x^4 + \dots \right) \end{aligned}$$

Portanto, a equação tem solução geral

$$y(x) = a_0 y_1(x) + a_1 y_2(x),$$

em que

$$y_1(x) = 1 - \frac{1}{2}x^2 + \frac{1}{3 \cdot 2}x^3 - \frac{1}{4 \cdot 3 \cdot 2}x^4 + \dots$$

$$y_2(x) = x - \frac{1}{3 \cdot 2}x^3 + \frac{1}{3 \cdot 4}x^4 + \dots$$

são séries que convergem pelo menos para $|x| < 1$.

Exemplo 2.25. Considere a equação

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

Não podemos aplicar o [Teorema 2.9](#) diretamente pois $P(x) = x$ é tal que $P(0) = 0$. Mas podemos fazer uma translação definindo, por exemplo, $t = x - 1$. Obtemos que

$$\frac{dy}{dx} = \frac{dy}{dt} \frac{dt}{dx} = \frac{dy}{dt},$$

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{d}{dx} \left(\frac{dy}{dt} \right) = \frac{d}{dt} \left(\frac{dy}{dt} \right) \frac{dt}{dx} = \frac{d^2y}{dt^2},$$

Assim, a equação se transforma em

$$(t + 1) \frac{d^2y}{dt^2} + y = 0$$

Esta equação tem uma solução em série de potências de t obtida no Exemplo 2.24. Substituindo-se $t = x - 1$ na solução do exemplo anterior obtemos que a solução geral da equação é

$$y(x) = a_0 y_1(x) + a_1 y_2(x),$$

em que

$$y_1(x) = 1 - \frac{1}{2}(x-1)^2 + \frac{1}{3 \cdot 2}(x-1)^3 - \frac{1}{4 \cdot 3 \cdot 2}(x-1)^4 + \dots$$

$$y_2(x) = (x-1) - \frac{1}{3 \cdot 2}(x-1)^3 + \frac{1}{3 \cdot 4}(x-1)^4 + \dots$$

Pelo [Teorema 2.9 na página 374](#) as séries acima convergem pelo menos para $|x - 1| < 1$ ou $0 < x < 2$.

2.6.1 Demonstração do Teorema de Existência de Soluções em Séries

Antes de demonstrar o teorema precisamos mostrar o resultado a seguir sobre variáveis complexas.

Lema 2.10. *Sejam $f(x)$ e $g(x)$ polinômios tais que $g(0) \neq 0$. Então, $f(x)/g(x)$ tem uma representação em série de potências de x ,*

$$\frac{f(x)}{g(x)} = \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n,$$

que converge para $|x| < r$, sendo r o raio do maior círculo no plano complexo com centro na origem tal que $g(z) \neq 0$, para todo $z \in \mathbb{C}$ com $|z| < r$.

Demonstração. Sejam $a_1, \dots, a_k \in \mathbb{C}$ as raízes de $g(x)$. Então, $g(x)$ se fatora como

$$g(x) = a_0(x - a_1)^{n_1} \cdots (x - a_k)^{n_k}.$$

Podemos supor que o grau de $f(x)$ é menor do que o grau de $g(x)$ (por que?). Então, decompondo $f(x)/g(x)$ em frações parciais obtemos

$$\frac{f(x)}{g(x)} = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} \frac{\alpha_{ij}}{(x - a_i)^j}$$

Para $a \in \mathbb{C}$, usando a série geométrica, temos que

$$\frac{1}{z-a} = -\frac{1}{a-z} = -\frac{1}{a} \frac{1}{1-\frac{z}{a}} = -\frac{1}{a} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{z}{a}\right)^n = \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{-1}{a^{n+1}}\right) z^n$$

que converge para $|\frac{z}{a}| < 1$, ou seja, para $|z| < |a|$. Além disso, usando a derivada da série anterior obtemos que

$$\frac{1}{(z-a)^2} = -\frac{d}{dz} \left(\frac{1}{z-a} \right) = -\sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{n}{a^{n+1}} \right) z^{n-1} = \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{-n-1}{a^{n+2}} \right) z^n$$

que também converge para $|z| < |a|$. Como

$$\frac{1}{(z-a)^j} = (-1)^{j-1} (j-1)! \frac{d^{j-1}}{dz^{j-1}} \left(\frac{1}{z-a} \right)$$

então $\frac{1}{(z-a)^j}$ tem uma representação em série de potências de z para $j = 1, 2, \dots$ que converge para $|z| < |a|$.

Logo, $f(z)/g(z)$ tem uma representação em série de potências de z que converge para todo $z \in \mathbb{C}$ com $|z| < r$, em que $r = \min\{|a_1|, \dots, |a_k|\}$. Donde segue-se o resultado. ■

Demonstração do Teorema 2.9 na página 374. Dividindo-se a equação por $P(x)$ obtemos uma equação da forma

$$y'' + p(x)y' + q(x)y = 0.$$

Pelo Lema 2.10 os coeficientes podem ser escritos em série de potências de x

$$p(x) = \frac{Q(x)}{P(x)} = \sum_{n=0}^{\infty} p_n x^n, \quad q(x) = \frac{R(x)}{P(x)} = \sum_{n=0}^{\infty} q_n x^n,$$

que convergem para $|x| < r$, sendo r o raio do maior círculo no plano complexo com centro na origem tal que $P(z) \neq 0$, para todo $z \in \mathbb{C}$ com $|z| < r$. Suponhamos que a solução da equação possa ser escrita em série de potências de x como

$$y(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n.$$

Vamos mostrar que os coeficientes satisfazem uma relação de recorrência de tal forma que a série converge para $|x| < r$. As derivadas, $y'(x)$ e $y''(x)$, são representadas em série de potências como

$$y'(x) = \sum_{n=0}^{\infty} (n+1)a_{n+1}x^n, \quad y''(x) = \sum_{n=0}^{\infty} (n+1)(n+2)a_{n+2}x^n.$$

Substituindo-se na equação obtemos

$$\sum_{n=0}^{\infty} \left[(n+1)(n+2)a_{n+2} + \sum_{k=0}^n [p_{n-k}(k+1)a_{k+1} + q_{n-k}a_k] \right] x^n = 0.$$

Esta é a série nula, o que implica que todos os coeficientes são iguais a zero. Assim,

$$(n+1)(n+2)a_{n+2} = - \sum_{k=0}^n [p_{n-k}(k+1)a_{k+1} + q_{n-k}a_k]. \quad (2.53)$$

Por outro lado, da convergência das séries de $p(x)$ e $q(x)$ segue-se que existe $M > 0$ tal que $|p_n|t^n < M$ e $|q_n|t^n < M$, para $0 < t < r$ e $n = 0, 1, 2, \dots$. Usando isso

$$\begin{aligned} (n+1)(n+2)|a_{n+2}| &\leq \frac{M}{t^n} \sum_{k=0}^n [(k+1)|a_{k+1}| + |a_k|] t^k \\ &\leq \frac{M}{t^n} \sum_{k=0}^n [(k+1)|a_{k+1}| + |a_k|] t^k + M|a_{n+1}|t. \end{aligned} \quad (2.54)$$

Vamos considerar a série $\sum_{n=0}^{\infty} A_n x^n$, com os coeficientes definidos por

$$A_0 = |a_0|, \quad A_1 = |a_1|$$

$$(n+2)(n+1)A_{n+2} = \frac{M}{t^n} \sum_{k=0}^n [(k+1)A_{k+1} + A_k] t^k + MA_{n+1}t. \quad (2.55)$$

Usando (2.54) e (2.55), por indução, temos que $|a_n| \leq A_n$, para $n = 0, 1, 2, \dots$. Vamos mostrar que a série $\sum_{n=0}^{\infty} A_n x^n$ é convergente para $|x| < r$, o que implica que a série de $y(x)$ também é convergente. Usando (2.55) temos que

$$(n+1)nA_{n+1} = \frac{M}{t^{n-1}} \sum_{k=0}^{n-1} [(k+1)A_{k+1} + A_k] t^k + MA_n t$$

$$n(n-1)A_n = \frac{M}{t^{n-2}} \sum_{k=0}^{n-2} [(k+1)A_{k+1} + A_k] t^k + MA_{n-1}t.$$

Assim,

$$\begin{aligned} (n+1)nA_{n+1} &= \frac{1}{t} \left\{ \frac{M}{t^{n-2}} \sum_{k=0}^{n-2} [(k+1)A_{k+1} + A_k] t^k + M[nA_n + A_{n-1}]t \right\} + MA_n t \\ &= \frac{1}{t} \{ n(n-1)A_n - MA_{n-1}t + M[nA_n + A_{n-1}]t \} + MA_n t \\ &= \frac{A_n}{t} \{ n(n-1) + Mnt + Mt^2 \} \end{aligned}$$

Então,

$$\left| \frac{A_{n+1}x^{n+1}}{A_n x^n} \right| = \frac{n(n-1) + Mnt + Mt^2}{t(n+1)n} |x| \rightarrow \frac{|x|}{t}, \text{ quando } n \rightarrow \infty.$$

Assim, a série $\sum_{n=0}^{\infty} A_n x^n$ converge $|x| < t$, para todo $t < r$. Logo, a série $\sum_{n=0}^{\infty} A_n x^n$ converge para $|x| < r$. Como $|a_n| \leq A_n$, para $n = 0, 1, 2, \dots$, então também converge para $|x| < r$ a série

$$y(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n.$$

Agora, fazendo $n = 0$ em (2.53), obtemos a_2 como combinação linear de a_0 e a_1 . Substituindo-se este resultado em (2.53) para $n = 1$ obtemos também a_3 como combinação linear de a_0 e a_1 . Continuando desta forma obtemos

$$a_n = b_n a_0 + c_n a_1, \quad \text{para } n = 2, 3, \dots$$

Assim,

$$y(x) = a_0 \left(1 + \sum_{n=2}^{\infty} b_n x^n \right) + a_1 \left(x + \sum_{n=2}^{\infty} c_n x^n \right).$$

Deixamos como exercício para o leitor a verificação de que $y_1(x) = 1 + \sum_{n=2}^{\infty} b_n x^n$ e

$y_2(x) = x + \sum_{n=2}^{\infty} c_n x^n$ são soluções fundamentais da equação. ■

2.6.2 Demonstração das Propriedades de Séries de Potências

Demonstração da Proposição 2.8 na página 372.

(a) Para x tal que $|x| < \min\{r_1, r_2\}$ temos

$$\alpha f(x) + \beta g(x) = \alpha \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{n=0}^N a_n x^n + \beta \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{n=0}^N b_n x^n = \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{n=0}^N (\alpha a_n + \beta b_n) x^n.$$

(b) Para x tal que $|x| < r$ temos

$$\begin{aligned} (\alpha x^k + \beta x^l) f(x) &= (\alpha x^k + \beta x^l) \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{n=0}^N a_n x^n = \lim_{N \rightarrow \infty} (\alpha x^k + \beta x^l) \sum_{n=0}^N a_n x^n \\ &= \lim_{N \rightarrow \infty} \left(\alpha \sum_{n=0}^N a_n x^{n+k} + \beta \sum_{n=0}^N a_n x^{n+l} \right) \\ &= \alpha \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{n=0}^N a_n x^{n+k} + \beta \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{n=0}^N a_n x^{n+l}. \end{aligned}$$

(c) Basta provarmos para a primeira derivada. Como

$$\sqrt[n]{|na_n x^n|} = \sqrt[n]{n} \sqrt[n]{|a_n|} |x|$$

e $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{n} = 1$, então $\sum_{n=1}^{\infty} na_n x^{n-1} = x \sum_{n=1}^{\infty} na_n x^{n-1}$ e $\sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n$ possuem o mesmo raio de convergência. Assim, a série $\sum_{n=1}^{\infty} na_n x^{n-1}$ converge para $|x| < r$.

Sejam s, t tais que $0 < |x| \leq s < t < r$. Então, existe $K > 0$ tal que $n|a_n|t^{n-1} \leq K$ e assim

$$|na_n x^{n-1}| \leq n|a_n|t^{n-1} \frac{s^{n-1}}{t^{n-1}} \leq K \left(\frac{s}{t}\right)^{n-1}.$$

Seja $\epsilon > 0$. Sejam

$$g(x) = \sum_{n=1}^{\infty} na_n x^{n-1},$$

$$S_N(x) = \sum_{n=1}^N a_n x^n,$$

$$q_N(x, h) = \frac{S_N(x+h) - S_N(x)}{h},$$

$$q(x, h) = \frac{f(x+h) - f(x)}{h}.$$

Existe $N_0 \in \mathbb{N}$ tal que $M, N > N_0$ implica $\sum_{n=N}^M K \left(\frac{s}{t} \right)^{n-1} < \frac{\epsilon}{3}$. Então,

$$|S'_N(x) - S'_M(x)| = \left| \sum_{n=N}^M na_n x^{n-1} \right| \leq \sum_{n=N}^M |na_n x^{n-1}| \leq \sum_{n=N}^M K \left(\frac{s}{t} \right)^{n-1} < \frac{\epsilon}{3}, \quad (2.56)$$

para todo $x \in [-s, s]$. Deixando N fixo e passando ao limite quando M tende a infinito obtemos

$$|S'_N(x) - g(x)| \leq \frac{\epsilon}{3}. \quad (2.57)$$

Sejam $M, N > N_0$. Pelo Teorema do Valor Médio aplicado a $S_N(x) - S_M(x)$ e por (2.56) obtemos que existe ξ entre x e $x+h$ tal que

$$|q_N(x, h) - q_M(x, h)| = |S'_N(\xi) - S'_M(\xi)| < \frac{\epsilon}{3}.$$

Deixando N fixo e passando ao limite quando M tende a infinito obtemos

$$|q_N(x, h) - q(x, h)| \leq \frac{\epsilon}{3}, \quad \text{para todo } h \text{ tal que } x+h \in [-s, s]. \quad (2.58)$$

Como $\lim_{h \rightarrow 0} q_N(x, h) = S'_N(x)$, existe $\delta > 0$ tal que $0 < h < \delta$ implica que

$$|q_N(x, h) - S'_N(x)| < \frac{\epsilon}{3} \quad (2.59)$$

De (2.58), (2.59) e (2.57) segue-se que

$$\begin{aligned} |q(x, h) - g(x)| &\leq |q(x, h) - q_N(x, h)| + |q_N(x, h) - S'_N(x)| + |S'_N(x) - g(x)| \\ &< \frac{\epsilon}{3} + \frac{\epsilon}{3} + \frac{\epsilon}{3}. \end{aligned}$$

(d) Usando o item anterior temos que

$$f(0) = a_0 = 0, \quad f'(0) = a_1 = 0, \quad f''(0) = 2a_2 = 0, \quad \dots \quad f^{(k)}(0) = (k-1)! a_k = 0.$$

Logo, todos os coeficientes da série são iguais a zero.



Exercícios (respostas na página 462)

6.1. Resolva a equação diferencial dada em série de potências de x (em torno de $x_0 = 0$). Escreva uma fórmula fechada para o termo geral de cada série que compõe a solução. Dê um intervalo onde a solução é válida.

(a) $y'' + xy' + 2y = 0, y(0) = 4, y'(0) = -1.$

(b) $(1 + x^2)y'' - 4xy' + 6y = 0.$

(c) $(4 - x^2)y'' + 2y = 0.$

(d) $(3 - x^2)y'' - 3xy' - y = 0.$

(e) $(1 - x)y'' + xy' - y = 0, y(0) = -3, y'(0) = 2.$

(f) $2y'' + xy' + 3y = 0.$

(g) $y'' - xy = 0$, **Equação de Airy.**

6.2. Resolva a equação diferencial dada em série de potências de x (em torno de $x_0 = 0$). Escreva os três primeiros termos não nulos (se existirem) de cada série que compõe a solução. Dê um intervalo onde a solução é válida.

(a) $y'' + k^2x^2y = 0$, em que $k \in \mathbb{R}.$

(b) $(1 - x)y'' + y = 0.$

(c) $(2 + x^2)y'' - xy' + 4y = 0, y(0) = -3, y'(0) = 2.$

6.3. Mostre que se

$$y(x) = a_0 \left(1 + \sum_{n=2}^{\infty} b_n x^n \right) + a_1 \left(x + \sum_{n=2}^{\infty} c_n x^n \right).$$

é solução em série de potências da equação

$$P(x) \frac{d^2 y}{dx^2} + Q(x) \frac{dy}{dx} + R(x)y = 0$$

então

$$y_1(x) = 1 + \sum_{n=2}^{\infty} b_n x^n \quad \text{e} \quad y_2(x) = x + \sum_{n=2}^{\infty} c_n x^n$$

são soluções fundamentais da equação.

6.4. Considere a equação de Legendre

$$(1 - x^2)y'' - 2xy' + \alpha(\alpha + 1)y = 0.$$

(a) Mostre que a solução geral da equação de Legendre é

$$y(x) = a_0 y_1(x) + a_1 y_2(x),$$

em que

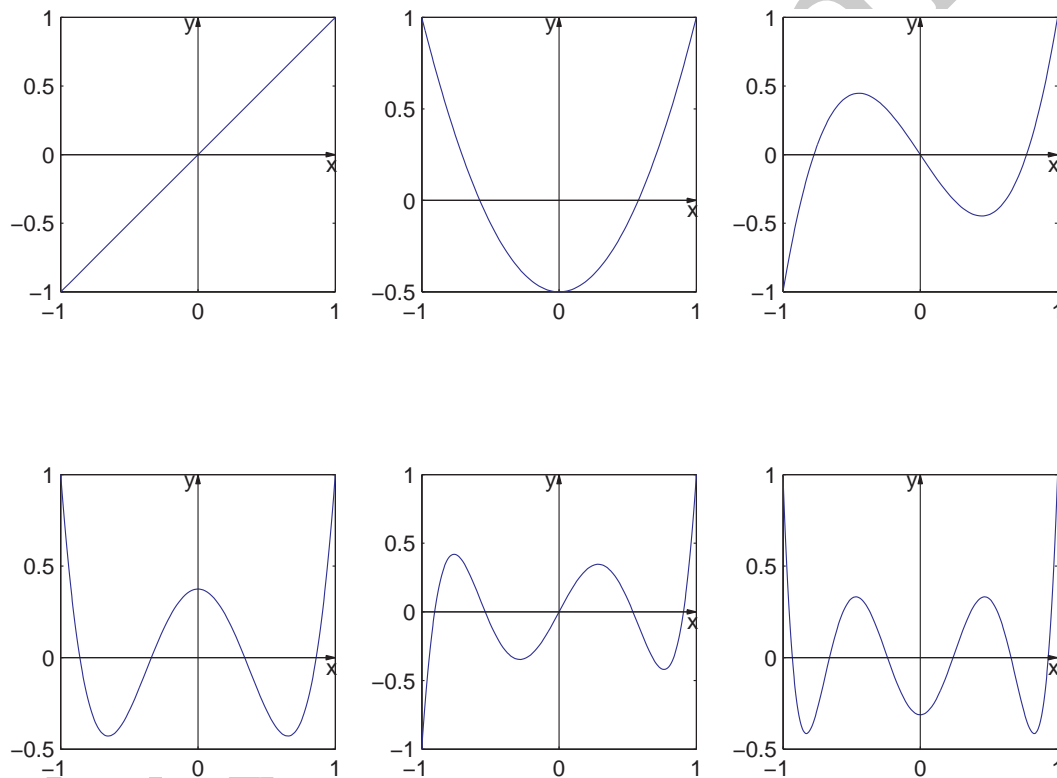
$$y_1(x) = 1 + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(2k-2-\alpha) \cdots (-\alpha)(2k-1+\alpha) \cdots (1+\alpha)}{(2k)!} x^{2k},$$

$$y_2(x) = x + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(2k-1-\alpha) \cdots (1-\alpha)(2k-2+\alpha) \cdots (2+\alpha)}{(2k+1)!} x^{2k+1}.$$

- (b) Mostre que se $\alpha = 2N$, para $N = 0, 1, 2, \dots$, então $y_1(x)$ é um polinômio de grau $2N$ contendo apenas potências pares de x . Mostre também que se $\alpha = 2N + 1$, para $N = 0, 1, 2, \dots$, então $y_2(x)$ é um polinômio de grau $2N + 1$ contendo apenas potências ímpares de x .
- (c) O **polinômio de Legendre** é definido como a solução polinomial da equação de Legendre, para $\alpha = N$, que satisfaz $P_N(1) = 1$. Determine os polinômios de Legendre para $N = 0, 1, 2, 3, 4$.

6.5. Considere a equação de Hermite

$$y'' - 2xy' + \lambda y = 0$$

Figura 2.33. Polinômios de Legendre $P_n(x)$, para $n = 1, \dots, 6$

- (a) Mostre que a solução geral da equação de Hermite é

$$y(x) = a_0 y_1(x) + a_1 y_2(x),$$

em que

$$y_1(x) = 1 + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^k (\lambda - 2(2k-2)) \cdots \lambda}{(2k)!} x^{2k},$$

$$y_2(x) = x + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^k (\lambda - 2(2k-1)) \cdots (\lambda - 2)}{(2k+1)!} x^{2k+1}.$$

- (b) Mostre que se $\lambda = 4N$, para $N = 0, 1, 2, \dots$, então $y_1(x)$ é um polinômio de grau $2N$ contendo apenas potências pares de x . Mostre também que se $\lambda = 2(2N+1)$, para $N = 0, 1, 2, \dots$, então $y_2(x)$ é um polinômio de grau $2N+1$ contendo apenas potências ímpares de x .
- (c) O **polinômio de Hermite** $H_N(x)$ é definido como a solução polinomial da equação de Hermite, para $\lambda = 2N$, tal que o coeficiente de x^N é igual a 2^N . Determine os polinômios de Hermite para $N = 0, 1, 2, 3, 4$.

6.6. Considere a equação de Chebyshev de primeiro tipo

$$(1 - x^2)y'' - xy' + \alpha^2 y = 0.$$

- (a) Mostre que a solução geral da equação de Chebyshev é

$$y(x) = a_0 y_1(x) + a_1 y_2(x),$$

em que

$$y_1(x) = 1 + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{((2k-2)^2 - \alpha^2) \cdots (-\alpha^2)}{(2k)!} x^{2k},$$

$$y_2(x) = x + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{((2k-1)^2 - \alpha^2) \cdots (1 - \alpha^2)}{(2k+1)!} x^{2k+1}.$$

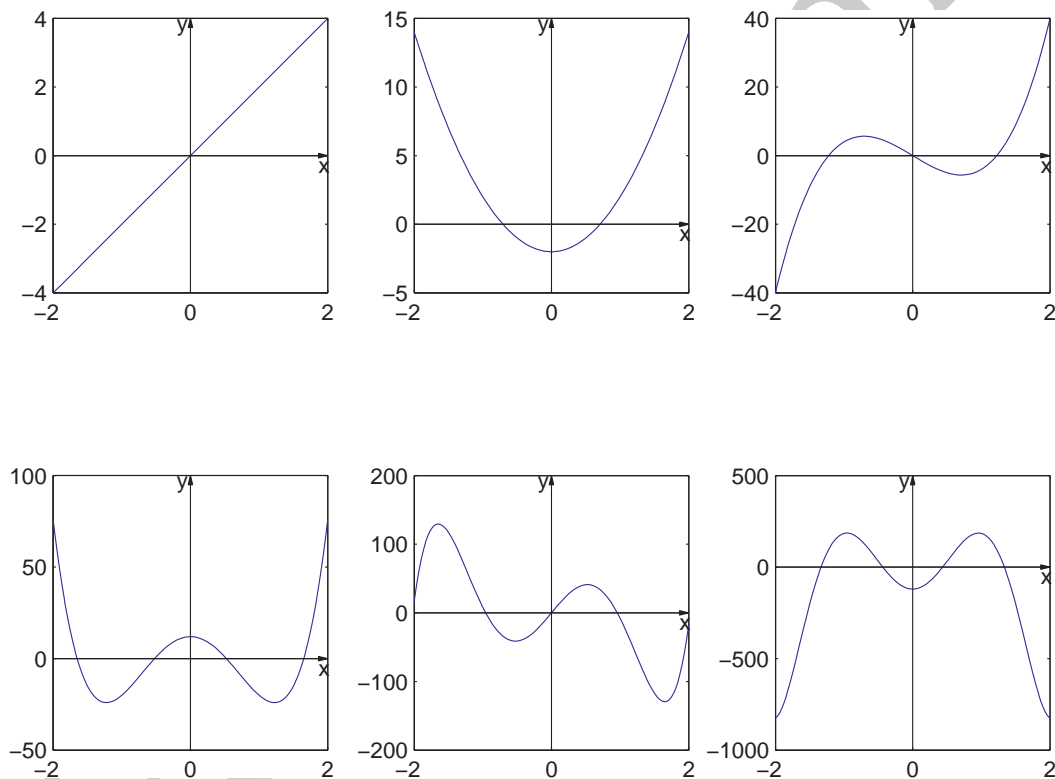


Figura 2.34. Polinômios de Hermite $H_n(x)$, para $n = 1, \dots, 6$

- (b) Mostre que se $\alpha = 2N$, para $N = 0, 1, 2, \dots$, então $y_1(x)$ é um polinômio de grau $2N$ contendo apenas potências pares de x . Mostre também que se $\alpha = 2N + 1$, para $N = 0, 1, 2, \dots$, então $y_2(x)$ é um polinômio de grau $2N + 1$ contendo apenas potências ímpares de x .
- (c) O **polinômio de Chebyshev de primeiro tipo** $T_N(x)$ é definido como a solução polinomial da equação de Chebyshev de primeiro tipo, para $\alpha = N$, tal que o coeficiente de x^N é igual a 1, se $N = 0$ e igual a 2^{N-1} , se $N > 0$. Determine os polinômios de Chebyshev de primeiro tipo para $N = 0, 1, 2, 3, 4$.

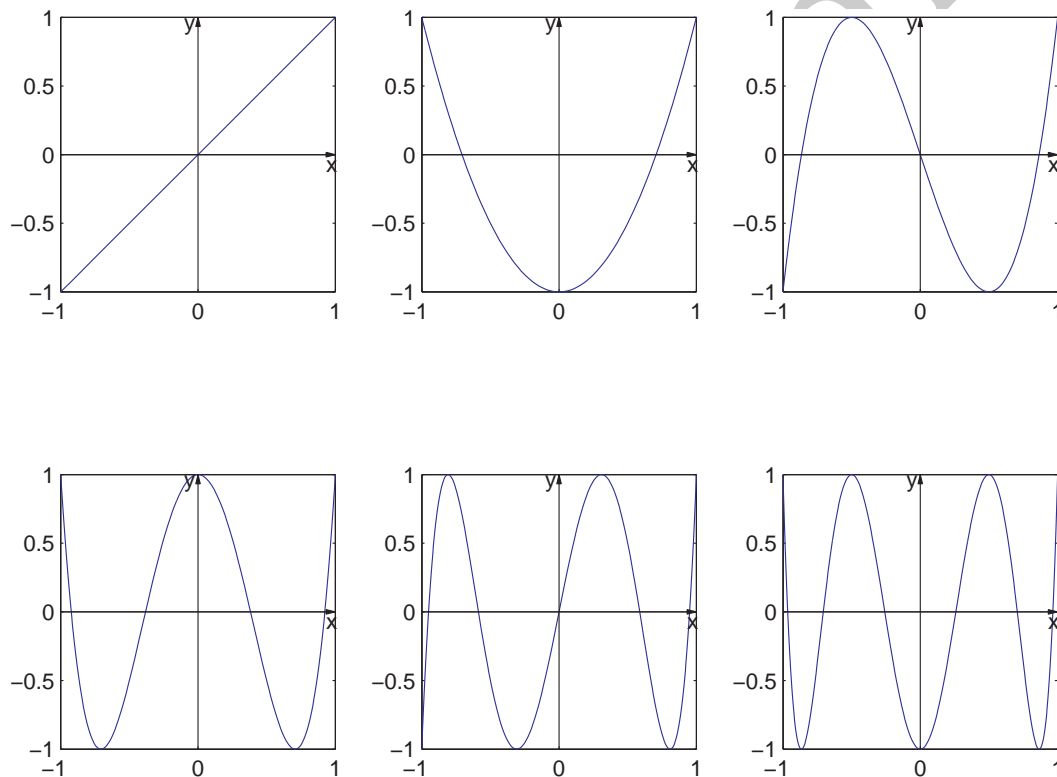


Figura 2.35. Polinômios de Chebyshev de primeiro tipo $T_n(x)$, para $n = 1, \dots, 6$

2.7 Mudanças de Variáveis

2.7.1 Equações que não Contém y

Equações que podem ser escritas na forma

$$y'' = f(y', t) \quad (2.60)$$

podem ser resolvidas fazendo-se a substituição $v(t) = y'(t)$. O que transforma a equação (2.60) em

$$v' - f(v, t) = 0$$

Esta é uma equação de 1ª ordem. Depois de resolvida esta equação, resolve-se a equação

$$y' = v(t).$$

Exemplo 2.26. Vamos considerar a equação

$$t^2 y'' + 2ty' = 1, \quad t > 0.$$

Substituindo-se $y' = v$ na equação obtemos

$$t^2 v' + 2tv = 1$$

Dividindo-se por t^2

$$v' + \frac{2}{t}v = \frac{1}{t^2}.$$

Multiplicando-se a equação por $\mu(t) = e^{\int \frac{2}{t} dt} = t^2$

$$\frac{d}{dt} (t^2 v) = 1$$

Integrando-se obtemos

$$t^2 v(t) = t + c_1$$

Logo,

$$y' = v(t) = \frac{1}{t} + \frac{c_1}{t^2}$$

Integrando-se

$$y(t) = \ln t + \frac{c_1}{t} + c_2.$$

2.7.2 Equações que não Contém t

Equações que podem ser escritas na forma

$$y'' = f(y', y) \quad (2.61)$$

podem ser resolvidas fazendo-se a substituição $v(t) = y'(t)$. O que transforma a equação em

$$\frac{dv}{dt} = f(v, y)$$

Se considerarmos $v = v(y(t))$, então

$$\frac{dv}{dt} = \frac{dv}{dy} y' = v \frac{dv}{dy}$$

E a equação (2.61) se transforma em

$$v \frac{dv}{dy} = f(v, y)$$

Depois de resolvida esta equação resolve-se a equação

$$y' = v(y)$$

Exemplo 2.27. Considere a equação

$$yy'' + (y')^2 = 0.$$

Substituindo-se

$$v = y' \quad \text{e} \quad y'' = \frac{dv}{dt} = \frac{dv}{dy} \frac{dy}{dt} = v \frac{dv}{dy}$$

na equação obtemos

$$yv \frac{dv}{dy} + v^2 = 0.$$

Logo,

$$v = 0 \quad \text{ou} \quad y \frac{dv}{dy} + v = 0.$$

$$v = 0 \quad \Rightarrow \quad y(t) = c_1.$$

$$\frac{1}{v} \frac{dv}{dy} = -\frac{1}{y}$$

$$\frac{d}{dt} (\ln |v|) = -\frac{1}{y}$$

$$\ln |v| = -\ln |y| + \tilde{c}_1$$

$$\ln |vy| = \tilde{c}_1$$

$$vy = c_1$$

Substituindo-se $v = y'$ obtemos

$$yy' = c_1$$

que pode ser escrita como

$$\frac{d}{dy} \left(\frac{y^2}{2} \right) y' = c_1$$

ou ainda

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{y^2}{2} \right) = c_1$$

Assim, a solução da equação inicial é dada implicitamente por

$$\frac{y^2}{2} = c_1 t + c_2.$$

2.7.3 Equações de Euler

As **equações de Euler** são equações que podem ser escritas na forma

$$x^2 y'' + bxy' + cy = 0. \quad (2.62)$$

em que b e c são constantes reais. Para $x > 0$, a substituição $t = \ln x$ transforma a equação de Euler numa equação linear com coeficientes constantes.

$$\frac{dy}{dx} = \frac{dy}{dt} \frac{dt}{dx} = \frac{1}{x} \frac{dy}{dt}$$

$$\begin{aligned} \frac{d^2 y}{dx^2} &= \frac{d}{dx} \left(\frac{dy}{dx} \right) = -\frac{1}{x^2} \frac{dy}{dt} + \frac{1}{x} \frac{d}{dx} \left(\frac{dy}{dt} \right) \\ &= -\frac{1}{x^2} \frac{dy}{dt} + \frac{1}{x} \frac{d}{dt} \left(\frac{dy}{dt} \right) \frac{dt}{dx} = -\frac{1}{x^2} \frac{dy}{dt} + \frac{1}{x^2} \frac{d^2 y}{dt^2} \end{aligned}$$

Substituindo-se na equação de Euler (2.62) obtemos a equação linear com coeficientes constantes

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + (b-1) \frac{dy}{dt} + cy = 0.$$

Se $y_1(t)$ e $y_2(t)$ são soluções fundamentais desta equação, então

$$y(x) = c_1 y_1(\ln x) + c_2 y_2(\ln x)$$

é a solução geral da equação de Euler (2.62) para $x > 0$.

Exemplo 2.28. Vamos resolver as equações seguintes para $x > 0$.

(a) $x^2 y'' - 2xy' + 2y = 0$

(b) $x^2 y'' + 5xy' + 4y = 0$

(c) $x^2 y'' - xy' + 5y = 0$

Solução:

(a) Fazendo $t = \ln x$ a equação $x^2 y'' - 2xy' + 2y = 0$ se transforma em

$$y'' - 3y' + 2y = 0.$$

Equação característica

$$r^2 - 3r + 2 = 0 \Leftrightarrow r = 2, 1$$

Solução geral:

$$y(x) = c_1 e^{2 \ln x} + c_2 e^{\ln x} = c_1 x^2 + c_2 x$$

(b) Fazendo $t = \ln x$ a equação $x^2 y'' + 5xy' + 4y = 0$ se transforma em

$$y'' + 4y' + 4y = 0.$$

Equação característica

$$r^2 + 4r + 4 = 0 \Leftrightarrow r = -2$$

Solução geral:

$$y(x) = c_1 e^{-2 \ln x} + c_2 e^{-2 \ln x} \ln x = c_1 x^{-2} + c_2 x^{-2} \ln x$$

(c) Fazendo $t = \ln x$ a equação $x^2 y'' - xy' + 5y = 0$ se transforma em

$$y'' - 2y' + 5y = 0.$$

Equação característica

$$r^2 - 2r + 5 = 0 \Leftrightarrow r = 1 \pm 2i$$

Solução geral:

$$\begin{aligned} y(x) &= c_1 e^{\ln x} \cos(2 \ln x) + c_2 e^{\ln x} \sin(2 \ln x) \\ &= c_1 x \cos(2 \ln x) + c_2 x \sin(2 \ln x) \end{aligned}$$

2.7.4 Outras Mudanças

Exemplo 2.29. Vamos encontrar a solução geral da equação

$$ty'' + (2t^2 - 1)y' + t^3 y = 0, \quad \text{para } t > 0$$

fazendo a mudança de variáveis $x = t^2/2$.

$$x = t^2/2 \quad \Rightarrow \quad \frac{dx}{dt} = t,$$

$$y' = \frac{dy}{dx} \frac{dx}{dt} = t \frac{dy}{dx},$$

$$y'' = \frac{d}{dt} \left(t \frac{dy}{dx} \right) = \frac{dy}{dx} + t \frac{d}{dt} \frac{dy}{dx} = \frac{dy}{dx} + t \frac{d^2 y}{dx^2} \frac{dx}{dt} = \frac{dy}{dx} + t^2 \frac{d^2 y}{dx^2}$$

Substituindo-se na equação obtemos

$$t\left(\frac{dy}{dx} + t^2\frac{d^2y}{dx^2}\right) + (2t^2 - 1)t\frac{dy}{dx} + t^3y = 0$$

Simplificando-se e dividindo-se por t^3 obtemos

$$\frac{d^2y}{dx^2} + 2\frac{dy}{dx} + y = 0$$

A solução geral desta equação é

$$y(x) = c_1e^{-x} + c_2xe^{-x}$$

Substituindo-se $x = t^2/2$, temos que a solução geral da equação inicial é

$$y(t) = c_1e^{-t^2/2} + c_2t^2e^{-t^2/2}$$

Exercícios (respostas na página 480)

7.1. Resolva as equações abaixo fazendo a substituição $v = y'$.

(a) $y'' + (y')^2 = 0$

(b) $ty'' = y'$

(c) $(1 + x^2)y'' + 2xy' = 2x^{-3}$

7.2. Resolva as equações abaixo fazendo a substituição $v = y'$.

(a) $y'' + y(y')^3 = 0$

(b) $y^2 y'' - y' = 0$

(c) $y'' = (y')^3 + y'$

7.3. Resolva as equações abaixo para $x > 0$ fazendo a substituição $t = \ln x$.

(a) $x^2 y'' + 4xy' + 2y = 0$

(b) $x^2 y'' - 3xy' + 4y = 0$

(c) $x^2 y'' + 3xy' + 5y = 0$

2.8 Respostas dos Exercícios

1. Equações Homogêneas - Parte I (página 287)

1.1. (a) Sejam $y_1(t) = e^{-\omega(t-a)}$ e $y_2(t) = e^{\omega(t-a)}$.

$$y_1''(t) - \omega^2 y_1(t) = \omega^2 e^{-\omega(t-a)} - \omega^2 e^{-\omega(t-a)} = 0.$$

$$y_2''(t) - \omega^2 y_2(t) = \omega^2 e^{\omega(t-a)} - \omega^2 e^{\omega(t-a)} = 0.$$

Logo, $y_1(t) = e^{-\omega(t-a)}$ e $y_2(t) = e^{\omega(t-a)}$ são soluções da equação diferencial.

$$W[y_1, y_2](t) = \det \begin{bmatrix} y_1(t) & y_2(t) \\ y_1'(t) & y_2'(t) \end{bmatrix}$$

$$= \det \begin{bmatrix} e^{-\omega(t-a)} & e^{\omega(t-a)} \\ -\omega e^{-\omega(t-a)} & \omega e^{\omega(t-a)} \end{bmatrix}$$

$$= \det \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -\omega & \omega \end{bmatrix} = 2\omega \neq 0.$$

Logo, a solução geral da equação diferencial é

$$y(t) = c_1 y_1(t) + c_2 y_2(t) = c_1 e^{-\omega(t-a)} + c_2 e^{\omega(t-a)}.$$

(b) Sejam $y_1(t) = \cosh(\omega(t-a)) = \frac{e^{-\omega(t-a)} + e^{\omega(t-a)}}{2}$ e $y_2(t) = \sinh(\omega(t-a)) = \frac{e^{-\omega(t-a)} - e^{\omega(t-a)}}{2}$.

$$y_1''(t) - \omega^2 y_1(t) = \omega^2 \cosh(\omega(t-a)) - \omega^2 \cosh(\omega(t-a)) = 0.$$

$$y_2''(t) - \omega^2 y_2(t) = \omega^2 \sinh(\omega(t-a)) - \omega^2 \sinh(\omega(t-a)) = 0.$$

Logo, $y_1(t) = \cosh(\omega(t-a))$ e $y_2(t) = \sinh(\omega(t-a))$ são soluções da equação diferencial.

$$W[y_1, y_2](t) = \det \begin{bmatrix} y_1(t) & y_2(t) \\ y_1'(t) & y_2'(t) \end{bmatrix}$$

$$= \det \begin{bmatrix} \cosh(\omega(t-a)) & \sinh(\omega(t-a)) \\ \omega \sinh(\omega(t-a)) & \omega \cosh(\omega(t-a)) \end{bmatrix}$$

$$= \omega \det \begin{bmatrix} \cosh(\omega(t-a)) & \sinh(\omega(t-a)) \\ \sinh(\omega(t-a)) & \cosh(\omega(t-a)) \end{bmatrix}$$

$$= \omega \neq 0, \text{ pois } \cosh^2 x - \sinh^2 x = 1.$$

Logo, a solução geral da equação diferencial é

$$y(t) = c_1 y_1(t) + c_2 y_2(t) = c_1 \cosh(\omega(t-a)) + c_2 \sinh(\omega(t-a)).$$

- 1.2. (a) Substituindo-se $y_1(x) = e^{rx}$, $y_1'(x) = r e^{rx}$ e $y_1''(x) = r^2 e^{rx}$ na equação diferencial obtemos

$$\left((r^2 + r)x + 3r^2 + 2r - 1 \right) e^{rx} = 0$$

Dividindo-se por e^{rx} , obtemos

$$(r^2 + r)x + 3r^2 + 2r - 1 = 0,$$

para todo x em um intervalo. Ou seja, r tem que ser solução, simultaneamente, das equações

$$r^2 + r = 0 \quad \text{e} \quad 3r^2 + 2r - 1 = 0.$$

Assim, $r = -1$. Portanto, $y_1(x) = e^{-x}$ é uma solução da equação diferencial.

- (b) Substituindo-se $y_2(x) = ax + b$, $y_2'(x) = a$ e $y_2''(x) = 0$ na equação diferencial obtemos

$$a(x+2) - ax - b = 0$$

ou

$$2a - b = 0.$$

Logo $y_2(x) = ax + b$ é solução da equação diferencial se, e somente se,

$$b = 2a.$$

Assim todas as soluções da equação diferencial que são funções de 1º grau são da forma

$$y(x) = a(x+2), \quad \text{para } a \in \mathbb{R}.$$

Como foi pedido apenas uma solução, vamos escolher $a = 1$ e neste caso, $y_2(x) = x + 2$ é uma função de 1º grau que é solução da equação diferencial.

- (c) Dos itens anteriores temos que $y_1(x) = e^{-x}$ e $y_2(x) = x + 2$ são soluções da equação diferencial. Vamos ver que $y_1(x) = e^{-x}$ e $y_2(x) = x + 2$ são soluções fundamentais da equação.

$$W[y_1, y_2](x) = \det \begin{bmatrix} y_1(x) & y_2(x) \\ y_1'(x) & y_2'(x) \end{bmatrix} \\ = \det \begin{bmatrix} e^{-x} & x+2 \\ -e^{-x} & 1 \end{bmatrix} = e^{-x}(3+x) \neq 0, \text{ para } x \neq -3$$

Como $y_1(x) = e^{-x}$ e $y_2(x) = x + 2$ são soluções fundamentais da equação, a solução geral é

$$y(x) = c_1 e^{-x} + c_2(x + 2),$$

- (d) Como $y(1) = 1$, então substituindo $x = 1$ e $y = 1$ na solução geral $y(x)$ obtemos que $c_1 e^{-1} + 3c_2 = 1$. Como $y'(1) = 3$, substituindo-se $x = 1$ e $y' = 3$ na expressão obtida derivando-se $y(x)$:

$$y'(x) = -c_1 e^{-x} + c_2$$

obtemos $-c_1 e^{-1} + c_2 = 3$. Resolvendo o sistema

$$c_1 e^{-1} + 3c_2 = 1, \quad -c_1 e^{-1} + c_2 = 3$$

obtemos $c_1 = -2e$ e $c_2 = 1$. Assim a solução do problema de valor inicial é

$$y(x) = -2e^{-x+1} + x + 2$$

- 1.3.** Substituindo-se $y = x^r$, $\frac{dy}{dx} = rx^{r-1}$ e $\frac{d^2y}{dx^2} = r(r-1)x^{r-2}$ em (2.11) obtemos

$$x^2 r(r-1)x^{r-2} + b x r x^{r-1} + c x^r = 0.$$

$$(r^2 + (b-1)r + c)x^r = 0.$$

Dividindo-se por x^r , obtemos que $y = x^r$ é solução da equação (2.11) se, e somente se, r é solução da equação

$$r^2 + (b-1)r + c = 0.$$

1.4.

$$\begin{aligned}
 \det \begin{bmatrix} y_1(x) & y_2(x) \\ y_1'(x) & y_2'(x) \end{bmatrix} &= \det \begin{bmatrix} x^{r_1} & x^{r_2} \\ r_1 x^{r_1-1} & r_2 x^{r_2-1} \end{bmatrix} \\
 &= x^{r_1-1} x^{r_2-1} \det \begin{bmatrix} x & x \\ r_1 & r_2 \end{bmatrix} \\
 &= (r_2 - r_1) x^{r_1+r_2-1} \neq 0,
 \end{aligned}$$

para todo $x > 0$.

1.5. Neste caso, para $x > 0$, pela fórmula de Euler:

$$\begin{aligned}
 y_1(x) &= x^{r_1} = e^{r_1 \ln x} = e^{(\alpha+i\beta) \ln x} \\
 &= e^{\alpha \ln x} (\cos(\beta \ln x) + i \operatorname{sen}(\beta \ln x)) \\
 &= x^\alpha (\cos(\beta \ln x) + i \operatorname{sen}(\beta \ln x)) \quad e \\
 y_2(x) &= x^{r_2} = e^{r_2 \ln x} = e^{(\alpha-i\beta) \ln x} \\
 &= e^{\alpha \ln x} (\cos(-\beta \ln x) + i \operatorname{sen}(-\beta \ln x)) \\
 &= x^\alpha (\cos(\beta \ln x) - i \operatorname{sen}(\beta \ln x))
 \end{aligned}$$

são soluções complexas da equação diferencial (2.11).

A solução geral complexa é

$$\begin{aligned}
 y(x) &= C_1 x^{r_1} + C_2 x^{r_2} \\
 &= C_1 x^\alpha (\cos(\beta \ln x) + i \operatorname{sen}(\beta \ln x)) \\
 &\quad + C_2 x^\alpha (\cos(\beta \ln x) - i \operatorname{sen}(\beta \ln x)) \\
 &= (C_1 + C_2) x^\alpha \cos(\beta \ln x) \\
 &\quad + i(C_1 - C_2) x^\alpha \operatorname{sen}(\beta \ln x)
 \end{aligned}$$

Tomando $C_1 = C_2 = 1/2$, temos a solução

$$u(x) = x^\alpha \cos(\beta \ln x)$$

e tomando $C_1 = -\frac{i}{2}$ e $C_2 = \frac{i}{2}$, temos a solução

$$v(x) = x^\alpha \operatorname{sen}(\beta \ln x).$$

$$\det \begin{bmatrix} u(x) & v(x) \\ u'(x) & v'(x) \end{bmatrix} = \beta x^{2\alpha-1} \neq 0, \quad \forall x > 0.$$

1.6. Vamos mostrar que

$$y_1(x) = x^r \quad \text{e} \quad y_2(x) = x^r \ln x$$

são soluções fundamentais da equação de Euler, em que $r = \frac{1-b}{2}$.

$$y_2'(x) = x^{r-1}(r \ln x + 1),$$

$$y_2''(x) = x^{r-2}((r^2 - r) \ln x + 2r - 1)$$

$$x^2 y_2'' + b x y_2' + c y_2 =$$

$$= x^r((r^2 + (b-1)r + c) \ln x + 2r + b - 1) = 0.$$

$$\begin{aligned} \det \begin{bmatrix} y_1(x) & y_2(x) \\ y_1'(x) & y_2'(x) \end{bmatrix} &= \det \begin{bmatrix} x^{r_1} & x^{r_1} \ln x \\ r_1 x^{r_1-1} & (1 + r_1 \ln x) x^{r_1-1} \end{bmatrix} \\ &= x^{2r_1-1} \det \begin{bmatrix} 1 & \ln x \\ r_1 & (1 + r_1 \ln x) \end{bmatrix} \\ &= x^{2r_1-1} \neq 0, \quad \text{para todo } x > 0. \end{aligned}$$

1.7. (a) Equação indicial:

$$r(r-1) + 4r + 2 = 0 \Leftrightarrow r = -2, -1$$

Solução geral:

$$y(x) = c_1 x^{-2} + c_2 x^{-1}$$

(b) Equação indicial:

$$r(r-1) - 3r + 4 = 0 \Leftrightarrow r = 2$$

Solução geral:

$$y(x) = c_1 x^2 + c_2 x^2 \ln x$$

(c) Equação indicial:

$$r(r-1) + 3r + 5 = 0 \Leftrightarrow r = -1 \pm 2i$$

Solução geral:

$$y(x) = c_1 x^{-1} \cos(2 \ln x) + c_2 x^{-1} \sin(2 \ln x)$$

1.8. (a)

$$p(t) = 0$$

$$q(t) = \frac{t-2}{t^2-1} = \frac{t-2}{(t-1)(t+1)}$$

$$f(t) = \frac{t}{t^2-1} = \frac{t}{(t-1)(t+1)}.$$

Como $t_0 = 0$, então o problema de valor inicial tem solução no intervalo $-1 < t < 1$.

(b)

$$p(t) = \frac{1}{t^2-1} = \frac{1}{(t-1)(t+1)}$$

$$q(t) = \frac{t}{t^2-1} = \frac{t}{(t-1)(t+1)}$$

$$f(t) = \frac{t^2}{t^2-1} = \frac{t^2}{(t-1)(t+1)}.$$

Como $t_0 = 2$, então o problema de valor inicial tem solução no intervalo $t > 1$.

(c)

$$p(t) = \frac{t+1}{t^2-t} = \frac{t+1}{t(t-1)}$$

$$q(t) = \frac{1}{t^2-t} = \frac{t+1}{t(t-1)}$$

$$f(t) = \frac{e^t}{t^2-t} = \frac{e^t}{t(t-1)}.$$

Como $t_0 = -1$, então o problema de valor inicial tem solução no intervalo $t < 0$.

(d)

$$p(t) = \frac{t+3}{t^2-t} = \frac{t+3}{t(t-1)}$$

$$q(t) = \frac{2}{t^2-t} = \frac{t+3}{t(t-1)}$$

$$f(t) = \frac{\cos t}{t^2-t} = \frac{\cos t}{t(t-1)}.$$

Como $t_0 = 2$, então o problema de valor inicial tem solução no intervalo $t > 1$.

1.9. Sejam $y_1(t)$ a solução do PVI

$$\begin{cases} y'' + p(t)y' + q(t)y = 0, \\ y(t_0) = 1, \quad y'(t_0) = 0 \end{cases}$$

e $y_2(t)$ a solução do PVI

$$\begin{cases} y'' + p(t)y' + q(t)y = 0, \\ y(t_0) = 0, \quad y'(t_0) = 1, \end{cases}$$

então $W[y_1, y_2](t_0) = 1 \neq 0$.

1.10. Substituindo-se $y(t) = \sin(t^2)$ na equação diferencial $y'' + p(t)y' + q(t)y = 0$ obtemos

$$-4t^2 \sin(t^2) + q(t) \sin(t^2) + 2p(t)t \cos(t^2) + 2 \cos(t^2) = 0.$$

Substituindo-se $t = 0$ obtemos $2 = 0$, que é um absurdo.

1.11. $y_1'(t) = 3t^2$, $y_1''(t) = 6t$, $y_2'(t) = 3t|t|$, $y_2''(t) = 6|t|$. Substituindo-se na equação diferencial obtemos

$$ty_1'' - (2 + t^2)y_1' + 3ty_1 = 6t^2 - (2 + t^2)3t^2 + 3t^4 = 0.$$

$$ty_2'' - (2 + t^2)y_2' + 3ty_2 = 6t|t| - (2 + t^2)3t|t| + 3t^3|t| = 0.$$

Logo, $y_1(t)$ e $y_2(t)$ são soluções da equação diferencial. $y_1(t) = y_2(t)$, para $t \geq 0$ e $y_1(t) = -y_2(t)$, para $t < 0$. Logo, $y_1(t)$ e $y_2(t)$ são LI

$$W[y_1, y_2](t) = \det \begin{bmatrix} t^3 & t^2|t| \\ 3t^2 & 3t|t| \end{bmatrix} = 0, \quad \forall t \in \mathbb{R}.$$

1.12. Vamos supor que $y_1(t)$ e $y_2(t)$ não são soluções fundamentais da equação diferencial no intervalo I , então $W[y_1, y_2](t) = 0$, para todo $t \in I$. Considere a combinação linear nula

$$c_1 y_1(t) + c_2 y_2(t) = 0.$$

Derivando em relação a t obtemos

$$c_1 y_1'(t) + c_2 y_2'(t) = 0.$$

Seja $t_0 \in I$. Substituindo-se $t_0 \in I$ nas duas últimas equações obtemos o sistema

$$\begin{cases} c_1 y_1(t_0) + c_2 y_2(t_0) = 0 \\ c_1 y_1'(t_0) + c_2 y_2'(t_0) = 0 \end{cases}$$

que pode ser escrito na forma

$$AX = \vec{0}$$

em que

$$A = \begin{bmatrix} y_1(t_0) & y_2(t_0) \\ y_1'(t_0) & y_2'(t_0) \end{bmatrix}, \quad X = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad \vec{0} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Como $W[y_1, y_2](t_0) = \det(A) = 0$, então o sistema tem solução não trivial $(c_1, c_2) \neq (0, 0)$. Seja

$$y(t) = c_1 y_1(t) + c_2 y_2(t), \quad \text{para } t \in I.$$

$y(t)$ satisfaz as condições iniciais $y(t_0) = 0$ e $y'(t_0) = 0$. Logo, pelo Teorema de Existência e Unicidade (Teorema 2.1 na página 274),

$$y(t) = c_1 y_1(t) + c_2 y_2(t) = 0, \quad \text{para todo } t \in I.$$

Como c_1 e c_2 não são ambos nulos, então ou $y_2(t) = -\frac{c_1}{c_2} y_1(t)$ ou $y_1(t) = -\frac{c_2}{c_1} y_2(t)$, para todo $t \in I$. Ou seja, $y_1(t)$ e $y_2(t)$ são LD.

1.13. (a)

$$W[y_1, y_2](t) = y_1(t)y_2'(t) - y_2(t)y_1'(t)$$

$$\begin{aligned} W[y_1, y_2]'(t) &= y_1'(t)y_2'(t) + y_1(t)y_2''(t) \\ &\quad - y_2'(t)y_1'(t) - y_2(t)y_1''(t) \\ &= y_1(t)y_2''(t) - y_2(t)y_1''(t) \end{aligned}$$

(b) Como $y_1(t)$ e $y_2(t)$ são soluções da equação $y'' + p(t)y' + q(t)y = 0$, então

$$y_1''(t) + p(t)y_1'(t) + q(t)y_1(t) = 0 \quad (2.63)$$

$$y_2''(t) + p(t)y_2'(t) + q(t)y_2(t) = 0 \quad (2.64)$$

Multiplicando-se a equação (2.64) por $y_1(t)$ e subtraindo-se da equação (2.63) multiplicada por $y_2(t)$ obtemos

$$y_1(t)y_2''(t) - y_2(t)y_1''(t) + p(t)(y_1(t)y_2'(t) - y_1'(t)y_2(t)) = 0,$$

ou seja, pelo item anterior

$$W[y_1, y_2]'(t) + p(t)W[y_1, y_2](t) = 0$$

- (c) Pelo item anterior o wronskiano satisfaz a equação diferencial $W' + p(t)W = 0$. A equação diferencial pode ser escrita como uma equação separável

$$\frac{W'}{W} = -p(t).$$

Integrando-se em relação a t obtemos

$$\int \frac{W'}{W} dt = - \int p(t) dt + c_1$$

$$\int \frac{1}{W} dW = - \int p(t) dt + c_1$$

$$\ln |W(t)| = - \int p(t) dt + c_1$$

Aplicando-se a exponencial a ambos os membros obtemos

$$W(t) = W[y_1, y_2](t) = ce^{-\int p(t) dt}.$$

- (d) Pelo item anterior, se para algum $t_0 \in I$, $W[y_1, y_2](t_0) = 0$, então $c = 0$ e $W[y_1, y_2](t) = 0$, para todo $t \in I$.

Por outro lado, se para algum $t_0 \in I$, $W[y_1, y_2](t_0) \neq 0$, então $c \neq 0$ e $W[y_1, y_2](t) \neq 0$, para todo $t \in I$.

1.14. Substituindo-se $y_1(t)$ e $y_2(t)$ na equação diferencial $y'' + p(t)y' + q(t)y = 0$ obtemos o sistema $AX = B$, em que $A = \begin{bmatrix} y_1'(t) & y_1(t) \\ y_2'(t) & y_2(t) \end{bmatrix}$, $X = \begin{bmatrix} p(t) \\ q(t) \end{bmatrix}$ e $B = \begin{bmatrix} -y_1''(t) \\ -y_2''(t) \end{bmatrix}$. Assim, $\begin{bmatrix} p(t) \\ q(t) \end{bmatrix} = X = A^{-1}B = \begin{bmatrix} y_1'(t) & y_1(t) \\ y_2'(t) & y_2(t) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -y_1''(t) \\ -y_2''(t) \end{bmatrix} = \frac{1}{W[y_1, y_2](t)} \begin{bmatrix} y_2(t) & -y_1(t) \\ -y_2'(t) & y_1'(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1''(t) \\ y_2''(t) \end{bmatrix} = \frac{1}{W[y_1, y_2](t)} \begin{bmatrix} y_2(t)y_1''(t) - y_1(t)y_2''(t) \\ y_1'(t)y_2''(t) - y_2'(t)y_1''(t) \end{bmatrix}$. Observe a aplicação do Teorema de Abel (exercício anterior).

2. Equações Homogêneas - Parte II (página 307)

2.1. (a) $2x^2y_1'' - xy_1' - 9y_1 = 2x^2(6x) - x(3x^2) - 9x^3 = 12x^3 - 3x^3 - 9x^3 = 0$

Logo, $y_1(x) = x^3$ é solução da equação.

(b) Seja $y_1(x) = x^3$. Vamos procurar uma segunda solução da equação da forma

$$y(x) = v(x)y_1(x) = v(x)x^3.$$

Então, $v(x)$ é solução da equação diferencial

$$y_1v'' + (p(x)y_1 + 2y_1')v' = 0,$$

em que $p(x) = -x/(2x^2) = -1/(2x)$. Ou seja,

$$x^3v'' + \left(-\frac{x^2}{2} + 6x^2\right)v' = 0$$

ou

$$x^3v'' + \frac{11}{2}x^2v' = 0.$$

Seja $w(x) = v'(x)$. Então, a equação acima pode ser escrita como

$$2xw' + 11w = 0.$$

Esta é uma equação de 1a. ordem separável.

$$2\frac{w'}{w} = -\frac{11}{x}$$

$$\begin{aligned}\frac{d}{dx}(2 \ln |w|) &= -\frac{11}{x} \\ 2 \ln |w| &= -11 \ln |x| + \tilde{c}_1 \\ \ln |x^{11}(w(x))^2| &= \tilde{c}_1 \\ w(x) = v'(x) &= c_1 x^{-11/2}\end{aligned}$$

Resolvendo a equação para $v(x)$:

$$v(x) = c_1 \int x^{-11/2} dx = -c_1 \frac{2}{9} x^{-9/2} + c_2$$

Tomando-se $c_2 = 0$ e $c_1 = -9/2$ obtemos $v(x) = x^{-9/2}$ e uma segunda solução da equação é

$$y_2(x) = v(x)y_1(x) = x^{-9/2}x^3 = x^{-3/2}$$

Vamos ver que $y_1(x) = x^3$ e $y_2(x) = x^{-3/2}$ são soluções fundamentais da equação.

$$\begin{aligned}W[y_1, y_2](x) &= \det \begin{bmatrix} y_1(x) & y_2(x) \\ y_1'(x) & y_2'(x) \end{bmatrix} \\ &= \det \begin{bmatrix} x^3 & x^{-3/2} \\ 3x^2 & -\frac{3}{2}x^{-5/2} \end{bmatrix} = -\frac{9}{2}x^{1/2} \neq 0, \\ &\text{para } x \neq 0.\end{aligned}$$

2.2. (a) $x^2 y_1'' + 3x y_1' + y_1 = x^2(2x^{-3}) + 3x(-x^{-2}) + x^{-1} = 2x^{-1} - 3x^{-1} + x^{-1} = 0$
Logo, $y_1(x) = x^{-1}$ é solução da equação.

(b) Seja $y_1(x) = x^{-1}$. Vamos procurar uma segunda solução da equação da forma

$$y(x) = v(x)y_1(x) = v(x)x^{-1}.$$

Então, $v(x)$ é solução da equação diferencial

$$y_1 v'' + (p(x)y_1 + 2y_1')v' = 0,$$

em que $p(x) = 3x/x^2 = 3/x$. Ou seja,

$$x^{-1}v'' + \left(\frac{3}{x^2} - 2x^{-2}\right)v' = 0$$

ou

$$v'' + \frac{1}{x}v' = 0.$$

Seja $w(x) = v'(x)$. Então, a equação acima pode ser escrita como

$$xw' + w = 0.$$

Esta é uma equação de 1a. ordem separável.

$$\frac{w'}{w} = -\frac{1}{x}$$

$$\frac{d}{dx}(\ln |w|) = -\frac{1}{x}$$

$$\ln |w| = -\ln |x| + \tilde{c}_1$$

$$\ln |xw(x)| = \tilde{c}_1$$

$$w(x) = v'(x) = c_1 x^{-1}$$

Resolvendo a equação para $v(x)$:

$$v(x) = c_1 \int x^{-1} dx = c_1 \ln x + c_2$$

Tomando-se $c_2 = 0$ e $c_1 = 1$ obtemos $v(x) = \ln x$ e uma segunda solução da equação é

$$y_2(x) = v(x)y_1(x) = x^{-1} \ln x$$

Vamos ver que $y_1(x) = x^{-1}$ e $y_2(x) = x^{-1} \ln x$ são soluções fundamentais da equação.

$$\begin{aligned}
 W[y_1, y_2](x) &= \det \begin{bmatrix} y_1(x) & y_2(x) \\ y_1'(x) & y_2'(x) \end{bmatrix} \\
 &= \det \begin{bmatrix} x^{-1} & x^{-1} \ln x \\ -x^{-2} & x^{-2}(1 - \ln x) \end{bmatrix} = x^{-3} \neq 0, \text{ para } x \neq 0
 \end{aligned}$$

2.3.

$$y(x) = v(x)y_1(x) = v(x)x^{\frac{1-b}{2}}.$$

Então, $v(x)$ é solução da equação diferencial

$$y_1 v'' + (p(x)y_1 + 2y_1')v' = 0,$$

em que $p(x) = bx/x^2 = b/x$. Ou seja,

$$x^{\frac{1-b}{2}} v'' + (bx^{\frac{-1-b}{2}} + (1-b)x^{\frac{-1-b}{2}})v' = 0$$

ou

$$x^{\frac{1-b}{2}} v'' + x^{\frac{-1-b}{2}} v' = 0$$

ou ainda

$$xv'' + v' = 0.$$

Seja $w(x) = v'(x)$. Então, a equação acima pode ser escrita como

$$xw' + w = 0.$$

Esta é uma equação de 1a. ordem separável.

$$\frac{w'}{w} + \frac{1}{x} = 0$$

$$\frac{d}{dx} (\ln |w| + \ln |x|) = 0$$

$$\ln |xw(x)| = \tilde{c}_1$$

$$w(x) = v'(x) = c_1 x^{-1}$$

Resolvendo a equação para $v(x)$:

$$v(x) = c_1 \int x^{-1} dx = c_1 \ln x + c_2$$

Tomando-se $c_2 = 0$ e $c_1 = 1$ obtemos $v(x) = \ln x$ e uma segunda solução da equação é

$$y_2(x) = v(x)y_1(x) = x^{\frac{1-b}{2}} \ln x$$

Vamos mostrar que

$$y_1(x) = x^r \quad \text{e} \quad y_2(x) = x^r \ln x$$

são soluções fundamentais da equação de Euler.

$$\begin{aligned} \det \begin{bmatrix} y_1(x) & y_2(x) \\ y_1'(x) & y_2'(x) \end{bmatrix} &= \det \begin{bmatrix} x^r & x^r \ln x \\ r x^{r-1} & (1+r \ln x) x^{r-1} \end{bmatrix} \\ &= x^{2r-1} \det \begin{bmatrix} 1 & \ln x \\ r & (1+r \ln x) \end{bmatrix} \\ &= x^{2r-1} \neq 0, \quad \text{para todo } x > 0. \end{aligned}$$

- 2.4.** (a) $(x+3)z_1'' + (x+2)z_1' - z_1 = (x+3)2 + (x+2)2x - x^2 = 3x^2 + 6x + 6 \neq 0$
 $(x+3)z_2'' + (x+2)z_2' - z_2 = (x+3)6x + (x+2)3x^2 - x^3 = 2x^3 + 12x^2 + 18x \neq 0$
 $(x+3)z_3'' + (x+2)z_3' - z_3 = (x+3)e^{-x} - (x+2)e^{-x} - e^{-x} = 0$
 Logo, $z_1(x) = x^2$ e $z_2(x) = x^3$ não são soluções da equação e $z_3(x) = e^{-x}$ é solução da equação.
- (b) Seja $y_1(x) = e^{-x}$. Vamos procurar uma segunda solução da equação da forma

$$y(x) = v(x)y_1(x) = v(x)e^{-x}.$$

Então, $v(x)$ é solução da equação diferencial

$$y_1 v'' + (p(x)y_1 + 2y_1')v' = 0,$$

em que $p(x) = \frac{x+2}{x+3}$. Ou seja,

$$e^{-x}v'' + (e^{-x}\frac{x+2}{x+3} - 2e^{-x})v' = 0$$

ou

$$v'' + (\frac{x+2}{x+3} - 2)v' = 0,$$

ou ainda

$$v'' - (\frac{x+4}{x+3})v' = 0.$$

Seja $w(x) = v'(x)$. Então, a equação acima pode ser escrita como

$$w' - (\frac{x+4}{x+3})w = 0.$$

Esta é uma equação de 1a. ordem separável.

$$\frac{w'}{w} = \frac{x+4}{x+3}$$

$$\frac{d}{dx} (\ln |w|) = \frac{x+4}{x+3} = 1 + \frac{1}{x+3}$$

$$\ln |w| = x + \ln(x+3) + \tilde{c}_1$$

$$\ln \left| \frac{w(x)}{x+3} \right| - x = \tilde{c}_1$$

$$w(x) = v'(x) = c_1 e^x (x+3)$$

Resolvendo a equação para $v(x)$:

$$v(x) = c_1 \int e^x (x+3) dx = c_1 (x+2)e^x + c_2$$

Tomando-se $c_2 = 0$ e $c_1 = 1$ obtemos $v(x) = (x+2)e^x$ e uma segunda solução da equação

$$y_2(x) = v(x)y_1(x) = (x+2)e^xe^{-x} = x+2$$

Vamos ver que $y_1(x) = e^{-x}$ e $y_2(x) = x+2$ são soluções fundamentais da equação.

$$W[y_1, y_2](x) = \det \begin{bmatrix} y_1(x) & y_2(x) \\ y_1'(x) & y_2'(x) \end{bmatrix}$$

$$= \det \begin{bmatrix} e^{-x} & x+2 \\ -e^{-x} & 1 \end{bmatrix} = e^{-x}(3+x) \neq 0, \text{ para } x \neq -3$$

(c) Como $y_1(x) = e^{-x}$ e $y_2(x) = x+2$ são soluções fundamentais da equação a solução geral é

$$y(x) = c_1e^{-x} + c_2(x+2),$$

Agora, como $y(1) = 1$, então substituindo $x = 1$ e $y = 1$ na na solução geral $y(x)$, obtemos que $c_1e^{-1} + 3c_2 = 1$. Como $y'(1) = 3$, substituindo-se $x = 1$ e $y' = 3$ na expressão obtida derivando-se $y(x)$:

$$y'(x) = -c_1e^{-x} + c_2$$

obtemos $-c_1e^{-1} + c_2 = 3$. Resolvendo o sistema

$$c_1e^{-1} + 3c_2 = 1, \quad -c_1e^{-1} + c_2 = 3$$

obtemos $c_1 = -2e$ e $c_2 = 1$. Assim, a solução do problema de valor inicial é

$$y(x) = -2e^{-x+1} + x + 2$$

2.5. $y'' + 2y' = 0$ tem solução geral $y(t) = k_1e^{-2t} + k_2$. Logo, $k_1 + k_2 = a$, $k_1 = -b/2$ e $k_2 = a + b/2$ e $y \rightarrow a + b/2$ quando $t \rightarrow +\infty$.

2.6. Se $0 < b < 2$ então as raízes da equação característica são

$$-b/2 \pm i\sqrt{4 - b^2}/2$$

e as soluções são da forma

$$y(t) = c_1 e^{(-b/2)t} \cos \omega t + c_2 e^{(-b/2)t} \operatorname{sen} \omega t,$$

onde $\omega = \sqrt{4 - b^2}/2$. Logo, como $0 < b$, então $y \rightarrow 0$ quando $t \rightarrow +\infty$.

- 2.7.** As raízes da equação característica são ± 2 e a solução geral é $y(t) = c_1 e^{2t} + c_2 e^{-2t}$. Então $c_1 = -c_2 = b/4$ e

$$y(t) = \frac{b}{4}(e^{2t} - e^{-2t}) = 0$$

Como $b \neq 0$, então $e^{2t} = e^{-2t}$, ou seja, $e^{4t} = 1$ e $t = 0$.

- 2.8.** A equação característica tem $1/2$ como única raiz. Assim, a solução geral é da forma

$$y(t) = c_1 e^{t/2} + c_2 t e^{t/2}.$$

$y(0) = 2$ implica que $c_1 = 2$.

$$y'(t) = \frac{c_1}{2} e^{t/2} + c_2 \left(1 + \frac{t}{2}\right) e^{t/2}$$

$y'(0) = b$ implica que $c_1/2 + c_2 = b$. Assim, $c_2 = b - 1$ e a solução do problema de valor inicial é

$$y(t) = e^{(1/2)t}(2 + (b - 1)t).$$

Logo, se $b \geq 1$, $y(t) \rightarrow +\infty$ quando $t \rightarrow +\infty$.

- 2.9.** A equação característica é

$$r^2 + 2b + 1 = 0$$

$$\Delta = 4(b^2 - 1)$$

- Se $|b| > 1$ então as raízes da equação característica são $-b \pm \sqrt{b^2 - 1}$ e as soluções da equação diferencial são da forma

$$y(t) = c_1 e^{(-b - \sqrt{b^2 - 1})t} + c_2 e^{(-b + \sqrt{b^2 - 1})t}.$$

Se $b > 1$, então $y(t) \rightarrow 0$, quando $t \rightarrow +\infty$.

- Se $b = \pm 1$ então a raiz da equação característica é $-b$ e as soluções da equação diferencial são da forma

$$y(t) = c_1 e^{-bt} + c_2 t e^{-bt}.$$

Se $b = 1$, então $y(t) \rightarrow 0$, quando $t \rightarrow +\infty$.

- Se $-1 < b < 1$ então as raízes da equação característica são $-b \pm i\sqrt{1-b^2}$ e as soluções da equação diferencial são da forma

$$y(t) = c_1 e^{-bt} \cos(\sqrt{1-b^2} t) + c_2 e^{-bt} \sin(\sqrt{1-b^2} t).$$

Se $0 < b < 1$, então $y(t) \rightarrow 0$, quando $t \rightarrow +\infty$.

Logo, para $b > 0$, então $y(t) \rightarrow 0$ quando $t \rightarrow +\infty$.

2.10. A equação característica é

$$r^2 + 2r + \alpha = 0$$

$$\Delta = 4 - 4\alpha = 4(1 - \alpha)$$

- (a) Se $\alpha > 1$, então $\Delta < 0$, as raízes da equação característica são $r_{1,2} = -1 \pm i\sqrt{\alpha-1}$ e a solução geral da equação é

$$y(t) = c_1 e^{-t} \cos(\sqrt{\alpha-1} t) + c_2 e^{-t} \sin(\sqrt{\alpha-1} t)$$

- (b) Se $\alpha = 1$, então $\Delta = 0$ e $r = -1$ é a única raiz da equação característica e a solução geral da equação é

$$y(t) = c_1 e^{-t} + c_2 t e^{-t}$$

- (c) Se $\alpha < 1$, então $\Delta > 0$, as raízes da equação característica são $r_{1,2} = -1 \pm \sqrt{1-\alpha}$ e a solução geral da equação é

$$y(t) = c_1 e^{(-1-\sqrt{1-\alpha})t} + c_2 e^{(-1+\sqrt{1-\alpha})t}$$

3. Equações não Homogêneas (página 331)

3.1. (a) A equação característica é

$$r^2 + 5r + 6 = 0.$$

$$\Delta = 25 - 24 = 1$$

As raízes da equação característica são $r_1 = -3$ e $r_2 = -2$ e a solução geral da equação homogênea é

$$y_h(x) = c_1 e^{-3x} + c_2 e^{-2x}$$

$$y_p(x) = (A_0 + A_1 x) e^{-5x},$$

$$y'_p(x) = A_1 e^{-5x} - 5(A_0 + A_1 x) e^{-5x} = (A_1 - 5A_0 - 5A_1 x) e^{-5x},$$

$$y''_p(x) = -5A_1 e^{-5x} - 5(A_1 - 5A_0 - 5A_1 x) e^{-5x} = (-10A_1 + 25A_0 + 25A_1 x) e^{-5x}.$$

Substituindo-se $y_p(x)$, $y'_p(x)$ e $y''_p(x)$ na equação obtemos

$$(-10A_1 + 25A_0 + 25A_1 x) + 5(A_1 - 5A_0 - 5A_1 x) + 6(A_0 + A_1 x) = x$$

Comparando os termos de mesmo grau obtemos o sistema linear

$$\begin{cases} 6A_0 - 5A_1 = 0 \\ 6A_1 = 1 \end{cases}$$

que tem solução $A_0 = 5/36$ e $A_1 = 1/6$. Assim, uma solução particular da equação não homogênea é

$$y_p(x) = \left(\frac{5}{36} + \frac{1}{6}x \right) e^{-5x}$$

e a solução geral da equação não homogênea é

$$y(x) = \left(\frac{5}{36} + \frac{1}{6}x \right) e^{-5x} + c_1 e^{-3x} + c_2 e^{-2x}$$

(b) A equação característica é

$$r^2 - 4r + 6 = 0.$$

$$\Delta = 16 - 24 = -8$$

As raízes da equação característica são $r_{1,2} = 2 \pm i\sqrt{2}$ e a solução geral da equação homogênea é

$$y_h(x) = c_1 e^{2x} \cos(\sqrt{2}x) + c_2 e^{2x} \sin(\sqrt{2}x)$$

$y_p(x) = A_0 + A_1 x$, $y'_p(x) = A_1$, $y''_p(x) = 0$. Substituindo-se $y_p(x)$, $y'_p(x)$ e $y''_p(x)$ na equação obtemos

$$-4A_1 + 6(A_0 + A_1 x) = 3x$$

Comparando os termos de mesmo grau obtemos o sistema linear

$$\begin{cases} 6A_0 - 4A_1 = 0 \\ 6A_1 = 3 \end{cases}$$

que tem solução $A_0 = 1/3$ e $A_1 = 1/2$. Assim, uma solução particular da equação não homogênea é

$$y_p(x) = \frac{1}{3} + \frac{1}{2}x$$

e a solução geral da equação não homogênea é

$$y(x) = \frac{1}{3} + \frac{1}{2}x + c_1 e^{2x} \cos(\sqrt{2}x) + c_2 e^{2x} \sin(\sqrt{2}x)$$

(c) Equação característica: $r^2 + 1 = 0 \Leftrightarrow r = \pm i$.

Solução geral da equação homogênea: $y_h(t) = c_1 \cos t + c_2 \sin t$.

Usando o método de variação dos parâmetros, vamos procurar uma solução particular da forma

$$y_p(t) = u_1(t) \cos t + u_2(t) \sin t \quad (2.65)$$

com a condição de que

$$y'_p(t) = -u_1(t) \sin t + u_2(t) \cos t$$

ou equivalentemente

$$(\cos t)u'_1(t) + (\sin t)u'_2(t) = 0 \quad (2.66)$$

Substituindo-se $y_p(t)$, $y_p'(t)$ e $y_p''(t)$ na equação diferencial obtemos

$$-(\operatorname{sen} t)u_1'(t) + (\cos t)u_2'(t) = \operatorname{cosec} t \quad (2.67)$$

Resolvendo o sistema linear formado por (2.66) e (2.67) obtemos

$$\begin{bmatrix} u_1'(t) \\ u_2'(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 \\ \cotan t \end{bmatrix}$$

Assim,

$$u_1(t) = -\int 1 dt = -t + c_2,$$

$$u_2(t) = \int \frac{\cos t}{\operatorname{sen} t} dt = \ln |\operatorname{sen} t| + c_1.$$

Tomando $c_1 = 0$ e $c_2 = 0$ e substituindo-se em (2.65) obtemos a solução particular

$$y_p(t) = (\ln |\operatorname{sen} t|) \operatorname{sen} t - t \cos t.$$

Portanto, a solução geral da equação é

$$y(t) = (\ln |\operatorname{sen} t|) \operatorname{sen} t - t \cos t + c_1 \cos t + c_2 \operatorname{sen} t.$$

(d) Equação característica: $r^2 - 1 = 0 \Leftrightarrow r = \pm 1$.

Solução geral da equação homogênea: $y_h(t) = c_1 e^t + c_2 e^{-t}$.

Usando o método de variação dos parâmetros, vamos procurar uma solução particular da forma

$$y_p(t) = u_1(t)e^t + u_2(t)e^{-t} \quad (2.68)$$

com a condição de que

$$y_p'(t) = u_1(t)e^t - u_2(t)e^{-t}$$

ou equivalentemente

$$e^t u_1'(t) + e^{-t} u_2'(t) = 0 \quad (2.69)$$

Substituindo-se $y_p(t)$, $y_p'(t)$ e $y_p''(t)$ na equação diferencial obtemos

$$e^t u_1'(t) - e^{-t} u_2'(t) = (1 + e^{-t})^{-2} \quad (2.70)$$

Resolvendo o sistema linear formado por (2.69) e (2.70) obtemos

$$\begin{bmatrix} u_1'(t) \\ u_2'(t) \end{bmatrix} = -\frac{1}{2} \begin{bmatrix} -\frac{e^{-t}}{(1+e^{-t})^2} \\ \frac{e^t}{(1+e^{-t})^2} \end{bmatrix}$$

Assim,

$$u_1(t) = \int \frac{e^{-t}}{2(1+e^{-t})^2} dt = \frac{1}{2(1+e^{-t})} + c_1,$$

$$u_2(t) = -\int \frac{e^t}{2(1+e^{-t})^2} dt = -\int \frac{e^{3t}}{2(e^t+1)^2} dt$$

Fazendo $u = e^t + 1$, então

$$\begin{aligned} u_2(t) &= -\frac{1}{2} \int \frac{(1-u)^2}{u^2} du \\ &= -\frac{1}{2} \int \left(\frac{1}{u^2} - \frac{2}{u} + 1 \right) du \\ &= \frac{1}{2(1+e^t)} + \ln(1+e^t) - \frac{1+e^t}{2} + c_2 \end{aligned}$$

Tomando $c_1 = 0$ e $c_2 = 0$ e substituindo-se em (2.68) obtemos a solução particular

$$\begin{aligned} y_p(t) &= \frac{e^t}{2(1+e^{-t})} + \frac{e^{-t}}{2(1+e^t)} \\ &\quad + e^{-t} \ln(1+e^t) - \frac{1+e^{-t}}{2}. \end{aligned}$$

Portanto, a solução geral da equação é

$$y(t) = \frac{e^t}{2(1+e^{-t})} + \frac{e^{-t}}{2(1+e^t)} + e^{-t} \ln(1+e^t) - \frac{1+e^{-t}}{2} + c_1 e^t + c_2 e^{-t}.$$

- (e) Eq. característica: $r^2 + 4 = 0 \Leftrightarrow r = \pm 2i$.

Sol. geral da eq. homog.: $y_h(t) = c_1 \cos(2t) + c_2 \sin(2t)$

Vamos usar o princípio da Superposição para equações não homogêneas: $y_p^{(1)}(t) = t[A \cos(2t) + B \sin(2t)]$ é uma solução da equação $y'' + 4y = 2 \sin(2t)$ e

$y_p^{(2)}(t) = Ct + D$ é uma solução da equação $y'' + 4y = t$. Logo, $y_p(t) = y_p^{(1)}(t) + y_p^{(2)}(t)$ é solução da equação $y'' + 4y = 2 \sin(2t) + t$.

Vamos encontrar uma solução particular de $y'' + 4y = 2 \sin(2t)$:

$$y_p^{(1)}(t) = t[A \cos(2t) + B \sin(2t)]$$

$$y_p'^{(1)}(t) = A \cos(2t) + B \sin(2t) + t[-2A \sin(2t) + 2B \cos(2t)]$$

$$y_p''^{(1)}(t) = (-4At + 4B) \cos(2t) + (-4Bt - 4A) \sin(2t)$$

Substituindo-se na equação diferencial obtemos

$$(-4At + 4B) \cos(2t) + (-4Bt - 4A) \sin(2t) + 4t[A \cos(2t) + B \sin(2t)] = 2 \sin(2t)$$

$$[-4At + 4B + 4At] \cos(2t) + [-4Bt - 4A + 4Bt] \sin(2t) = 2 \sin(2t)$$

$$4B \cos(2t) - 4A \sin(2t) = 2 \sin(2t)$$

Substituindo-se $t = 0$ e $t = \pi/4$ obtemos

$$\begin{cases} 4B &= 0 \\ -4A &= 2 \end{cases}$$

Logo, $A = -1/2, B = 0$ e $y_p^{(1)}(t) = \frac{1}{2}t \cos(2t)$.

Vamos encontrar uma solução particular de $y'' + 4y = t$:

$$y_p^{(2)}(t) = Ct + D,$$

$$y_p'^{(2)}(t) = D,$$

$$y_p''^{(2)}(t) = 0.$$

Substituindo-se na equação diferencial obtemos

$$4Ct + 4D = t$$

Substituindo-se $t = 0$, obtemos $4D = 0$. Derivando-se de substituindo-se $t = 0$ obtemos $4C = 1$.

$$\text{Logo, } D = 0, C = 1/4 \text{ e } y_p^{(2)}(t) = \frac{1}{4}t.$$

$$\text{Sol. particular } y_p(t) = y_p^{(1)}(t) + y_p^{(2)}(t) = -\frac{t}{2} \cos(2t) + \frac{1}{4}t.$$

Assim, a solução geral da equação é

$$y(t) = c_1 \cos(2t) + c_2 \sin(2t) - \frac{t}{2} \cos(2t) + \frac{1}{4}t$$

(f) Eq. característica: $r^2 + 2 = 0 \Leftrightarrow r = \pm\sqrt{2}i$.

$$\text{Sol. geral da eq. homog.: } y_h(t) = c_1 \cos(\sqrt{2}t) + c_2 \sin(\sqrt{2}t)$$

$$\text{Sol. particular da forma } y_p(t) = Ae^t + B.$$

$$y_p'(t) = Ae^t$$

$$y_p''(t) = Ae^t$$

Substituindo-se na equação

$$Ae^t + 2(Ae^t + B) = e^t + 2$$

$$3Ae^t + 2B = e^t + 2$$

$$\begin{cases} 3A &= 1 \\ 2B &= 2 \end{cases}$$

Obtemos $A = 1/3, B = 1$. Assim, a solução geral da equação é

$$y(t) = c_1 \cos(\sqrt{2}t) + c_2 \sin(\sqrt{2}t) + \frac{1}{3}e^t + 1$$

3.2. (a) Solução geral da equação homogênea:

$$y_h(t) = c_1 e^{-2t} + c_2 e^t$$

$$y_p(t) = A_2 t^2 + A_1 t + A_0$$

$$y_p'' + y_p' - 2y_p = (-2A_2)t^2 + (2A_2 - 2A_1)t + (2A_2 + A_1 - 2A_0)$$

$$\begin{cases} -2A_2 & = & 1 \\ 2A_2 - 2A_1 & = & 0 \\ 2A_2 + A_1 - 2A_0 & = & 3 \end{cases}$$

$$\begin{bmatrix} A_2 \\ A_1 \\ A_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} \\ -\frac{9}{4} \end{bmatrix}$$

$$y_p(t) = -9/4 - 1/2 t - 1/2 t^2$$

Solução geral:

$$y(t) = c_1 e^{-2t} + c_2 e^t - 9/4 - 1/2 t - 1/2 t^2$$

Solução do PVI

$$y(t) = 7/12 e^{-2t} + 5/3 e^t - 9/4 - 1/2 t - 1/2 t^2$$

(b) Solução geral da equação homogênea:

$$y_h(t) = c_1 e^{-t} + c_2 t e^{-t}$$

Solução particular da equação não homogênea:

$$y_p(t) = A \cos 2t + B \sin 2t$$

Substituindo-se na equação

$$y_p'' + 2y_p' + y_p = (-3A + 4B) \cos 2t + (-4A - 3B) \sin 2t = 3 \sin 2t$$

$$\begin{cases} -3A + 4B = 0 \\ -4A - 3B = 3 \end{cases}$$

$$\begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{12}{25} \\ \frac{9}{25} \end{bmatrix}$$

$$y_p(t) = -\frac{12}{25} \cos 2t - \frac{9}{25} \sin 2t$$

Solução geral:

$$y(t) = c_1 e^{-t} + c_2 t e^{-t} - \frac{12}{25} \cos 2t - \frac{9}{25} \sin 2t$$

Derivada da solução geral:

$$y'(t) = -c_1 e^{-t} + c_2 (1-t)e^{-t} + \frac{24}{25} \sin 2t - \frac{18}{25} \cos 2t$$

Substituindo-se $t = 0$, $y = 0$, $y' = 0$:

$$c_1 = \frac{12}{25}, \quad c_2 = \frac{6}{5}$$

Solução do PVI:

$$y(t) = \frac{12}{25} e^{-t} + \frac{6}{5} t e^{-t} - \frac{12}{25} \cos 2t - \frac{9}{25} \sin 2t$$

(c) Solução geral da equação homogênea:

$$y_h(t) = c_1 e^{2t} + c_2 e^{2t} t$$

$$y_p(t) = 1/3 e^{-t}$$

Solução geral:

$$y(t) = c_1 e^{2t} + c_2 e^{2t} t + 1/3 e^{-t}$$

Solução do PVI

$$y(t) = -1/3 e^{2t} + e^{2t} t + 1/3 e^{-t}$$

(d) Solução geral da equação homogênea:

$$y_h(t) = c_1 e^{-t/2} \cos(t/2) + c_2 e^{-t/2} \sin(t/2)$$

Solução particular:

$$y_p(t) = A_2 t^2 + A_1 t + A_0$$

Substituindo-se na equação:

$$2y_p'' + 2y_p' + y_p = (A_2)t^2 + (4A_2 + A_1)t + (4A_2 + 2A_1 + A_0) = t^2$$

$$\begin{cases} A_2 & = 1 \\ 4A_2 + A_1 & = 0 \\ 4A_2 + 2A_1 + A_0 & = 0 \end{cases}$$

$$\begin{bmatrix} A_2 \\ A_1 \\ A_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ -4 \\ 4 \end{bmatrix}$$

$$y_p(t) = t^2 - 4t + 4 = (t - 2)^2$$

Solução geral:

$$y(t) = c_1 e^{-t/2} \cos(t/2) + c_2 e^{-t/2} \sin(t/2) + (t - 2)^2$$

Derivada da solução geral:

$$y'(t) = c_1 e^{-t/2} (-(1/2) \cos(t/2) - (1/2) \sin(t/2)) + c_2 e^{-t/2} (-(1/2) \sin(t/2) + (1/2) \cos(t/2)) + 2(t - 2)$$

Substituindo-se $t = 0, y = 0, y' = 0$:

$$c_1 = -4, \quad c_2 = 4$$

Solução do PVI:

$$y(t) = -4e^{-t/2} \cos(t/2) + 4e^{-t/2} \sin(t/2) + (t - 2)^2$$

3.3. (a) A equação característica é

$$r^2 + 2r + \alpha = 0$$

$$\Delta = 4 - 4\alpha = 4(1 - \alpha)$$

- i. Se $\alpha > 1$, então $\Delta < 0$, as raízes da equação característica são $r_{1,2} = -1 \pm i\sqrt{\alpha - 1}$ e a solução geral da equação é

$$y(t) = c_1 e^{-t} \cos(\sqrt{\alpha - 1} t) + c_2 e^{-t} \sin(\sqrt{\alpha - 1} t)$$

- ii. Se $\alpha = 1$, então $\Delta = 0$ e $r = -1$ é a única raiz da equação característica e a solução geral da equação é

$$y(t) = c_1 e^{-t} + c_2 t e^{-t}$$

- iii. Se $\alpha < 1$, então $\Delta > 0$, as raízes da equação característica são $r_{1,2} = -1 \pm \sqrt{1 - \alpha}$ e a solução geral da equação é

$$y(t) = c_1 e^{(-1 - \sqrt{1 - \alpha})t} + c_2 e^{(-1 + \sqrt{1 - \alpha})t}$$

- (b) $y_p(t) = t[(A_0 + A_1 t)e^{-t} \sin(\sqrt{\alpha - 1} t) + (B_0 + B_1 t)e^{-t} \cos(\sqrt{\alpha - 1} t)]$, se $\alpha > 1$.

4. Oscilações Livres (página 350)

- 4.1. (a) Equação característica é $r^2 + 3 = 0$, que tem como raízes $r = \pm\sqrt{3}i$. Logo, a solução geral da equação diferencial é:

$$u(t) = c_1 \cos(\sqrt{3} t) + c_2 \sin(\sqrt{3} t).$$

Para resolver o PVI precisamos calcular a derivada da solução geral:

$$u'(t) = -c_1 \sqrt{3} \sin(\sqrt{3} t) + c_2 \sqrt{3} \cos(\sqrt{3} t)$$

Substituindo-se $t = 0$, $u = 1$, $u' = 3$ obtemos:

$$c_1 = 1, \quad c_2 = \sqrt{3}.$$

A solução do PVI é portanto

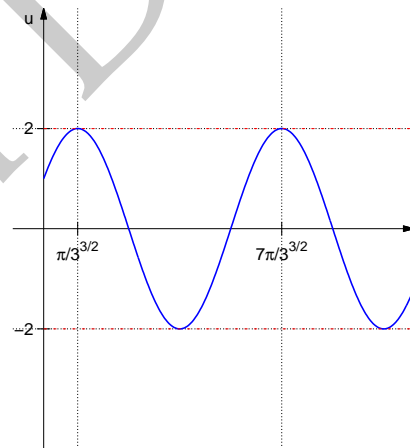
$$u(t) = -\cos(\sqrt{3}t) + \sqrt{3}\sin(\sqrt{3}t).$$

Marcando o ponto $(c_1, c_2) = (1, \sqrt{3})$ no plano obtemos que $R = 2$ e $\delta = \frac{\pi}{3}$, ou seja,

$$u(t) = 2\cos\left(\sqrt{3}t - \frac{\pi}{3}\right)$$

A amplitude é igual a 2, a frequência é igual a $\sqrt{3}$, a fase é igual a $\frac{\pi}{3}$ e o período é igual a $2\pi/\sqrt{3}$.

(b)



4.2. (a) Equação característica: $2r^2 + 3 = 0$
Raízes: $r = \pm\sqrt{3/2}i$

Solução geral: $u(t) = c_1 \cos\left(\sqrt{\frac{3}{2}} t\right) + c_2 \sin\left(\sqrt{\frac{3}{2}} t\right)$

Derivada da solução geral:

$$u'(t) = -c_1 \sqrt{3/2} \sin\left(\sqrt{3/2} t\right) + c_2 \sqrt{3/2} \cos\left(\sqrt{3/2} t\right)$$

Substituindo-se $t = 0$, $u = 1$, $u' = 0$:

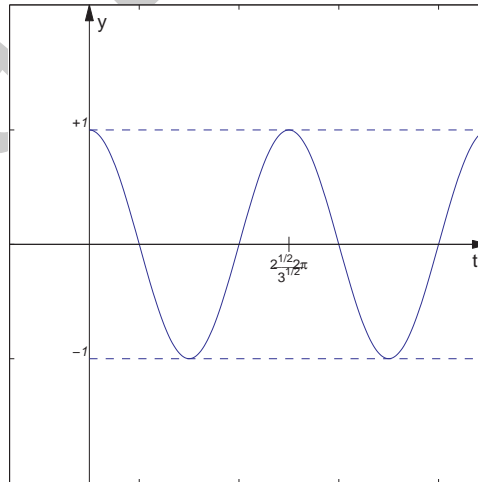
$$c_1 = 1, \quad c_2 = 0$$

Solução do PVI:

$$u(t) = \cos\left(\sqrt{\frac{3}{2}} t\right)$$

A amplitude é igual a 1, a frequência é igual a $\sqrt{\frac{3}{2}}$, a fase é igual a zero e o período é igual a $2\sqrt{2}\pi/\sqrt{3}$.

(b)



4.3.

$$2u'' + u' + \frac{1}{2}u = 0 \quad \Delta = 1 - 4 = -3$$

$$r_{1,2} = -\frac{1}{4} \pm i\frac{\sqrt{3}}{4}$$

$$u(t) = c_1 e^{-t/4} \cos\left(\frac{\sqrt{3}}{4}t\right) + c_2 e^{-t/4} \operatorname{sen}\left(\frac{\sqrt{3}}{4}t\right)$$

$$u'(t) = c_1 \left(-\frac{1}{4}e^{-t/4} \cos\left(\frac{\sqrt{3}}{4}t\right) - \frac{\sqrt{3}}{4}e^{-t/4} \operatorname{sen}\left(\frac{\sqrt{3}}{4}t\right)\right) \\ + c_2 \left(-\frac{1}{4}e^{-t/4} \operatorname{sen}\left(\frac{\sqrt{3}}{4}t\right) + \frac{\sqrt{3}}{4}e^{-t/4} \cos\left(\frac{\sqrt{3}}{4}t\right)\right)$$

$$u(0) = u_0 = c_1$$

$$u'(0) = u'_0 = -\frac{c_1}{4} + \frac{\sqrt{3}c_2}{4} \Rightarrow c_2 = \frac{4u'_0 + u_0}{\sqrt{3}}$$

Assim, a solução do problema de valor inicial é

$$u(t) = u_0 e^{-t/4} \cos\left(\frac{\sqrt{3}}{4}t\right) + \frac{4u'_0 + u_0}{\sqrt{3}} e^{-t/4} \operatorname{sen}\left(\frac{\sqrt{3}}{4}t\right)$$

4.4. A constante da mola é

$$k = \frac{mg}{L} = \frac{100 \cdot 10^3}{10} = 10^4$$

A equação diferencial que descreve o movimento é

$$10^2 u'' + 10^4 u = 0$$

Equação característica:

$$r^2 + 100 = 0 \Leftrightarrow r = \pm 10i$$

Solução geral:

$$u(t) = c_1 \cos(10t) + c_2 \operatorname{sen}(10t)$$

A frequência natural é

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{10^4}{100}} = 10.$$

O período é

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = \frac{2\pi}{10} \text{ segundos}$$

(a) A posição em função do tempo é a solução do problema de valor inicial

$$\begin{cases} u'' + 100u = 0, \\ u(0) = 0, \\ u'(0) = -4. \end{cases}$$

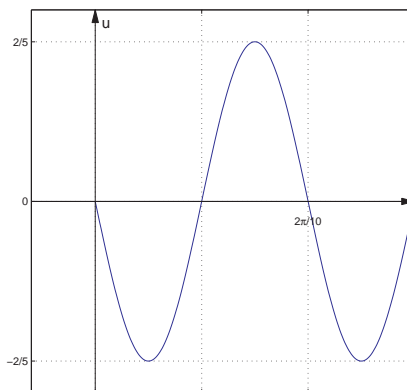
$$u'(t) = -10c_1 \operatorname{sen}(10t) + 10c_2 \cos(10t)$$

$$\begin{cases} u(0) = 0 = c_1, \\ u'(0) = -4 = 10c_2. \end{cases}$$

Assim, a solução do problema de valor inicial é

$$u(t) = -\frac{2}{5} \operatorname{sen}(10t)$$

A amplitude é igual a $2/5$.



(b) A posição em função do tempo é a solução do problema de valor inicial

$$\begin{cases} u'' + 100u = 0, \\ u(0) = 1, \\ u'(0) = 10. \end{cases}$$

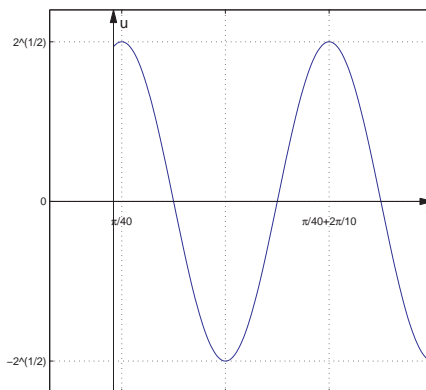
$$u'(t) = -10c_1 \sin(10t) + 10c_2 \cos(10t)$$

$$\begin{cases} u(0) = 1 = c_1, \\ u'(0) = 10 = 10c_2. \end{cases}$$

Logo, $c_1 = 1$ e $c_2 = 1$. Marcando o ponto $(c_1, c_2) = (1, 1)$ no plano obtemos que $R = \sqrt{c_1^2 + c_2^2} = \sqrt{2}$ e $\delta = \frac{\pi}{4}$ e a solução do problema de valor inicial é

$$u(t) = \cos(10t) + \sin(10t) = \sqrt{2} \cos(10t - \pi/4)$$

A amplitude é igual a $\sqrt{2}$.



(c) A posição em função do tempo é a solução do problema de valor inicial

$$\begin{cases} u'' + 100u = 0, \\ u(0) = 2, \\ u'(0) = 0. \end{cases}$$

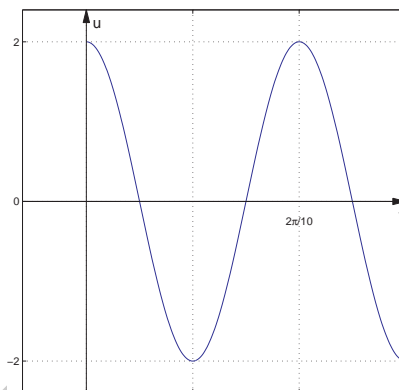
$$u'(t) = -10c_1 \sin(10t) + 10c_2 \cos(10t)$$

$$\begin{cases} u(0) = 2 = c_1, \\ u'(0) = 0 = 10c_2. \end{cases}$$

Assim, a solução do problema de valor inicial é

$$u(t) = 2 \cos(10t)$$

A amplitude é igual a 2.



4.5. A constante da mola é

$$k = \frac{mg}{L} = \frac{100 \cdot 10^3}{10} = 10^4$$

A equação diferencial que descreve o movimento é

$$10^2 u'' + \gamma u' + 10^4 u = 0$$

Equação característica:

$$10^2 r^2 + \gamma r + 10^4 = 0$$

$$\Delta = \gamma^2 - 4 \cdot 10^6$$

- (a)
- Se $\gamma > 2 \cdot 10^3$ o sistema é super-amortecido.
 - Se $\gamma = 2 \cdot 10^3$ o o sistema tem um amortecimento crítico.
 - Se $\gamma < 2 \cdot 10^3$ o sistema é sub-amortecido

(b) Neste caso a constante de amortecimento é dada por

$$\gamma = \frac{F_r}{v} = \frac{10^4}{10} = 10^3$$

A equação diferencial que descreve o movimento é

$$10^2 u'' + 10^3 u' + 10^4 u = 0$$

Equação característica:

$$10^2 r^2 + 10^3 r + 10^4 = 0 \quad \Leftrightarrow \quad r = -5 \pm 5\sqrt{3}i$$

Solução geral:

$$u(t) = c_1 e^{-5t} \cos(5\sqrt{3}t) + c_2 e^{-5t} \operatorname{sen}(5\sqrt{3}t)$$

A posição em função do tempo é a solução do problema de valor inicial

$$\begin{cases} u'' + 10u' + 100u = 0, \\ u(0) = 2, \\ u'(0) = 0. \end{cases}$$

$$\begin{aligned} u'(t) &= e^{-5t} ((5\sqrt{3}c_2 - 5c_1) \cos(5\sqrt{3}t) + \\ &\quad + (-5\sqrt{3} - 5c_2) \operatorname{sen}(5\sqrt{3}t)) \end{aligned}$$

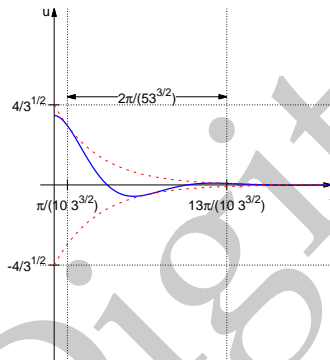
$$\begin{cases} u(0) = 2 = c_1, \\ u'(0) = 0 = 5\sqrt{3}c_2 - 5c_1. \end{cases}$$

Logo, $c_1 = 2$ e $c_2 = 2/\sqrt{3}$. Marcando o ponto $(c_1, c_2) = (2, 2/\sqrt{3})$ no plano obtemos que $R =$

$\sqrt{c_1^2 + c_2^2} = \frac{4}{\sqrt{3}}$ e $\delta = \frac{\pi}{6}$ e a solução do problema de valor inicial é

$$\begin{aligned} u(t) &= 2e^{-5t} \cos(5\sqrt{3}t) + \frac{2}{\sqrt{3}} e^{-5t} \operatorname{sen}(5\sqrt{3}t) \\ &= \frac{4}{\sqrt{3}} e^{-5t} \cos(5\sqrt{3}t - \pi/6) \end{aligned}$$

A quase frequência é igual a $5\sqrt{3}$ e o quase período é igual a $2\pi/5\sqrt{3}$.



4.6. (a) Com a aproximação $\sin \theta \approx \theta$ a equação diferencial se torna

$$\theta'' + \frac{g}{l}\theta = 0,$$

que tem solução geral

$$\theta(t) = c_1 \cos\left(\sqrt{\frac{g}{l}} t\right) + c_2 \sin\left(\sqrt{\frac{g}{l}} t\right)$$

$$\theta_0 = \theta(0) = c_1$$

$$0 = \theta'(0) = c_2 \sqrt{\frac{g}{l}}$$

Logo, a solução do PVI é

$$\theta(t) = \theta_0 \cos\left(\sqrt{\frac{g}{l}} t\right)$$

(b) A frequência é $\sqrt{\frac{g}{l}}$, o período é $2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ e a amplitude é θ_0 .

5. Oscilações Forçadas (página 368)

5.1.

$$2u'' + 3u = 3 \cos(3t)$$

$$2r^2 + 3 = 0 \quad r = \pm i\sqrt{3/2}$$

Solução da equação homogênea

$$u(t) = c_1 \cos(\sqrt{3/2}t) + c_2 \sin(\sqrt{3/2}t)$$

$$u_p(t) = A \cos(3t) + B \sin(3t)$$

$$u'_p(t) = -3A \sin(3t) + 3B \cos(3t)$$

$$u''_p(t) = -9A \cos(3t) - 9B \sin(3t)$$

Substituindo-se $u_p(t)$, $u'_p(t)$ e $u''_p(t)$ na equação obtemos

$$-15A \cos(3t) - 15B \sin(3t) = 3 \cos(3t)$$

$$\begin{cases} -15A & = 3 \\ -15B & = 0 \end{cases}$$

que tem solução $A = -1/5$ e $B = 0$. Assim, uma solução particular da equação não homogênea é

$$u_p(t) = -\frac{1}{5} \cos(3t)$$

e a solução geral da equação não homogênea é

$$u(t) = -\frac{1}{5} \cos(3t) + c_1 \cos(\sqrt{3/2}t) + c_2 \sin(\sqrt{3/2}t).$$

$$u'(t) = \frac{3}{5} \sin(3t) - \sqrt{3/2}c_1 \sin(\sqrt{3/2}t) + \sqrt{3/2}c_2 \cos(\sqrt{3/2}t).$$

$$u(0) = u_0 = -\frac{1}{5} + c_1 \Rightarrow c_1 = u_0 + \frac{1}{5}$$

$$u'(0) = u'_0 = \sqrt{3/2}c_2 \Rightarrow c_2 = \sqrt{2/3}u'_0$$

Assim, a solução do problema de valor inicial é

$$u(t) = -\frac{1}{5} \cos(3t) + (u_0 + \frac{1}{5}) \cos(\sqrt{3/2}t) + \sqrt{2/3}u'_0 \sin(\sqrt{3/2}t).$$

5.2.

$$\begin{cases} 10^2 u'' + 10^4 u = 9600 \cos(6t), \\ u(0) = 0, u'(0) = 0 \end{cases}$$

A solução geral da equação homogênea é

$$u(t) = c_1 \cos(10t) + c_2 \sin(10t)$$

A solução particular pelo método dos coeficientes a determinar é da forma

$$u_p(t) = A_0 \cos(6t) + B_0 \sin(6t)$$

Pelo método das constantes a determinar encontramos $A_0 = 3/2$ e $B_0 = 0$.

A solução geral da equação é

$$u(t) = c_1 \cos(10t) + c_2 \sin(10t) + \frac{3}{2} \cos(6t)$$

Derivando e substituindo-se $t = 0$, $u = 0$ e $u' = 0$ obtemos que

$$c_1 = -3/2, \quad c_2 = 0$$

Assim, a solução do problema de valor inicial é

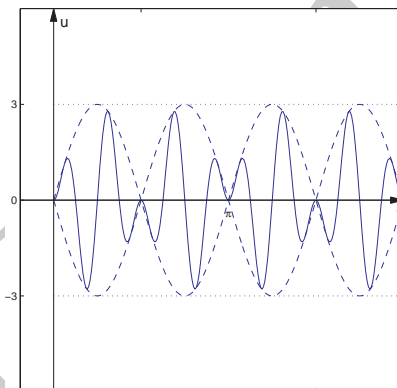
$$u(t) = \frac{3}{2} (\cos(6t) - \cos(10t)).$$

Como

$$\cos(A - B) - \cos(A + B) = 2 \operatorname{sen} A \operatorname{sen} B$$

então

$$u(t) = 3 \operatorname{sen}(2t) \operatorname{sen}(8t)$$



5.3.

$$\begin{cases} 10^2 u'' + 10^4 u = 10^3 \cos(10t), \\ u(0) = 0, u'(0) = 0 \end{cases}$$

A solução geral da equação homogênea é

$$u(t) = c_1 \cos(10t) + c_2 \operatorname{sen}(10t)$$

A solução particular pelo método dos coeficientes a determinar é da forma

$$u_p(t) = t(A_0 \cos(10t) + B_0 \operatorname{sen}(10t))$$

Pelo método das constantes a determinar encontramos $A_0 = 0$ e $B_0 = 1/2$.

A solução geral da equação é

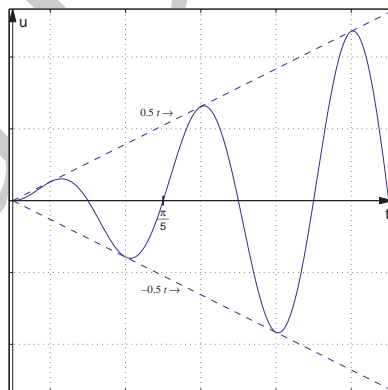
$$u(t) = c_1 \cos(10t) + c_2 \sin(10t) + \frac{t}{2} \sin(10t)$$

Derivando e substituindo-se $t = 0$, $u = 0$ e $u' = 0$ obtemos que

$$c_1 = 0, \quad c_2 = 0$$

Assim, a solução do problema de valor inicial é

$$u(t) = \frac{t}{2} \sin(10t)$$



5.4. Neste caso a constante de amortecimento é dada por

$$\gamma = \frac{F_r}{v} = \frac{4200}{1} = 4200$$

A equação diferencial que descreve o movimento é

$$10^2 u'' + 4200 u' + 10^4 u = 26000 \cos(6t)$$

A solução estacionária é a solução particular da equação não homogênea

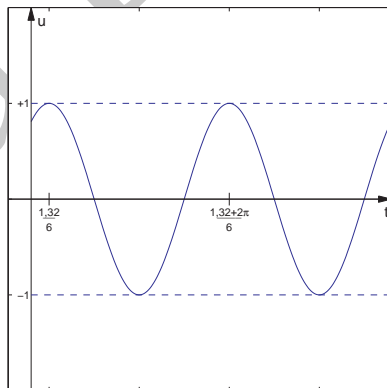
$$u_p(t) = A_0 \cos(6t) + B_0 \sin(6t)$$

Pelo método das constantes a determinar encontramos

$$A_0 = 16/65, \quad B_0 = 63/65,$$

Marcando o ponto $(A_0, B_0) = (16/65, 63/65)$ no plano obtemos que $R = \sqrt{A_0^2 + B_0^2} = 1$ e $\delta = 1,32$. Logo,

$$u_p(t) = \frac{16}{65} \cos(6t) + \frac{63}{65} \sin(6t) = \cos(6t - 1,32)$$



5.5. (a) A solução da equação homogênea correspondente é

$$u(t) = c_1 e^{-\frac{t}{2}} \cos \frac{\sqrt{7}t}{2} + c_2 e^{-\frac{t}{2}} \sin \frac{\sqrt{7}t}{2}.$$

Então, a solução geral desta equação é

$$u(t) = c_1 e^{-\frac{t}{2}} \cos \frac{\sqrt{7}t}{2} + c_2 e^{-\frac{t}{2}} \sin \frac{\sqrt{7}t}{2} + u_p(t)$$

em que $u_p(t)$ é uma solução particular. Pelo método dos coeficientes a determinar

$$u_p(t) = A \cos(\omega t) + B \sin(\omega t),$$

$$u_p'(t) = \omega B \cos(\omega t) - \omega A \sin(\omega t),$$

$$u_p''(t) = -\omega^2 B \sin(\omega t) - \omega^2 A \cos(\omega t).$$

Substituindo-se $u_p(t)$, $u_p'(t)$ e $u_p''(t)$ na equação diferencial obtemos

$$\begin{aligned} & (\omega B - \omega^2 A + 2A) \cos \omega t \\ & - (\omega^2 B - 2B + \omega A) \sin \omega t = \cos \omega t \end{aligned}$$

Substituindo-se $t = 0$ e $t = \frac{\pi}{2\omega}$ obtemos o sistema

$$\begin{cases} (2 - \omega^2) A + \omega B = 1 \\ -\omega A + (2 - \omega^2) B = 0. \end{cases}$$

Resolvendo este sistema encontramos

$$A = \frac{2 - \omega^2}{\omega^4 - 3\omega^2 + 4}, \quad B = \frac{\omega}{\omega^4 - 3\omega^2 + 4}.$$

Logo, a solução geral da equação diferencial é

$$\begin{aligned} u(t) = c_1 e^{-\frac{t}{2}} \cos \frac{\sqrt{7}t}{2} + c_2 e^{-\frac{t}{2}} \sin \frac{\sqrt{7}t}{2} \\ + \frac{(2 - \omega^2)}{\omega^4 - 3\omega^2 + 4} \cos(\omega t) + \frac{\omega}{\omega^4 - 3\omega^2 + 4} \sin(\omega t). \end{aligned}$$

(b) A solução estacionária é a solução particular da equação diferencial que é dada por

$$u_p(t) = \frac{(2 - \omega^2)}{\omega^4 - 3\omega^2 + 4} \cos(\omega t) + \frac{\omega}{\omega^4 - 3\omega^2 + 4} \sin(\omega t).$$

(c) A amplitude é

$$R = R(\omega) = \sqrt{A^2 + B^2} = \frac{1}{(\omega^4 - 3\omega^2 + 4)^{1/2}}$$

(d) A amplitude máxima ocorre se

$$R'(\omega) = 0 \Leftrightarrow \frac{d}{d\omega} (\omega^4 - 3\omega^2 + 4) = 0 \Leftrightarrow 4\omega^3 - 6\omega = 0 \Leftrightarrow \omega = \sqrt{\frac{3}{2}}.$$

5.6. A solução geral da equação homogênea é dada por

$$u(t) = c_1 \cos(\omega_0 t) + c_2 \sin(\omega_0 t),$$

em que $\omega_0 = \sqrt{k/m}$.

(a) Vamos procurar uma solução particular da forma

$$u_p(t) = A \cos(\omega t) + B \sin(\omega t).$$

Derivando-se:

$$u_p'(t) = B\omega \cos(\omega t) - A\omega \sin(\omega t)$$

$$u_p''(t) = -B\omega^2 \sin(\omega t) - A\omega^2 \cos(\omega t).$$

Substituindo-se na equação diferencial:

$$(k - m\omega^2) (\sin(\omega t) B + \cos(\omega t) A) = F_0 \cos(\omega t)$$

Comparando-se os termos em cosseno e em seno obtemos

$$\begin{cases} (k - m\omega^2) A = F_0 \\ (k - m\omega^2) B = 0 \end{cases}$$

Assim,

$$A = \frac{F_0}{k - m \omega^2} = \frac{F_0}{m(\omega_0^2 - \omega^2)}, B = 0.$$

Logo, a solução geral é

$$u(t) = c_1 \cos(\omega_0 t) + c_2 \sin(\omega_0 t) + \frac{F_0}{m(\omega_0^2 - \omega^2)} \cos(\omega t).$$

(b) Dividindo a equação diferencial por m e substituindo-se $k/m = \omega_0^2$ obtemos:

$$u'' + \omega_0^2 u = \frac{F_0}{m} \cos(\omega_0 t)$$

Vamos procurar uma solução particular da forma

$$u_p(t) = t [A \cos(\omega_0 t) + B \sin(\omega_0 t)].$$

Derivando-se:

$$u'_p(t) =$$

$$(\omega_0 t B + A) \cos(\omega_0 t) + (B - \omega_0 t A) \sin(\omega_0 t)$$

$$u''_p(t) =$$

$$-\omega_0 (\omega_0 t B + 2A) (\sin(\omega_0 t) - (2B - \omega_0 t A)) \cos(\omega_0 t).$$

Substituindo-se na equação diferencial $u'' + \omega_0^2 u = \frac{F_0}{m} \cos(\omega_0 t)$:

$$2\omega_0 (\cos(\omega_0 t) B - \sin(\omega_0 t) A) = F_0 \cos(\omega_0 t)$$

Comparando-se os termos em cosseno e em seno obtemos

$$\begin{cases} 2\omega_0 B = F_0/m \\ -2\omega_0 A = 0 \end{cases}$$

Assim,

$$A = 0, B = \frac{F_0}{2m\omega_0}.$$

Logo, a solução geral é

$$u(t) = c_1 \cos(\omega_0 t) + c_2 \sin(\omega_0 t) + \frac{F_0}{2m\omega_0} t \sin(\omega_0 t).$$

5.7. (a)

$$u(t) = \frac{F_0 \cos(\omega t)}{(\omega_0^2 - \omega^2) m} + c_2 \sin(\omega_0 t) + c_1 \cos(\omega_0 t)$$

$$u'(t) = -\frac{F_0 \omega \sin(\omega t)}{(\omega_0^2 - \omega^2) m} - \omega_0 c_1 \sin(\omega_0 t) + \omega_0 c_2 \cos(\omega_0 t)$$

Substituindo-se $t = 0$, $u = 0$ e $u' = 0$ obtemos que

$$\frac{F_0}{(\omega_0^2 - \omega^2) m} + c_1 = 0$$

$$\omega_0 c_2 = 0$$

Logo,

$$c_1 = -\frac{F_0}{m(\omega_0^2 - \omega^2)}, \quad c_2 = 0$$

Assim, a solução do problema de valor inicial é

$$u(t) = \frac{F_0}{m(\omega_0^2 - \omega^2)} (\cos(\omega t) - \cos(\omega_0 t)).$$

(b)

$$u(t) = c_1 \cos(\omega_0 t) + c_2 \sin(\omega_0 t) + \frac{F_0}{2m\omega_0} t \sin(\omega_0 t)$$

$$u'(t) = \frac{F_0 \sin(\omega_0 t)}{2\omega_0 m} - \omega_0 c_1 \sin(\omega_0 t) + \frac{F_0 t \cos(\omega_0 t)}{2m} + \omega_0 c_2 \cos(\omega_0 t).$$

Derivando-se e substituindo-se $t = 0$, $u = 0$ e $u' = 0$ obtemos que

$$c_1 = 0, \quad c_2 = 0$$

Assim, a solução do problema de valor inicial é

$$u(t) = \frac{F_0}{2m\omega_0} t \operatorname{sen}(\omega_0 t).$$

- 5.8. (a) Seja $u(t) = c_1 u_1(t) + c_2 u_2(t)$ a solução da equação homogênea correspondente. Então, a solução geral desta equação é

$$u(t) = c_1 u_1(t) + c_2 u_2(t) + u_p(t)$$

em que $u_p(t)$ é uma solução particular. Pelo método dos coeficientes a determinar

$$u_p(t) = A \cos(\omega t) + B \operatorname{sen}(\omega t).$$

$$u_p'(t) = -\omega A \operatorname{sen}(\omega t) + \omega B \cos(\omega t)$$

$$u_p''(t) = -\omega^2 A \cos(\omega t) - \omega^2 B \operatorname{sen}(\omega t)$$

Substituindo-se $u_p(t)$, $u_p'(t)$ e $u_p''(t)$ na equação diferencial obtemos

$$(-\omega^2 A \cos \omega t - \omega^2 B \operatorname{sen} \omega t) + (\omega B \gamma + (\omega_0^2 - \omega^2) m A) \cos \omega t + ((\omega_0^2 - \omega^2) m B - \omega A \gamma) \operatorname{sen} \omega t = F_0 \cos \omega t$$

Substituindo-se $t = 0$ e $t = \frac{\pi}{2\omega}$ obtemos o sistema

$$\begin{cases} (\omega_0^2 - \omega^2) m A + \omega \gamma B = F_0 \\ -\omega \gamma A + (\omega_0^2 - \omega^2) m B = 0 \end{cases}$$

que tem solução

$$A = \frac{F_0 m (\omega_0^2 - \omega^2)}{\Delta}, \quad B = \frac{F_0 \gamma \omega}{\Delta},$$

em que $\Delta = m^2(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \gamma^2 \omega^2$. Logo, uma solução particular da equação diferencial que é a solução estacionária é dada por

$$u_p(t) = \frac{F_0 m (\omega_0^2 - \omega^2)}{\Delta} \cos(\omega t) + \frac{F_0 \gamma \omega}{\Delta} \operatorname{sen}(\omega t).$$

(b)

$$R^2 = A^2 + B^2 = \frac{F_0^2}{\Delta^2} (m^2(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \gamma^2 \omega^2) = \frac{F_0^2}{\Delta}.$$

Logo,

$$R = \frac{F_0}{\sqrt{\Delta}}.$$

(c) O valor que maximiza a amplitude é um valor tal que $R'(\omega) = 0$.

$$R'(\omega) = -\frac{1}{2} F_0 \Delta^{-3/2} \Delta'(\omega).$$

Como F_0 e Δ são maiores que zero, então $R'(\omega)$ e $\Delta'(\omega)$ têm sinais contrários e $R'(\omega) = 0 \Leftrightarrow \Delta'(\omega) = 0$.

$$\Delta'(\omega) = \left[-2m^2(\omega_0^2 - \omega^2) + \gamma^2 \right] 2\omega.$$

Como

$$-2m^2(\omega_0^2 - \omega^2) + \gamma^2 = 2m^2\omega^2 + (\gamma^2 - 2m^2\omega_0^2),$$

temos que:

- Se $\gamma^2 > 2m^2\omega_0^2$ ou $\gamma > \sqrt{2}m\omega_0 = \sqrt{2km}$, então $\Delta'(\omega)$ é positivo e assim $R'(\omega)$ é negativo, para $\omega > 0$. Ou seja, $R(\omega)$ é decrescente, para $\omega > 0$.
- Se $\gamma^2 \leq 2m^2\omega_0^2$ ou $\gamma \leq \sqrt{2}m\omega_0 = \sqrt{2km}$, então $\Delta'(\omega) = 0 \Leftrightarrow \omega^2 = \omega_0^2 - \frac{\gamma^2}{2m^2}$. E além disso, $\Delta'(\omega)$ é negativo e assim $R'(\omega)$ é positivo, para $0 < \omega < \sqrt{\omega_0^2 - \frac{\gamma^2}{2m^2}}$ e $\Delta'(\omega)$ é positivo e assim $R'(\omega)$ é negativo, para $\omega > \sqrt{\omega_0^2 - \frac{\gamma^2}{2m^2}}$. Ou seja, $R(\omega)$ é crescente para $0 < \omega < \sqrt{\omega_0^2 - \frac{\gamma^2}{2m^2}}$ e decrescente, para $\omega > \sqrt{\omega_0^2 - \frac{\gamma^2}{2m^2}}$. O que mostra que $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \frac{\gamma^2}{2m^2}}$ é o valor de ω que maximiza a amplitude $R(\omega)$.

5.9. (a)

$$10Q'' + 60Q' + \frac{1}{0,125 \cdot 10^{-1}}Q = 12$$

Dividindo-se por 10:

$$Q'' + 6Q' + 8Q = \frac{6}{5}$$

Equação característica: $r^2 + 6r + 8 = 0$ Raízes: $r = -2, -4$ Solução geral da equação homogênea: $Q(t) = c_1 e^{-2t} + c_2 e^{-4t}$ Solução particular da forma $Q_p(t) = A_0$.

$$Q_p'(t) = Q_p''(t) = 0$$

Substituindo-se na equação:

$$8A_0 = \frac{6}{5} \Rightarrow A_0 = \frac{3}{20}$$

Solução geral:

$$Q(t) = c_1 e^{-2t} + c_2 e^{-4t} + \frac{3}{20}$$

Derivada da solução geral: $Q'(t) = -2c_1 e^{-2t} - 4c_2 e^{-4t}$ Substituindo-se $t = 0$, $Q = 0$, $Q' = 0$:

$$\begin{cases} c_1 + c_2 + \frac{3}{20} = 0 \\ -2c_1 - 4c_2 = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} c_1 = -3/10 \\ c_2 = 3/20 \end{cases}$$

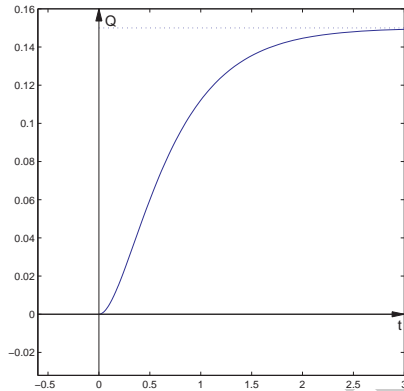
Solução do PVI:

$$Q(t) = -\frac{3}{10}e^{-2t} + \frac{3}{20}e^{-4t} + \frac{3}{20}$$

(b)

$$\lim_{t \rightarrow \infty} Q(t) = \frac{3}{20} \text{ C}$$

(c)



6. Soluções em Séries de Potências (página 397)

6.1. (a) Substituindo-se $y(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n$, $y'(x) = \sum_{n=0}^{\infty} (n+1)a_{n+1}x^n$ e $y''(x) = \sum_{n=0}^{\infty} (n+2)(n+1)a_{n+2}x^n$ na equação $y'' + xy' + 2y = 0$, obtemos

$$\sum_{n=0}^{\infty} (n+2)(n+1)a_{n+2}x^n + x \sum_{n=0}^{\infty} (n+1)a_{n+1}x^n + 2 \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n = 0$$

$$\sum_{n=0}^{\infty} (n+2)(n+1)a_{n+2}x^n + \sum_{n=0}^{\infty} (n+1)a_{n+1}x^{n+1} + 2 \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n = 0$$

$$\sum_{n=0}^{\infty} (n+2)(n+1)a_{n+2}x^n + \sum_{n=1}^{\infty} n a_n x^n + 2 \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n = 0$$

$$2a_2 + 2a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [(n+2)(n+1)a_{n+2} + n a_n + 2a_n]x^n = 0$$

O que implica em

$$\begin{cases} 2a_2 + 2a_0 = 0 \\ (n+2)(n+1)a_{n+2} + n a_n + 2a_n = 0, \quad n = 1, 2, 3, \dots \end{cases}$$

$$\begin{cases} a_2 = -a_0 \\ a_{n+2} = -\frac{1}{n+1}a_n, \quad n = 1, 2, 3, \dots \end{cases}$$

$$a_4 = \frac{(-1)^2}{3}a_0, \quad a_6 = \frac{(-1)^3}{5 \cdot 3}a_0, \quad \dots \quad a_{2k} = \frac{(-1)^k}{(2k-1)(2k-3)\dots 3}a_0, \quad k = 1, 2, \dots$$

$$a_3 = -\frac{1}{2}a_1, a_5 = \frac{1}{4 \cdot 2}a_1, \dots a_{2k+1} = \frac{(-1)^k}{(2k)(2k-2)\dots 2}a_1 \quad k = 1, 2, \dots$$

Substituindo-se os valores a_n encontrados acima, na série de $y(x)$ obtemos

$$\begin{aligned} y(x) &= \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n = \sum_{k=0}^{\infty} a_{2k} x^{2k} + \sum_{k=0}^{\infty} a_{2k+1} x^{2k+1} = \\ &= a_0 \left(1 + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^k}{(2k-1)(2k-3)\dots 3} x^{2k} \right) + \\ &\quad + a_1 \left(x + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^k}{(2k)(2k-2)\dots 2} x^{2k+1} \right) \end{aligned}$$

Portanto, a solução geral é

$$y(x) = a_0 y_1(x) + a_1 y_2(x),$$

em que

$$\begin{aligned} y_1(x) &= 1 + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^k}{(2k-1)(2k-3)\dots 3} x^{2k} \\ y_2(x) &= x + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^k}{(2k)(2k-2)\dots 2} x^{2k+1} \end{aligned}$$

Agora, como $y(0) = 4$, então substituindo $x = 0$ e $y = 4$ na expressão de $y(x)$ obtemos que $a_0 = 4$. Como $y'(0) = -1$, substituindo-se $x = 0$ e $y' = -1$ na expressão obtida derivando-se $y(x)$:

$$\begin{aligned} y'(x) &= a_0 \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^k 2k}{(2k-1)(2k-3)\dots 3} x^{2k-1} + \\ &\quad + a_1 \left(1 + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^k (2k+1)}{(2k)(2k-2)\dots 2} x^{2k} \right) \end{aligned}$$

obtemos $a_1 = -1$. Assim, a solução do problema de valor inicial é

$$y(x) = 4 \left(1 + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^k}{(2k-1)(2k-3) \cdots 3} x^{2k} \right) - \left(x + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^k}{(2k)(2k-2) \cdots 2} x^{2k+1} \right)$$

A série acima converge para todo $x \in \mathbb{R}$.

- (b) Substituindo-se $y(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n$, $y'(x) = \sum_{n=0}^{\infty} (n+1)a_{n+1}x^n$ e $y''(x) = \sum_{n=0}^{\infty} (n+2)(n+1)a_{n+2}x^n$ na equação $(1+x^2)y'' - 4xy' + 6y = 0$, obtemos
- $$(1+x^2) \sum_{n=0}^{\infty} (n+2)(n+1)a_{n+2}x^n - 4x \sum_{n=0}^{\infty} (n+1)a_{n+1}x^n + 6 \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n = 0$$
- $$\sum_{n=0}^{\infty} (n+2)(n+1)a_{n+2}x^n + x^2 \sum_{n=0}^{\infty} (n+2)(n+1)a_{n+2}x^n - 4 \sum_{n=0}^{\infty} (n+1)a_{n+1}x^{n+1} + 6 \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n = 0$$
- $$\sum_{n=0}^{\infty} (n+2)(n+1)a_{n+2}x^n + \sum_{n=0}^{\infty} (n+2)(n+1)a_{n+2}x^{n+2} - 4 \sum_{n=0}^{\infty} (n+1)a_{n+1}x^{n+1} + 6 \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n = 0$$
- $$\sum_{n=2}^{\infty} (n+2)(n+1)a_{n+2}x^n + \sum_{n=2}^{\infty} n(n-1)a_n x^n - 4 \sum_{n=1}^{\infty} n a_n x^n + 6 \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n = 0$$
- $$2a_2 + 6a_3x - 4a_1x + 6a_0 + 6a_1x + \sum_{n=2}^{\infty} [(n+2)(n+1)a_{n+2} + n(n-1)a_n - 4na_n + 6a_n]x^n = 0$$
- O que implica em

$$\begin{cases} 2a_2 + 6a_0 = 0 \\ 6a_3 + 2a_1 = 0 \\ (n+2)(n+1)a_{n+2} + \\ + n(n-1)a_n - 4na_n + 6a_n = 0, \\ n = 2, 3, \dots \end{cases}$$

$$\begin{cases} a_2 = -3a_0 \\ a_3 = -\frac{1}{3}a_1 \\ a_{n+2} = -\frac{(n-3)(n-2)}{(n+2)(n+1)}a_n, \quad n = 2, 3, \dots \end{cases}$$

$$a_4 = 0, a_6 = 0, \dots a_{2k} = 0, \text{ para } k = 2, 3, \dots$$

$$a_5 = 0, a_7 = 0, \dots a_{2k+1} = 0, \text{ para } k = 2, 3, \dots$$

Substituindo-se os valores a_n encontrados acima, na série de $y(x)$ obtemos

$$\begin{aligned} y(x) &= \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n \\ &= \sum_{k=0}^{\infty} a_{2k} x^{2k} + \sum_{k=0}^{\infty} a_{2k+1} x^{2k+1} \\ &= a_0 \left(1 - 3x^2\right) + a_1 \left(x - \frac{1}{3}x^3\right) \end{aligned}$$

Portanto, a solução geral é

$$y(x) = a_0 y_1(x) + a_1 y_2(x),$$

em que

$$y_1(x) = 1 - 3x^2 \text{ e } y_2(x) = x - \frac{1}{3}x^3$$

A solução acima é válida para todo x .

- (c) Substituindo-se $y(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n$ e $y''(x) = \sum_{n=0}^{\infty} (n+2)(n+1)a_{n+2}x^n$ na equação $(4-x^2)y'' + 2y = 0$, obtemos

$$(4-x^2) \sum_{n=0}^{\infty} (n+2)(n+1)a_{n+2}x^n + 2 \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n = 0$$

$$4 \sum_{n=0}^{\infty} (n+2)(n+1)a_{n+2}x^n - x^2 \sum_{n=0}^{\infty} (n+2)(n+1)a_{n+2}x^n + 2 \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n = 0$$

$$4 \sum_{n=0}^{\infty} (n+2)(n+1)a_{n+2}x^n - \sum_{n=0}^{\infty} (n+2)(n+1)a_{n+2}x^{n+2} + 2 \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n = 0$$

$$4 \sum_{n=0}^{\infty} (n+2)(n+1)a_{n+2}x^n - \sum_{n=2}^{\infty} n(n-1)a_n x^n + 2 \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n = 0$$

$$8a_2 + 4 \cdot 3 \cdot 2 \cdot a_3 x + 2a_0 + 2a_1 x + \sum_{n=2}^{\infty} [4(n+2)(n+1)a_{n+2} - n(n-1)a_n + 2a_n]x^n = 0$$

O que implica em

$$\begin{cases} 8a_2 + 2a_0 = 0 \\ 4 \cdot 3 \cdot 2 \cdot a_3 + 2a_1 = 0 \\ 4(n+2)(n+1)a_{n+2} - n(n-1)a_n + 2a_n = 0, \quad n = 2, 3, \dots \end{cases}$$

$$\begin{cases} a_2 = -\frac{1}{4}a_0 \\ a_3 = -\frac{1}{4 \cdot 3}a_1 \\ a_{n+2} = \frac{n^2-n-2}{4(n+2)(n+1)}a_n \\ = \frac{n-2}{4(n+2)}a_n, \quad n = 2, 3, \dots \end{cases}$$

$a_4 = 0, a_6 = 0, \dots, a_{2k} = 0$, para $k = 2, 3, \dots$

$a_5 = -\frac{1}{4^2 \cdot 5 \cdot 3}a_1, a_7 = -\frac{1}{4^3 \cdot 7 \cdot 5}a_1, \dots, a_{2k+1} = -\frac{1}{4^k(2k+1)(2k-1)}a_1, k = 1, \dots$

Substituindo-se os valores a_n encontrados acima, na série de $y(x)$ obtemos

$$\begin{aligned} y(x) &= \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n \\ &= \sum_{k=0}^{\infty} a_{2k} x^{2k} + \sum_{k=0}^{\infty} a_{2k+1} x^{2k+1} \\ &= a_0 \left(1 - \frac{1}{4}x^2 \right) + \\ &\quad + a_1 \left(x - \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{4^k(2k+1)(2k-1)} x^{2k+1} \right) \end{aligned}$$

Portanto, a solução geral é

$$y(x) = a_0 y_1(x) + a_1 y_2(x),$$

em que

$$y_1(x) = 1 - \frac{1}{4}x^2 \text{ e } y_2(x) = x - \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{4^k(2k+1)(2k-1)} x^{2k+1}$$

A série acima converge pelo menos para $|x| < 2$.

- (d) Substituindo-se $y(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n$, $y'(x) = \sum_{n=0}^{\infty} (n+1)a_{n+1}x^n$ e $y''(x) = \sum_{n=0}^{\infty} (n+2)(n+1)a_{n+2}x^n$ na equação $(3-x^2)y'' - 3xy' - y = 0$, obtemos $(3-x^2)\sum_{n=0}^{\infty} (n+2)(n+1)a_{n+2}x^n - 3x\sum_{n=0}^{\infty} (n+1)a_{n+1}x^n - \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n = 0$

$$3 \sum_{n=0}^{\infty} (n+2)(n+1)a_{n+2}x^n - x^2 \sum_{n=0}^{\infty} (n+2)(n+1)a_{n+2}x^n - 3 \sum_{n=0}^{\infty} (n+1)a_{n+1}x^{n+1} - \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n = 0$$

$$3 \sum_{n=0}^{\infty} (n+2)(n+1)a_{n+2}x^n - \sum_{n=0}^{\infty} (n+2)(n+1)a_{n+2}x^{n+2} - 3 \sum_{n=0}^{\infty} (n+1)a_{n+1}x^{n+1} - \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n = 0$$

$$3 \sum_{n=0}^{\infty} (n+2)(n+1)a_{n+2}x^n - \sum_{n=2}^{\infty} n(n-1)a_n x^n - 3 \sum_{n=1}^{\infty} n a_n x^n - \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n = 0$$

$$6a_2 + 3^2 \cdot 2 \cdot a_3 x - 3a_1 x - a_0 - a_1 x + \sum_{n=2}^{\infty} [3(n+2)(n+1)a_{n+2} - n(n-1)a_n - 3na_n - a_n]x^n = 0$$

O que implica em

$$\begin{cases} 6a_2 - a_0 = 0 \\ 3^2 \cdot 2 \cdot a_3 - 4a_1 = 0 \\ 3(n+2)(n+1)a_{n+2} \\ -n(n-1)a_n - 3na_n - a_n = 0, \\ n = 2, 3, \dots \end{cases}$$

$$\begin{cases} a_2 = \frac{1}{3 \cdot 2} a_0 \\ a_3 = \frac{2}{3^2} a_1 \\ a_{n+2} = \frac{n^2 + 2n + 1}{3(n+2)(n+1)} a_n \\ = \frac{(n+1)^2}{3(n+2)(n+1)} a_n \\ = \frac{n+1}{3(n+2)} a_n, \quad n = 1, 2, \dots \end{cases}$$

$$a_4 = \frac{3}{3^2 \cdot 4 \cdot 2} a_0, a_6 = \frac{5 \cdot 3}{3^3 \cdot 6 \cdot 4 \cdot 2} a_0, \dots a_{2k} = \frac{(2k-1)(2k-3) \dots 3}{3^k \cdot (2k)(2k-2) \dots 2} a_0, k = 2, 3, \dots$$

$$a_5 = \frac{4 \cdot 2}{3^2 \cdot 5 \cdot 3} a_1, a_7 = \frac{6 \cdot 4 \cdot 2}{3^3 \cdot 7 \cdot 5 \cdot 3} a_1, \dots a_{2k+1} = \frac{(2k)(2k-2) \dots 2}{3^k (2k+1)(2k-1) \dots 3} a_1, k = 1, 2, \dots$$

Substituindo-se os valores a_n encontrados acima, na série de $y(x)$ obtemos

$$y(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n = \sum_{k=0}^{\infty} a_{2k} x^{2k} + \sum_{k=0}^{\infty} a_{2k+1} x^{2k+1} = a_0 \left(1 + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(2k-1)(2k-3) \dots 3}{3^k \cdot (2k)(2k-2) \dots 2} x^{2k} \right) + a_1 \left(x + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(2k)(2k-2) \dots 2}{3^k (2k+1)(2k-1) \dots 3} x^{2k+1} \right)$$

Portanto, a solução geral é

$$y(x) = a_0 y_1(x) + a_1 y_2(x),$$

em que

$$y_1(x) = 1 + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(2k-1)(2k-3) \dots 3}{3^k \cdot (2k)(2k-2) \dots 2} x^{2k} \quad \text{e}$$

$$y_2(x) = x + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(2k)(2k-2) \cdots 2}{3^k(2k+1)(2k-1) \cdots 3} x^{2k+1}$$

A série acima converge pelo menos para $|x| < \sqrt{3}$.

(e) Substituindo-se $y(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n$,

$$y'(x) = \sum_{n=0}^{\infty} (n+1) a_{n+1} x^n \text{ e}$$

$$y''(x) = \sum_{n=0}^{\infty} (n+2)(n+1) a_{n+2} x^n \text{ na equação}$$

$$(1-x)y'' + xy' - y = 0, \text{ obtemos}$$

$$(1-x) \sum_{n=0}^{\infty} (n+2)(n+1) a_{n+2} x^n$$

$$+ x \sum_{n=0}^{\infty} (n+1) a_{n+1} x^n - \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n = 0$$

$$\sum_{n=0}^{\infty} (n+2)(n+1) a_{n+2} x^n$$

$$- x \sum_{n=0}^{\infty} (n+2)(n+1) a_{n+2} x^n$$

$$+ \sum_{n=0}^{\infty} (n+1) a_{n+1} x^{n+1}$$

$$- \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n = 0$$

$$\sum_{n=0}^{\infty} (n+2)(n+1) a_{n+2} x^n$$

$$- \sum_{n=0}^{\infty} (n+2)(n+1) a_{n+2} x^{n+1} + \sum_{n=0}^{\infty} (n+1) a_{n+1} x^{n+1}$$

$$- \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n = 0$$

$$\sum_{n=0}^{\infty} (n+2)(n+1) a_{n+2} x^n - \sum_{n=1}^{\infty} (n+1) n a_{n+1} x^n$$

$$+ \sum_{n=1}^{\infty} n a_n x^n - \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n = 0$$

$$2a_2 - a_0 +$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} [(n+2)(n+1) a_{n+2} - n(n+1) a_{n+1} + n a_n - a_n] x^n = 0$$

O que implica em

$$\begin{cases} 2a_2 - a_0 = 0 \\ (n+2)(n+1) a_{n+2} \\ - n(n+1) a_{n+1} + n a_n - a_n = 0, \\ n = 1, 2, 3, \dots \end{cases}$$

$$\begin{cases} a_2 = \frac{1}{2} a_0 \\ a_{n+2} = \\ \frac{n}{n+2} a_{n+1} - \frac{n-1}{(n+2)(n+1)} a_n, \\ n = 1, 2, \dots \end{cases}$$

$$a_3 = \frac{1}{3}a_2 = \frac{1}{3 \cdot 2}a_0,$$

$$a_4 = \frac{2}{4}a_3 - \frac{1}{4 \cdot 3}a_2 = \frac{2}{4 \cdot 3 \cdot 2}a_0 - \frac{1}{4 \cdot 3 \cdot 2}a_0 = \frac{1}{4!}a_0,$$

Supondo que $a_k = \frac{1}{k!}a_0$, para $k < n$, então

$$a_n = \frac{n-2}{n}a_{n-1} - \frac{n-3}{n(n-1)}a_{n-2} =$$

$$\frac{n-2}{n} \frac{1}{(n-1)!}a_0 - \frac{n-3}{n(n-1)} \frac{1}{(n-2)!}a_0 = \frac{1}{n!}a_0, \text{ para } n = 1, 2, \dots$$

Substituindo-se os valores a_n encontrados acima, na série de $y(x)$ obtemos

$$\begin{aligned} y(x) &= \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n \\ &= a_0 \left(1 + \sum_{n=2}^{\infty} \frac{1}{n!} x^n \right) + a_1 x \end{aligned}$$

Portanto, a solução geral é

$$y(x) = a_0 y_1(x) + a_1 y_2(x),$$

em que

$$y_1(x) = 1 + \sum_{n=2}^{\infty} \frac{1}{n!} x^n \quad \text{e} \quad y_2(x) = x$$

Agora, como $y(0) = -3$, então substituindo $x = 0$ e $y = -3$ na expressão de $y(x)$ obtemos que $a_0 = -3$. Como $y'(0) = 2$, substituindo-se $x = 0$ e $y' = 2$ na expressão obtida derivando-se $y(x)$:

$$y'(x) = a_0 \sum_{n=2}^{\infty} \frac{1}{(n-1)!} x^{n-1} + a_1$$

obtemos $a_1 = 2$. Assim, a solução do problema de valor inicial é

$$y(x) = -3 \left(1 + \sum_{n=2}^{\infty} \frac{1}{n!} x^n \right) + 2x$$

A série acima converge pelo menos para todo $|x| < 1$.

- (f) Substituindo-se $y(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n$, $y'(x) = \sum_{n=0}^{\infty} (n+1)a_{n+1}x^n$ e $y''(x) = \sum_{n=0}^{\infty} (n+2)(n+1)a_{n+2}x^n$ na equação $2y'' + xy' + 3y = 0$, obtemos
- $$2 \sum_{n=0}^{\infty} (n+2)(n+1)a_{n+2}x^n + x \sum_{n=0}^{\infty} (n+1)a_{n+1}x^n + 3 \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n = 0$$
- $$2 \sum_{n=0}^{\infty} (n+2)(n+1)a_{n+2}x^n + \sum_{n=0}^{\infty} (n+1)a_{n+1}x^{n+1} + 3 \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n = 0$$
- $$2 \sum_{n=0}^{\infty} (n+2)(n+1)a_{n+2}x^n + \sum_{n=1}^{\infty} n a_n x^n + 3 \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n = 0$$
- $$4a_2 + 3a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [2(n+2)(n+1)a_{n+2} + n a_n + 3a_n]x^n = 0$$

O que implica em

$$\begin{cases} 4a_2 + 3a_0 = 0 \\ 2(n+2)(n+1)a_{n+2} + n a_n + 3a_n = 0, \quad n = 1, 2, 3, \dots \end{cases}$$

$$\begin{cases} a_2 = -\frac{3}{4}a_0 \\ a_{n+2} = -\frac{n+3}{2(n+2)(n+1)}a_n, \quad n = 1, 2, \dots \end{cases}$$

$$a_4 = \frac{5 \cdot 3}{2^2 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 2}a_0, \quad a_6 = -\frac{7 \cdot 5 \cdot 3}{2^3 \cdot 6!}a_0, \quad \dots \quad a_{2k} = \frac{(-1)^k (2k+1)(2k-1) \dots 3}{2^k \cdot (2k)!}a_0, \quad k = 1, 2, \dots$$

$$a_3 = -\frac{4}{2 \cdot 3 \cdot 2}a_1, \quad a_5 = \frac{6 \cdot 4}{2^2 \cdot 5 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 2}a_1, \quad \dots \quad a_{2k+1} = \frac{(-1)^k (2k+2)(2k) \dots 4}{2^k (2k+1)!}a_1, \quad k = 1, \dots$$

Substituindo-se os valores a_n encontrados acima, na série de $y(x)$ obtemos

$$y(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n = \sum_{k=0}^{\infty} a_{2k} x^{2k} + \sum_{n=0}^{\infty} a_{2n+1} x^{2n+1} = a_0 \left(1 + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^k (2k+1)(2k-1) \dots 3}{2^k \cdot (2k)!} x^{2k} \right) + a_1 \left(x + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^k (2k+2)(2k) \dots 4}{2^k (2k+1)!} x^{2k+1} \right)$$

Portanto, a solução geral é

$$y(x) = a_0 y_1(x) + a_1 y_2(x),$$

em que

$$y_1(x) = 1 + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^k (2k+1)(2k-1) \dots 3}{2^k \cdot (2k)!} x^{2k} \quad \text{e}$$

$$y_2(x) = x + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^k (2k+2)(2k) \dots 4}{2^k (2k+1)!} x^{2k+1}$$

A série acima converge para todo $x \in \mathbb{R}$.

- (g) Substituindo-se $y(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n$ e $y''(x) = \sum_{n=0}^{\infty} (n+2)(n+1)a_{n+2}x^n$ na equação $y'' - xy = 0$, obtemos

$$\sum_{n=0}^{\infty} (n+2)(n+1)a_{n+2}x^n - x \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n = 0$$

$$\sum_{n=0}^{\infty} (n+2)(n+1)a_{n+2}x^n - \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^{n+1} = 0$$

$$\sum_{n=0}^{\infty} (n+2)(n+1)a_{n+2}x^n - \sum_{n=1}^{\infty} a_{n-1}x^n = 0$$

$$2a_2 + \sum_{n=1}^{\infty} [(n+2)(n+1)a_{n+2} - a_{n-1}]x^n = 0$$

O que implica em

$$\begin{cases} 2a_2 = 0 \\ (n+2)(n+1)a_{n+2} \\ -a_{n-1} = 0, \\ n = 1, 2, 3, \dots \end{cases}$$

$$\begin{cases} a_2 = 0 \\ a_{n+2} = \frac{1}{(n+2)(n+1)}a_{n-1}, \\ n = 1, 2, 3, \dots \end{cases}$$

$$a_3 = \frac{1}{3 \cdot 2}a_0$$

$$a_6 = \frac{1}{6 \cdot 5}a_3 = \frac{1}{6 \cdot 5 \cdot 3 \cdot 2}a_0$$

$$a_{3k} = \frac{1}{(3k)(3k-1)(3k-2)(3k-3)\dots 3 \cdot 2}a_0$$

$$a_4 = \frac{1}{4 \cdot 3}a_1$$

$$a_7 = \frac{1}{7 \cdot 6}a_4 = \frac{1}{7 \cdot 6 \cdot 4 \cdot 3}a_1$$

$$a_{3k+1} = \frac{1}{(3k+1)(3k)(3k-2)(3k-3)\dots 4 \cdot 3}a_1$$

$$a_5 = \frac{1}{5 \cdot 4}a_2 = 0, a_{3k+2} = 0, \text{ para } k = 0, 1, 2, \dots$$

Substituindo-se os valores a_n encontrados acima, na série de $y(x)$ obtemos

$$y(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n$$

$$= \sum_{k=0}^{\infty} a_{3k} x^{3k} + \sum_{k=0}^{\infty} a_{3k+1} x^{3k+1} + \sum_{k=0}^{\infty} a_{3k+2} x^{3k+2} = a_0 \left(1 + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{(3k)(3k-1)(3k-2)(3k-3)\dots 3 \cdot 2} x^{3k} \right)$$

$$+ a_1 \left(x + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{(3k+1)(3k)(3k-2)(3k-3)\dots 4 \cdot 3} x^{3k+1} \right)$$

Portanto, a solução geral é

$$y(x) = a_0 y_1(x) + a_1 y_2(x),$$

em que

$$y_1(x) = 1 + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{(3k)(3k-1)(3k-3)(3k-4) \cdots 3 \cdot 2} x^{3k}$$

$$y_2(x) = x + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{(3k+1)(3k)(3k-2)(3k-3) \cdots 4 \cdot 3} x^{3k+1}$$

A série acima converge para todo $x \in \mathbb{R}$.

6.2. (a) Substituindo-se $y(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n$ e $y''(x) = \sum_{n=0}^{\infty} (n+2)(n+1)a_{n+2}x^n$ na equação $y'' + k^2 x^2 y = 0$, obtemos

$$\sum_{n=0}^{\infty} (n+2)(n+1)a_{n+2}x^n + k^2 \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^{n+2} = 0$$

$$\sum_{n=0}^{\infty} (n+2)(n+1)a_{n+2}x^n + k^2 \sum_{n=2}^{\infty} a_{n-2}x^n = 0$$

$$2a_2 + 6a_3x + \sum_{n=2}^{\infty} [(n+2)(n+1)a_{n+2} + k^2 a_{n-2}]x^n = 0.$$

O que implica em

$$\begin{cases} 2a_2 = 0 \\ 6a_3 = 0 \\ (n+2)(n+1)a_{n+2} + k^2 a_{n-2} = 0, \quad n = 2, 3, \dots \end{cases}$$

$$\begin{cases} a_2 = a_3 = 0 \\ a_{n+2} = -\frac{k^2}{(n+2)(n+1)} a_{n-2}, \quad n = 2, 3, \dots \end{cases}$$

$$a_4 = -\frac{k^2}{4 \cdot 3} a_0, \quad a_8 = -\frac{k^4}{8 \cdot 7 \cdot 4 \cdot 3} a_0, \dots$$

$$a_5 = \frac{k^2}{5 \cdot 4} a_1, \quad a_9 = \frac{k^4}{9 \cdot 8 \cdot 5 \cdot 4} a_1, \dots$$

$$a_6 = 0, \quad a_{10} = 0, \quad a_{4n+2} = 0, \quad \text{para } n = 0, 1, 2, \dots$$

$$a_7 = 0, \quad a_{11} = 0, \quad a_{4n+3} = 0, \quad \text{para } n = 0, 1, 2, \dots$$

Substituindo-se os valores a_n encontrados acima, na série de $y(x)$ obtemos

$$y(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n = \sum_{n=0}^{\infty} a_{4n} x^{4n} + \sum_{n=0}^{\infty} a_{4n+1} x^{4n+1} + \sum_{n=0}^{\infty} a_{4n+2} x^{4n+2} + \sum_{n=0}^{\infty} a_{4n+3} x^{4n+3} = \sum_{n=0}^{\infty} a_{4n} x^{4n} + \sum_{n=0}^{\infty} a_{4n+1} x^{4n+1} = a_0 \left(1 - \frac{k^2}{4 \cdot 3} x^4 + \frac{k^4}{8 \cdot 7 \cdot 4 \cdot 3} x^8 + \dots \right) + a_1 \left(x - \frac{k^2}{5 \cdot 4} x^5 + \frac{k^4}{9 \cdot 8 \cdot 5 \cdot 4} x^9 + \dots \right)$$

Portanto, a solução geral é

$$y(x) = a_0 y_1(x) + a_1 y_2(x),$$

em que

$$y_1(x) = 1 - \frac{k^2}{4 \cdot 3} x^4 + \frac{k^4}{8 \cdot 7 \cdot 4 \cdot 3} x^8 + \dots$$

$$y_2(x) = x - \frac{k^2}{5 \cdot 4} x^5 + \frac{k^4}{9 \cdot 8 \cdot 5 \cdot 4} x^9 + \dots$$

A série acima converge para todo $x \in \mathbb{R}$.

- (b) Substituindo-se $y(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n$ e $y''(x) = \sum_{n=0}^{\infty} (n+2)(n+1)a_{n+2}x^n$ na equação $(1-x)y'' + y = 0$, obtemos

$$(1-x) \sum_{n=0}^{\infty} (n+2)(n+1)a_{n+2}x^n + \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n = 0$$

$$\sum_{n=0}^{\infty} (n+2)(n+1)a_{n+2}x^n - x \sum_{n=0}^{\infty} (n+2)(n+1)a_{n+2}x^n + \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n = 0$$

$$\sum_{n=0}^{\infty} (n+2)(n+1)a_{n+2}x^n - \sum_{n=0}^{\infty} (n+2)(n+1)a_{n+2}x^{n+1} + \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n = 0$$

$$\sum_{n=0}^{\infty} (n+2)(n+1)a_{n+2}x^n - \sum_{n=1}^{\infty} (n+1)na_{n+1}x^n + \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n = 0$$

$$2a_2 + a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [(n+2)(n+1)a_{n+2} - (n+1)na_{n+1} + a_n]x^n = 0$$

O que implica em

$$\begin{cases} 2a_2 + a_0 = 0 \\ (n+2)(n+1)a_{n+2} \\ - (n+1)na_{n+1} + a_n = 0, \\ n = 1, 2, 3, \dots \end{cases}$$

$$\begin{cases} a_2 = -\frac{1}{2}a_0 \\ a_{n+2} = \frac{n}{n+2}a_{n+1} \\ - \frac{1}{(n+2)(n+1)}a_n, \\ n = 1, 2, 3, \dots \end{cases}$$

$$a_3 = \frac{1}{3}a_2 - \frac{1}{3 \cdot 2}a_1 = -\frac{1}{3 \cdot 2}a_0 - \frac{1}{3 \cdot 2}a_1$$

$$a_4 = \frac{1}{2}a_3 - \frac{1}{4 \cdot 3}a_2 = -\frac{1}{3 \cdot 2^2}a_0 - \frac{1}{3 \cdot 2^2}a_1 + \frac{1}{4 \cdot 3 \cdot 2}a_0 = -\frac{1}{4 \cdot 3 \cdot 2}a_0 - \frac{1}{3 \cdot 2^2}a_1$$

Substituindo-se os valores a_n encontrados acima, na série de $y(x)$ obtemos

$$y(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n = a_0 \left(1 - \frac{1}{2}x^2 - \frac{1}{3 \cdot 2}x^3 - \frac{1}{4 \cdot 3 \cdot 2}x^4 + \dots \right) + a_1 \left(x - \frac{1}{3 \cdot 2}x^3 - \frac{1}{3 \cdot 4}x^4 + \dots \right)$$

Portanto, a solução geral é

$$y(x) = a_0 y_1(x) + a_1 y_2(x),$$

em que

$$y_1(x) = 1 - \frac{1}{2}x^2 - \frac{1}{3 \cdot 2}x^3 - \frac{1}{4 \cdot 3 \cdot 2}x^4 + \dots$$

$$y_2(x) = x - \frac{1}{3 \cdot 2}x^3 - \frac{1}{3 \cdot 4}x^4 + \dots$$

A série acima converge pelo menos para $|x| < 1$.

- (c) Substituindo-se $y(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n$, $y'(x) = \sum_{n=0}^{\infty} (n+1)a_{n+1}x^n$ e $y''(x) = \sum_{n=0}^{\infty} (n+2)(n+1)a_{n+2}x^n$ na equação $(2+x^2)y'' - xy' + 4y = 0$, obtemos
- $$(2+x^2) \sum_{n=0}^{\infty} (n+2)(n+1)a_{n+2}x^n - x \sum_{n=0}^{\infty} (n+1)a_{n+1}x^n + 4 \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n = 0$$
- $$2 \sum_{n=0}^{\infty} (n+2)(n+1)a_{n+2}x^n + x^2 \sum_{n=0}^{\infty} (n+2)(n+1)a_{n+2}x^n - \sum_{n=0}^{\infty} (n+1)a_{n+1}x^{n+1} + 4 \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n = 0$$
- $$2 \sum_{n=0}^{\infty} (n+2)(n+1)a_{n+2}x^n + \sum_{n=0}^{\infty} (n+2)(n+1)a_{n+2}x^{n+2} - \sum_{n=1}^{\infty} n a_n x^n + 4 \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n = 0$$
- $$2 \sum_{n=0}^{\infty} (n+2)(n+1)a_{n+2}x^n + \sum_{n=2}^{\infty} n(n-1)a_n x^n - \sum_{n=1}^{\infty} n a_n x^n + 4 \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n = 0$$
- $$4a_2 + 12a_3x - a_1x + 4a_0 + 4a_1x + \sum_{n=2}^{\infty} [2(n+2)(n+1)a_{n+2} + n(n-1)a_n - n a_n + 4a_n]x^n = 0$$

O que implica em

$$\begin{cases} 4a_2 + 4a_0 = 0 \\ 12a_3 + 3a_1 = 0 \\ 2(n+2)(n+1)a_{n+2} + n(n-1)a_n - n a_n + 4a_n = 0, \\ n = 2, 3, \dots \end{cases}$$

$$\begin{cases} a_2 = -a_0 \\ a_3 = -\frac{1}{4}a_1 \\ a_{n+2} = \frac{-n(n-2)-4}{2(n+2)(n+1)}a_n, \\ n = 2, 3, \dots \end{cases}$$

$$a_4 = \frac{1}{3 \cdot 2}a_0, a_6 = \frac{-1}{30}a_0, \dots$$

$$a_5 = \frac{7}{5 \cdot 4^2 \cdot 2}a_1, \dots$$

Substituindo-se os valores a_n encontrados acima, na série de $y(x)$ obtemos

$$y(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n = \sum_{k=0}^{\infty} a_{2k} x^{2k} + \sum_{n=0}^{\infty} a_{2n+1} x^{2n+1} = a_0 \left(1 - x^2 + \frac{1}{3 \cdot 2} x^4 + \dots\right) + a_1 \left(x - \frac{1}{4} x^3 + \frac{7}{5 \cdot 4^2 \cdot 2} x^5 + \dots\right)$$

Portanto, a solução geral é

$$y(x) = a_0 y_1(x) + a_1 y_2(x),$$

em que

$$y_1(x) = 1 - x^2 + \frac{1}{3 \cdot 2} x^4 + \dots$$

$$y_2(x) = x - \frac{1}{4} x^3 + \frac{7}{5 \cdot 4^2 \cdot 2} x^5 + \dots$$

Agora, como $y(0) = -3$, então substituindo $x = 0$ e $y = -3$ na expressão de $y(x)$ obtemos $a_0 = -3$.

Como $y'(0) = 2$, substituindo-se $x = 0$ e $y' = 2$ na expressão obtida derivando-se $y(x)$:

$$y'(x) = a_0 \left(-2x + \frac{2}{3} x^3 + \dots\right) + a_1 \left(1 - \frac{3}{4} x^2 + \frac{3 \cdot 7}{5 \cdot 4^2} x^4 + \dots\right)$$

obtemos $a_1 = 2$. Assim, a solução do problema de valor inicial é

$$y(x) = -3 \left(1 - x^2 + \frac{1}{3 \cdot 2} x^4 + \dots\right) + 2 \left(x - \frac{1}{4} x^3 + \frac{7}{5 \cdot 4^2 \cdot 2} x^5 + \dots\right)$$

A série acima converge pelo menos para $|x| < \sqrt{2}$.

- 6.3. $y_1(t)$ e $y_2(t)$ são soluções da equação pois fazendo $a_0 = 1$ e $a_1 = 0$ obtemos $y_1(t)$ e fazendo $a_0 = 0$ e $a_1 = 1$ obtemos $y_2(t)$. Além disso

$$\begin{aligned} W[y_1, y_2](0) &= \det \begin{bmatrix} y_1(0) & y_2(0) \\ y_1'(0) & y_2'(0) \end{bmatrix} \\ &= \det \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = 1 \neq 0 \end{aligned}$$

Como o wronskiano de $y_1(t)$ e $y_2(t)$ é diferente de zero para $t = 0$ e $y_1(t)$ e $y_2(t)$ são soluções da equação, então $y_1(t)$ e $y_2(t)$ são soluções fundamentais da equação.

- 6.4. (a) Substituindo-se $y(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n$, $y'(x) = \sum_{n=0}^{\infty} (n+1)a_{n+1}x^n$ e $y''(x) = \sum_{n=0}^{\infty} (n+2)(n+1)a_{n+2}x^n$ na equação $(1-x^2)y'' - 2xy' + \alpha(\alpha+1)y = 0$, obtemos
- $$(1-x^2) \sum_{n=0}^{\infty} (n+2)(n+1)a_{n+2}x^n - 2x \sum_{n=0}^{\infty} (n+1)a_{n+1}x^n + \alpha(\alpha+1) \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n = 0$$
- $$\sum_{n=0}^{\infty} (n+2)(n+1)a_{n+2}x^n - x^2 \sum_{n=0}^{\infty} (n+2)(n+1)a_{n+2}x^n - 2 \sum_{n=0}^{\infty} (n+1)a_{n+1}x^{n+1} + \alpha(\alpha+1) \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n = 0$$
- $$\sum_{n=0}^{\infty} (n+2)(n+1)a_{n+2}x^n - \sum_{n=0}^{\infty} (n+2)(n+1)a_{n+2}x^{n+2} - 2 \sum_{n=0}^{\infty} (n+1)a_{n+1}x^{n+1} + \alpha(\alpha+1) \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n = 0$$
- $$\sum_{n=0}^{\infty} (n+2)(n+1)a_{n+2}x^n - \sum_{n=2}^{\infty} n(n-1)a_n x^n - 2 \sum_{n=1}^{\infty} n a_n x^n + \alpha(\alpha+1) \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n = 0$$
- $$2a_2 + 6a_3x - 2a_1x + \alpha(\alpha+1)a_0 + \alpha(\alpha+1)a_1x + \sum_{n=2}^{\infty} [(n+2)(n+1)a_{n+2} - n(n-1)a_n - 2na_n + \alpha(\alpha+1)a_n]x^n = 0$$

O que implica em

$$\begin{cases} 2a_2 + \alpha(\alpha+1)a_0 = 0 \\ 6a_3 - (2 - \alpha(\alpha+1))a_1 = 0 \\ (n+2)(n+1)a_{n+2} - n(n-1)a_n - 2na_n + \alpha(\alpha+1)a_n = 0, n = 2, 3, \dots \end{cases}$$

$$\begin{cases} a_2 = -\frac{\alpha(\alpha+1)}{2}a_0 \\ a_3 = \frac{2-\alpha(\alpha+1)}{6}a_1 \\ a_{n+2} = \frac{n^2+n-\alpha(\alpha+1)}{(n+2)(n+1)}a_n \\ = \frac{(n-\alpha)(n+1+\alpha)}{(n+2)(n+1)}a_n, \quad n = 2, 3, \dots \end{cases}$$

$$a_{2k} = \frac{(2k-2-\alpha) \cdots (-\alpha)(2k-1+\alpha) \cdots (1+\alpha)}{(2k)!} a_0, \quad k = 2, 3, \dots$$

$$a_{2k+1} = \frac{(2k-1-\alpha) \cdots (1-\alpha)(2k-2+\alpha) \cdots (2+\alpha)}{(2k+1)!} a_1, \quad k = 1, 2, \dots$$

Substituindo-se os valores a_n encontrados acima, na série de $y(x)$ obtemos

$$y(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n = \sum_{k=0}^{\infty} a_{2k} x^{2k} + \sum_{k=0}^{\infty} a_{2k+1} x^{2k+1} = a_0 \left(1 + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(2k-2-\alpha) \cdots (-\alpha)(2k-1+\alpha) \cdots (1+\alpha)}{(2k)!} x^{2k} \right) \\ + a_1 \left(x + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(2k-1-\alpha) \cdots (1-\alpha)(2k-2+\alpha) \cdots (2+\alpha)}{(2k+1)!} x^{2k+1} \right)$$

Portanto, a solução geral é

$$y(x) = a_0 y_1(x) + a_1 y_2(x),$$

em que

$$y_1(x) = 1 + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(2k-2-\alpha) \cdots (-\alpha)(2k-1+\alpha) \cdots (1+\alpha)}{(2k)!} x^{2k}$$

$$y_2(x) = x + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(2k-1-\alpha) \cdots (1-\alpha)(2k-2+\alpha) \cdots (2+\alpha)}{(2k+1)!} x^{2k+1}$$

(b) Da fórmula de recorrência segue-se que se $\alpha = 2N$, então $a_{2k} = 0$, para $k = N+1, N+2, \dots$ e se $\alpha = 2N+1$, então $a_{2k+1} = 0$, para $k = N+1, N+2, \dots$

(c) $P_0(x) = 1, P_1(x) = x, P_2(x) = \frac{3}{2}x^2 - \frac{1}{2}, P_3(x) = \frac{5}{2}x^3 - \frac{3}{2}x, P_4(x) = \frac{35}{8}x^4 - \frac{15}{4}x^2 + \frac{3}{8}$

6.5. (a) Substituindo-se $y(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n, y'(x) = \sum_{n=0}^{\infty} (n+1)a_{n+1}x^n$ e $y''(x) = \sum_{n=0}^{\infty} (n+2)(n+1)a_{n+2}x^n$ na equação $y'' - 2xy' + \lambda y = 0$, obtemos $\sum_{n=0}^{\infty} (n+2)(n+1)a_{n+2}x^n - 2x \sum_{n=0}^{\infty} (n+1)a_{n+1}x^n + \lambda \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n = 0$

$$\sum_{n=0}^{\infty} (n+2)(n+1)a_{n+2}x^n - 2\sum_{n=0}^{\infty} (n+1)a_{n+1}x^{n+1} + \lambda \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n = 0$$

$$\sum_{n=0}^{\infty} (n+2)(n+1)a_{n+2}x^n - 2\sum_{n=1}^{\infty} na_n x^n + \lambda \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n = 0$$

$$2a_2 + \lambda a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [(n+2)(n+1)a_{n+2} - 2na_n + \lambda a_n]x^n = 0$$

O que implica em

$$\begin{cases} 2a_2 + \lambda a_0 = 0 \\ (n+2)(n+1)a_{n+2} - 2na_n + \lambda a_n = 0, \quad n = 1, 2, 3, \dots \end{cases} \quad \begin{cases} a_2 = -\frac{\lambda}{2}a_0 \\ a_{n+2} = \frac{2n - \lambda}{(n+1)(n+2)}a_n, \quad n = 1, 2, 3, \dots \end{cases}$$

$$a_4 = \frac{(4-\lambda)}{4 \cdot 3} a_2 = \frac{(4-\lambda)(-\lambda)}{4!} a_0$$

$$a_6 = \frac{(8-\lambda)}{6 \cdot 5} a_4 = \frac{(8-\lambda)(4-\lambda)(-\lambda)}{6!} a_0$$

$$a_{2k} = \frac{(4k-4-\lambda)(4k-8-\lambda) \cdots (-\lambda)}{(2k)!} a_0$$

$$a_{2k} = \frac{(-1)^k (\lambda - 2(2k-2)) \cdots \lambda}{(2k)!} a_0$$

$$a_3 = \frac{2-\lambda}{3 \cdot 2} a_1$$

$$a_5 = \frac{(6-\lambda)(2-\lambda)}{5 \cdot 4} a_3 = \frac{(6-\lambda)(2-\lambda)}{5!} a_1$$

$$a_{2k+1} = \frac{(4k-2-\lambda) \cdots (2-\lambda)}{(2k+1)!} a_1$$

$$a_{2k+1} = \frac{(-1)^k (\lambda - 2(2k-1)) \cdots (\lambda - 2)}{(2k+1)!} a_1$$

$$k = 1, 2, \dots$$

Substituindo-se os valores a_n encontrados acima, na série de $y(x)$ obtemos

$$y(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n = \sum_{k=0}^{\infty} a_{2k} x^{2k} + \sum_{k=0}^{\infty} a_{2k+1} x^{2k+1} = a_0 \left(1 + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^k (\lambda - 2(2k-2)) \cdots \lambda}{(2k)!} x^{2k} \right) \\ + a_1 \left(x + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^k (\lambda - 2(2k-1)) \cdots (\lambda - 2)}{(2k+1)!} x^{2k+1} \right)$$

Portanto, a solução geral é

$$y(x) = a_0 y_1(x) + a_1 y_2(x),$$

em que

$$y_1(x) = 1 + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^k (\lambda - 2(2k - 2)) \cdots \lambda}{(2k)!} x^{2k}$$

$$y_2(x) = x + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^k (\lambda - 2(2k - 1)) \cdots (\lambda - 2)}{(2k + 1)!} x^{2k+1}$$

- (b) Da fórmula de recorrência segue-se que se $\lambda = 4N$, então $a_{2k} = 0$, para $k = N + 1, N + 2, \dots$ e se $\lambda = 2(2N + 1)$, então $a_{2k+1} = 0$, para $k = N + 1, N + 2, \dots$
- (c) $H_0(x) = 1, H_1(x) = x, H_2(x) = x^2 - 1, H_3(x) = x^3 - 3x, H_4(x) = x^4 - 6x^2 + 3$.

6.6. (a) Substituindo-se $y(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n$, $y'(x) = \sum_{n=0}^{\infty} (n+1) a_{n+1} x^n$ e $y''(x) = \sum_{n=0}^{\infty} (n+2)(n+1) a_{n+2} x^n$ na equação $(1-x^2)y'' - xy' + \alpha^2 y = 0$, obtemos

$$(1-x^2) \sum_{n=0}^{\infty} (n+2)(n+1) a_{n+2} x^n - x \sum_{n=0}^{\infty} (n+1) a_{n+1} x^n + \alpha^2 \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n = 0$$

$$\sum_{n=0}^{\infty} (n+2)(n+1) a_{n+2} x^n - x^2 \sum_{n=0}^{\infty} (n+2)(n+1) a_{n+2} x^n - \sum_{n=0}^{\infty} (n+1) a_{n+1} x^{n+1} + \alpha^2 \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n = 0$$

$$\sum_{n=0}^{\infty} (n+2)(n+1) a_{n+2} x^n - \sum_{n=0}^{\infty} (n+2)(n+1) a_{n+2} x^{n+2} - \sum_{n=0}^{\infty} (n+1) a_{n+1} x^{n+1} + \alpha^2 \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n = 0$$

$$\sum_{n=0}^{\infty} (n+2)(n+1) a_{n+2} x^n - \sum_{n=2}^{\infty} n(n-1) a_n x^n - \sum_{n=1}^{\infty} n a_n x^n + \alpha^2 \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n = 0$$

$$2a_2 + 6a_3x - a_1x + \alpha^2 a_0 + \alpha^2 a_1x + \sum_{n=2}^{\infty} [(n+2)(n+1)a_{n+2} - n(n-1)a_n - na_n + \alpha^2 a_n] x^n = 0$$

O que implica em

$$\begin{cases} 2a_2 + \alpha^2 a_0 = 0 \\ 6a_3 - (1 - \alpha^2) a_1 = 0 \\ (n+2)(n+1)a_{n+2} - n(n-1)a_n - na_n + \alpha^2 a_n = 0, n = 2, 3, \dots \end{cases}$$

$$\begin{cases} a_2 = -\frac{\alpha^2}{2}a_0 \\ a_3 = \frac{1-\alpha^2}{6}a_1 \\ a_{n+2} = \frac{n^2 - \alpha^2}{(n+2)(n+1)}a_n, \quad n = 2, 3, \dots \end{cases}$$

$$a_{2k} = \frac{((2k-2)^2 - \alpha^2) \cdots (-\alpha^2)}{(2k)!}a_0, \quad k = 1, 2, 3, \dots$$

$$a_{2k+1} = \frac{((2k-1)^2 - \alpha^2) \cdots (1 - \alpha^2)}{(2k+1)!}a_1, \quad k = 1, 2, \dots$$

Substituindo-se os valores a_n encontrados acima, na série de $y(x)$ obtemos

$$y(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n = \sum_{k=0}^{\infty} a_{2k} x^{2k} + \sum_{k=0}^{\infty} a_{2k+1} x^{2k+1} = a_0 \left(1 + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{((2k-2)^2 - \alpha^2) \cdots (-\alpha^2)}{(2k)!} x^{2k} \right) \\ + a_1 \left(x + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{((2k-1)^2 - \alpha^2) \cdots (1 - \alpha^2)}{(2k+1)!} x^{2k+1} \right)$$

Portanto, a solução geral é

$$y(x) = a_0 y_1(x) + a_1 y_2(x),$$

em que

$$y_1(x) = 1 + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{((2k-2)^2 - \alpha^2) \cdots (-\alpha^2)}{(2k)!} x^{2k}$$

$$y_2(x) = x + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{((2k-1)^2 - \alpha^2) \cdots (1 - \alpha^2)}{(2k+1)!} x^{2k+1}$$

(b) Da fórmula de recorrência segue-se que se $\alpha = 2N$, então $a_{2k} = 0$, para $k = N+1, N+2, \dots$ e se $\alpha = 2N+1$, então $a_{2k+1} = 0$, para $k = N+1, N+2, \dots$

(c) $T_0(x) = 1$, $T_1(x) = x$, $T_2(x) = 2x^2 - 1$, $T_3(x) = 4x^3 - 3x$, $T_4(x) = 8x^4 - 8x^2 + 1$

7. Mudança de Variáveis (página 411)

7.1. (a) $y'' + (y')^2 = 0$
Fazendo $y' = v$

$$v' + v^2 = 0$$

$$\frac{1}{v^2} v' = -1$$

$$\frac{d}{dv} \left(\frac{1}{v} \right) \frac{dv}{dt} = -1$$

$$\frac{1}{v} = t + c_1$$

Logo,

$$y' = v(t) = \frac{1}{t + c_1}$$

Integrando-se

$$y(t) = \ln |t + c_1| + c_2$$

(b) $ty'' = y'$
Fazendo $y' = v$

$$tv' = v$$

$$\frac{1}{v} v' = \frac{1}{t}$$

$$\frac{d}{dv} (\ln |v|) \frac{dv}{dt} = \frac{1}{t}$$

$$\ln |v| = \ln |t| + \tilde{c}_1$$

$$\frac{v}{t} = c_1$$

Logo,

$$y' = v(t) = c_1 t$$

Integrando-se

$$y(t) = c_1 \frac{t^2}{2} + c_2$$

(c) Fazendo $y' = v$

$$(1 + x^2)v' + 2xv = 2x^{-3}$$

Dividindo-se por $1 + x^2$

$$v' + \frac{2x}{1 + x^2}v = \frac{2}{x^3(1 + x^2)}.$$

Multiplicando-se a equação por $\mu(x) = e^{\int \frac{2x}{1+x^2} dx} = 1 + x^2$:

$$\frac{d}{dx} \left((1 + x^2)v \right) = \frac{2}{x^3}$$

Integrando-se obtemos

$$(1 + x^2)v(x) = -\frac{1}{x^2} + c_1$$

Logo,

$$\frac{dy}{dx} = v(x) = -\frac{1}{(1 + x^2)x^2} + \frac{c_1}{1 + x^2}$$

$$-\frac{1}{(1 + x^2)x^2} = \frac{A}{x} + \frac{B}{x^2} + \frac{Cx + D}{1 + x^2}$$

$$-1 = Ax(1 + x^2) + B(1 + x^2) + (Cx + D)x^2$$

Substituindo-se $x = 0$ obtemos $B = -1$. Comparando-se os termos de grau 2 obtemos $0 = B + D$ ou $D = 1$. Comparando-se os termos de grau 1 obtemos $0 = A$. Comparando-se os termos de grau 3 obtemos $0 = A + C$ ou $C = 0$. Assim,

$$\begin{aligned} \int -\frac{1}{(1 + x^2)x^2} dx &= -\int \frac{1}{x^2} + \frac{1}{1 + x^2} \\ &= \frac{1}{x} + \arctan x + C_2 \end{aligned}$$

E a solução da equação é

$$y(x) = \frac{1}{x} + c_1 \arctan x + c_2.$$

7.2. (a) $y'' + y(y')^3 = 0$

$$v = y' \quad y'' = \frac{dv}{dt} = v \frac{dv}{dy}$$

$$v \frac{dv}{dy} + yv^3 = 0$$

$$v = 0 \quad \text{ou} \quad \frac{dv}{dy} + yv^2 = 0$$

$$v = 0 \Rightarrow y(t) = c_1$$

ou

$$\frac{1}{v^2} \frac{dv}{dy} = -y$$

$$\frac{d}{dt} \left(-\frac{1}{v} \right) = -y$$

$$\frac{1}{v} = \frac{y^2}{2} + \tilde{c}_1$$

$$v = \frac{2}{y^2 + c_1}$$

Logo,

$$y' = v = \frac{2}{y^2 + c_1}$$

$$(y^2 + c_1)y' = 2$$

$$\frac{d}{dy} \left(\frac{y^3}{3} + c_1 y \right) y' = 2$$

A solução é dada implicitamente por

$$\frac{y^3}{3} + c_1 y = 2t + c_2$$

(b) $y^2 y'' - y' = 0$

$$v = y' \quad y'' = \frac{dv}{dt} = v \frac{dv}{dy}$$

$$y^2 v \frac{dv}{dy} - v = 0$$

$$v = 0 \quad \text{ou} \quad y^2 \frac{dv}{dy} - 1 = 0$$

$$v = 0 \quad \Rightarrow \quad y(t) = c_1$$

$$\frac{dv}{dy} = \frac{1}{y^2}$$

$$v = -\frac{1}{y} + c_1$$

Logo,

$$y' = v = -\frac{1}{y} + c_1$$

$$\frac{1}{-\frac{1}{y} + c_1} y' = 1$$

$$\frac{y}{c_1 y - 1} y' = 1$$

$$\frac{1}{c_1} \frac{c_1 y - 1 + 1}{c_1 y - 1} y' = 1$$

$$\frac{1}{c_1} \left(1 + \frac{1}{c_1 y - 1} \right) y' = 1$$

$$\frac{d}{dy} \left(y + \frac{1}{c_1} \ln |c_1 y - 1| \right) y' = c_1$$

A solução é dada implicitamente por

$$y + \frac{1}{c_1} \ln |c_1 y - 1| = c_1 t + c_2$$

(c) $y'' = (y')^3 + y'$

$$v = y' \quad y'' = \frac{dv}{dt} = v \frac{dv}{dy}$$

$$v \frac{dv}{dy} = v^3 + v$$

$$v = 0 \quad \text{ou} \quad \frac{dv}{dy} = v^2 + 1$$

$$v = 0 \quad \Rightarrow \quad y(t) = c_1$$

ou

$$\frac{dv}{dy} = v^2 + 1$$

$$\frac{1}{v^2 + 1} \frac{dv}{dy} = 1$$

$$\frac{d}{dv} \arctan v \frac{dv}{dy} = 1$$

$$\frac{d}{dy} \arctan v = 1$$

$$\arctan v = y + c_1$$

$$v = \tan(y + c_1)$$

$$y' = \tan(y + c_1)$$

$$\cotan(y + c_1)y' = 1$$

$$\begin{aligned} \int \cotan(y + c_1) dy &= \int \frac{\cos(y + c_1)}{\sen(y + c_1)} dy \\ &= \ln |\sen(y + c_1)| + C \end{aligned}$$

$$\frac{d}{dy} \ln |\sen(y + c_1)| y' = 1$$

$$\frac{d}{dt} \ln |\sen(y + c_1)| = 1$$

Integrando-se

$$\ln |\sen(y + c_1)| = t + C_2$$

$$\sen(y + c_1) = c_2 e^t$$

7.3. A substituição $t = \ln x$ transforma a equação de Euler

$$x^2 \frac{d^2 y}{dx^2} + bx \frac{dy}{dx} + cy = 0$$

numa equação linear com coeficientes constantes.

$$\frac{dy}{dx} = y' \frac{dt}{dx} = \frac{1}{x} y'$$

$$\begin{aligned}
 \frac{d^2 y}{dx^2} &= \frac{d}{dx} \left(\frac{dy}{dx} \right) = -\frac{1}{x^2} y' + \frac{1}{x} \frac{d}{dx} (y') \\
 &= -\frac{1}{x^2} y' + \frac{1}{x} \frac{d}{dt} (y') \frac{dt}{dx} \\
 &= -\frac{1}{x^2} y' + \frac{1}{x^2} y''
 \end{aligned}$$

Substituindo-se na equação de Euler obtemos a equação linear com coeficientes constantes

$$y'' + (b-1)y' + cy = 0.$$

(a) $x^2 y'' + 4xy' + 2y = 0$ Fazendo $t = \ln x$ a equação se transforma em

$$y'' + 3y' + 2y = 0.$$

Equação característica

$$r^2 + 3r + 2 = 0 \Leftrightarrow r = -2, -1$$

Solução geral:

$$y(x) = c_1 e^{-2 \ln x} + c_2 e^{-\ln x} = c_1 x^{-2} + c_2 x^{-1}$$

(b) $x^2 y'' - 3xy' + 4y = 0$ Fazendo $t = \ln x$ a equação se transforma em

$$y'' - 4y' + 4y = 0.$$

Equação característica

$$r^2 - 4r + 4 = 0 \Leftrightarrow r = 2$$

Solução geral:

$$y(x) = c_1 e^{2 \ln x} + c_2 e^{2 \ln x} \ln x = c_1 x^2 + c_2 x^2 \ln x$$

(c) $x^2 y'' + 3xy' + 5y = 0$ Fazendo $t = \ln x$ a equação se transforma em

$$y'' + 2y' + 5y = 0.$$

Equação característica

$$r^2 + 2r + 5 = 0 \Leftrightarrow r = -1 \pm 2i$$

Solução geral:

$$\begin{aligned} y(x) &= c_1 e^{-\ln x} \cos(2 \ln x) + c_2 e^{-\ln x} \sin(2 \ln x) \\ &= c_1 x^{-1} \cos(2 \ln x) + c_2 x^{-1} \sin(2 \ln x) \end{aligned}$$

7.4. Seja $u(t) = c_1 u_1(t) + c_2 u_2(t)$ a solução da equação homogênea correspondente. Então, a solução geral desta equação é

$$u(t) = c_1 u_1(t) + c_2 u_2(t) + u_p(t)$$

em que $u_p(t)$ é uma solução particular. Pelo método dos coeficientes a determinar

$$u_p(t) = A \cos(\omega t) + B \sin(\omega t).$$

$$u'_p(t) = \omega \cos(\omega t) B - \omega \sin(\omega t) A$$

$$u''_p(t) = -\omega^2 \sin(\omega t) B - \omega^2 \cos(\omega t) A$$

Substituindo-se $u_p(t)$, $u'_p(t)$ e $u''_p(t)$ na equação diferencial obtemos

$$(\omega B \gamma + (\omega_0^2 - \omega^2) m A) \cos \omega t + ((\omega_0^2 - \omega^2) m B - \omega A \gamma) \sin \omega t = F_0 \cos \omega t$$

Substituindo-se $t = 0$ e $t = \frac{\pi}{2\omega}$ obtemos o sistema

$$\begin{cases} (\omega_0^2 - \omega^2) m A + \omega \gamma B &= F_0 \\ -\omega \gamma A + (\omega_0^2 - \omega^2) m B &= 0 \end{cases}$$

encontramos

$$A = \frac{F_0 m (\omega_0^2 - \omega^2)}{\Delta}, \quad B = \frac{F_0 \gamma \omega}{\Delta},$$

em que $\Delta = m^2(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \gamma^2 \omega^2$. Logo, uma solução particular da equação diferencial é

$$u_p(t) = \frac{F_0 m (\omega_0^2 - \omega^2)}{\Delta} \cos(\omega t) + \frac{F_0 \gamma \omega}{\Delta} \sin(\omega t).$$

3

TRANSFORMADA DE LAPLACE

3.1 Introdução

A transformada de Laplace pode ser usada para resolver problemas de valor inicial da forma

$$Ay'' + By' + Cy = f(t), \quad y(0) = y_0, \quad y'(0) = y'_0, \quad \text{para } A, B, C \in \mathbb{R}$$

Para isso, a equação diferencial é inicialmente transformada pela transformada de Laplace numa equação algébrica. Depois resolve-se a equação algébrica e finalmente transforma-se de volta a solução da equação algébrica na solução da equação diferencial inicial.

A transformada de Laplace pode ser entendida como a “caixa” da [Figura 3.1](#). Do lado esquerdo entram as funções originais e do lado direito saem as funções transformadas pela transformada de Laplace.

A **transformada de Laplace** de uma função $f : [0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}$ (ou \mathbb{C}) é definida por

$$\mathcal{L}(f)(s) = F(s) = \int_0^{\infty} e^{-st} f(t) dt.$$

para todo $s > 0$ tal que a integral acima converge. Representaremos a função original por uma letra minúscula e a sua variável por t . Enquanto a transformada de Laplace será representada pela letra correspondente maiúscula e a sua variável por s . Por exemplo, as transformadas de Laplace das funções $f(t)$, $g(t)$ e $h(t)$ serão representadas por $F(s)$, $G(s)$ e $H(s)$, respectivamente.

Vamos calcular a transformada de Laplace de várias funções, que serão as funções elementares, e apresentar propriedades da transformada de Laplace que possibilitarão calcular a transformada de Laplace de muitas outras funções. A transformada de Laplace das funções elementares estão agrupadas na tabela na página 566 e podem ser consultadas a qualquer momento.

Exemplo 3.1. A transformada de Laplace da função $f : [0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}$ definida por $f(t) = 1$ é dada por

$$F(s) = \int_0^{\infty} e^{-st} 1 dt = \left. \frac{e^{-st}}{-s} \right|_0^{\infty} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{e^{-sT}}{-s} - \frac{e^{-s0}}{-s} = 0 - \frac{e^{-s0}}{-s} = \frac{1}{s}, \quad \text{para } s > 0.$$

Exemplo 3.2. Seja a uma constante real. A transformada de Laplace da função $f : [0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}$ definida por $f(t) = e^{at}$ é dada por

$$\begin{aligned} F(s) &= \int_0^{\infty} e^{-st} e^{at} dt = \int_0^{\infty} e^{-(s-a)t} dt = \left. \frac{e^{-(s-a)t}}{a-s} \right|_0^{\infty} \\ &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{e^{-(s-a)T}}{a-s} - \frac{e^{-(s-a)0}}{a-s} = 0 - \frac{1}{a-s} = \frac{1}{s-a}, \quad \text{para } s > a. \end{aligned}$$

Exemplo 3.3. Seja a uma constante real. Vamos determinar a transformada de Laplace das funções $f : [0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}$ dada por $f(t) = \cos at$ e $g : [0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}$ dada por $g(t) = \sin at$. Para isso, vamos calcular a transformada de Laplace da função $h : [0, \infty) \rightarrow \mathbb{C}$ definida por $h(t) = e^{iat}$, que pela fórmula de Euler é tal que $h(t) = \cos at + i \sin at$.

$$\begin{aligned} H(s) &= \int_0^{\infty} e^{-st} e^{iat} dt = \int_0^{\infty} e^{-(s-ia)t} dt = \left. \frac{e^{-(s-ia)t}}{-(s-ia)} \right|_0^{\infty} \\ &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{e^{-sT}(\cos aT + i \sin aT)}{-(s-ia)} - \frac{e^{-(s-ia)0}}{-(s-ia)} = 0 - \frac{e^{-(s-ia)0}}{ia-s} \\ &= \frac{1}{s-ia}, \quad \text{para } s > 0. \end{aligned}$$

Por outro lado

$$H(s) = \mathcal{L}(h)(s) = \int_0^{\infty} e^{-st} (\cos at + i \sin at) dt = \mathcal{L}(f)(s) + i \mathcal{L}(g)(s) = F(s) + iG(s).$$

Assim, a **parte real** de $H(s)$ é igual a $F(s)$, $\operatorname{Re}\{H(s)\} = F(s)$, e a **parte imaginária** de $H(s)$ é igual a $G(s)$, $\operatorname{Im}\{H(s)\} = G(s)$. Como

$$H(s) = \frac{1}{s-ia} = \frac{s+ia}{(s-ia)(s+ia)} = \frac{s+ia}{s^2+a^2},$$

então a transformada de Laplace de $f(t) = \cos at$ é

$$F(s) = \operatorname{Re}\left\{\frac{1}{s-ia}\right\} = \frac{s}{s^2+a^2}, \quad \text{para } s > 0$$

e a transformada de Laplace de $g(t) = \sin at$ é

$$G(s) = \operatorname{Im}\left\{\frac{1}{s-ia}\right\} = \frac{a}{s^2+a^2}, \quad \text{para } s > 0.$$

Exemplo 3.4. Seja n um inteiro positivo. Vamos calcular a transformada de Laplace da função $f_n : [0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}$ dada por $f_n(t) = t^n$, para $n = 0, 1, 2, \dots$. Usando integração por partes temos que

$$\begin{aligned} F_n(s) &= \int_0^{\infty} e^{-st} t^n dt = \left. \frac{t^n e^{-st}}{-s} \right|_0^{\infty} - \frac{n}{-s} \int_0^{\infty} e^{-st} t^{n-1} dt \\ &= \frac{n}{s} \int_0^{\infty} e^{-st} t^{n-1} dt = \frac{n}{s} F_{n-1}(s). \end{aligned}$$

Aplicando-se recursivamente a fórmula obtida obtemos

$$F_n(s) = \frac{n(n-1)}{s^2} F_{n-2}(s) = \frac{n(n-1) \dots 1}{s^n} F_0(s).$$

Mas $F_0(s)$ é a transformada de Laplace da função constante 1, ou seja, $F_0(s) = \frac{1}{s}$.

Assim, a transformada de Laplace de $f_n(t) = t^n$, para $n = 0, 1, 2, \dots$ é

$$F_n(s) = \frac{n!}{s^{n+1}}, \quad \text{para } s > 0.$$

Para calcular a transformada de Laplace de outras funções vamos usar as propriedades que apresentaremos a seguir.

Teorema 3.1 (Linearidade). *Se a transformada de Laplace de $f(t)$ é $F(s)$, para $s > a_1$, e a transformada de Laplace de $g(t)$ é $G(s)$, para $s > a_2$, então para quaisquer constantes α e β*

$$\mathcal{L}(\alpha f + \beta g)(s) = \alpha \mathcal{L}(f)(s) + \beta \mathcal{L}(g)(s) = \alpha F(s) + \beta G(s), \quad \text{para } s > \max\{a_1, a_2\}.$$

Demonstração.

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L}(\alpha f + \beta g)(s) &= \int_0^{\infty} e^{-st}(\alpha f(t) + \beta g(t))dt \\
 &= \alpha \int_0^{\infty} e^{-st} f(t)dt + \beta \int_0^{\infty} e^{-st} g(t)dt \\
 &= \alpha \mathcal{L}(f)(s) + \beta \mathcal{L}(g)(s)
 \end{aligned}$$

■

Exemplo 3.5. A transformada de Laplace do polinômio $f(t) = 2t^2 + 3t + 5$ é pelo Teorema 3.1 e usando o resultado do Exemplo 3.4

$$F(s) = 2\frac{2}{s^3} + 3\frac{1}{s^2} + 5\frac{1}{s}.$$

Exemplo 3.6. Seja a uma constante real. Pelo Teorema anterior a transformada de Laplace do cosseno hiperbólico de at , $f(t) = \cosh(at) = \frac{e^{at} + e^{-at}}{2}$, é dada por

$$F(s) = \frac{1}{2} \frac{1}{s-a} + \frac{1}{2} \frac{1}{s+a} = \frac{s}{s^2 - a^2}, \quad \text{para } s > |a|.$$

Exemplo 3.7. Seja a uma constante real. Pelo Teorema anterior a transformada de

Laplace do seno hiperbólico de at , $f(t) = \sinh(at) = \frac{e^{at} - e^{-at}}{2}$, é dada por

$$F(s) = \frac{1}{2} \frac{1}{s-a} - \frac{1}{2} \frac{1}{s+a} = \frac{a}{s^2 - a^2}, \quad \text{para } s > |a|.$$

Dizemos que uma função $f(t)$ é **seccionalmente contínua** ou **contínua por partes** em um intervalo $[a, b]$ se $f(t)$ é contínua em $[a, b]$ exceto possivelmente em um número finito de pontos, nos quais os limites laterais existem. Dizemos que uma função $f(t)$ é **seccionalmente contínua** ou **contínua por partes** em um intervalo $[a, \infty)$ se $f(t)$ é seccionalmente contínua para todo intervalo da forma $[a, A]$, com $A > a$.

Se a função $f(t)$ crescer muito rápido ela pode não ter transformada de Laplace, como por exemplo $f(t) = e^{t^2}$ (veja o Exercício 1.6 na página 507). Isto não acontece para funções $f(t)$, para as quais existem $M > 0$ e $k > 0$ tais que,

$$|f(t)| \leq Me^{kt}, \quad \text{para todo } t > 0. \quad (3.1)$$

Chamamos **funções admissíveis** às funções seccionalmente contínuas que satisfazem (3.1).

Se duas funções admissíveis têm a mesma transformada de Laplace então elas são iguais exceto possivelmente nos pontos de descontinuidade, como enunciado a seguir e demonstrado ao final desta seção na página 502.

Teorema 3.2 (Injetividade). Dadas duas funções $f(t)$ e $g(t)$ admissíveis se

$$\mathcal{L}(f)(s) = \mathcal{L}(g)(s), \quad \text{para } s > a,$$

então $f(t) = g(t)$, exceto possivelmente nos pontos de descontinuidade.

Portanto, se $F(s)$ é a transformada de Laplace de uma função admissível $f(t)$, esta função está determinada a menos dos pontos de descontinuidade e dizemos que $f(t)$ é a **Transformada de Laplace inversa** de $F(s)$ e escrevemos simplesmente

$$\mathcal{L}^{-1}(F)(t) = f(t),$$

considerando duas funções iguais, se elas forem iguais em todos os pontos onde ambas são contínuas.

Exemplo 3.8. Se a transformada de Laplace de uma função $f(t)$ é

$$F(s) = \frac{s+3}{s^2-3s+2}$$

então vamos determinar a função $f(t)$. Para isso vamos decompor $F(s)$ em frações parciais. O denominador de $F(s)$ tem duas raízes reais $s=1$ e $s=2$. Assim,

$$F(s) = \frac{s+3}{(s-1)(s-2)} = \frac{A}{s-1} + \frac{B}{s-2},$$

em que A e B são constantes a determinar. Multiplicando $F(s)$ por $(s-1)(s-2)$ obtemos

$$s+3 = A(s-2) + B(s-1)$$

Substituindo-se $s=1$ e $s=2$ obtemos

$$4 = -A \quad \text{e} \quad 5 = B$$

Assim,

$$F(s) = \frac{s+3}{(s-1)(s-2)} = -4\frac{1}{s-1} + 5\frac{1}{s-2}$$

e a função cuja transformada é $F(s)$ é

$$f(t) = -4e^t + 5e^{2t}.$$

Teorema 3.3 (1º Teorema de Deslocamento). *Seja a uma constante. Se a transformada de Laplace da função $f: [0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}$ é $F(s)$, para $s > c$, então a transformada de Laplace da função*

$$g(t) = e^{at} f(t)$$

é

$$G(s) = F(s-a), \quad \text{para } s > a+c$$

Demonstração.

$$G(s) = \int_0^{\infty} e^{-st} e^{at} f(t) dt = \int_0^{\infty} e^{-(s-a)t} f(t) dt = F(s-a)$$



Exemplo 3.9. Sejam $a, b \in \mathbb{R}$. Se $g(t) = \cos(at)$, então pelo Exemplo 3.3 na página 491

$$G(s) = \frac{s}{s^2 + a^2}.$$

Pelo 1º Teorema de Deslocamento

$$\mathcal{L}[e^{bt}g(t)](s) = G(s-b).$$

Logo, se $f : [0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}$ é dada por $f(t) = e^{bt} \cos at$ então a sua transformada de Laplace é dada por

$$F(s) = \frac{s-b}{(s-b)^2 + a^2}, \quad \text{para } s > b.$$

Exemplo 3.10. Sejam $a, b \in \mathbb{R}$. Pelo 1º Teorema de Deslocamento e o Exemplo 3.3 na página 491 obtemos que a transformada de Laplace de $f : [0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}$ dada por $f(t) = e^{bt} \sin at$ é dada por

$$F(s) = \frac{a}{(s-b)^2 + a^2}, \quad \text{para } s > b.$$

Exemplo 3.11. Seja $a \in \mathbb{R}$ e n um inteiro positivo. Pelo 1º Teorema de Deslocamento e o Exemplo 3.4 na página 492 obtemos que a transformada de Laplace de $f: [0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}$ dada por $f(t) = e^{at} t^n$ é dada por

$$F(s) = \frac{n!}{(s-a)^{n+1}}, \quad \text{para } s > a.$$

Exemplo 3.12. Se a transformada de Laplace de uma função $f(t)$ é

$$F(s) = \frac{s-3}{s^2+4s+4}$$

então vamos determinar a função $f(t)$. Para isso vamos decompor $F(s)$ em frações parciais. O denominador de $F(s)$ tem somente uma raiz real, $s = -2$. Assim,

$$F(s) = \frac{s-3}{(s+2)^2} = \frac{A}{s+2} + \frac{B}{(s+2)^2},$$

em que A e B são constantes a determinar. Multiplicando $F(s)$ por $(s+2)^2$ obtemos

$$s-3 = A(s+2) + B \quad (3.2)$$

Substituindo-se $s = -2$ obtemos

$$-5 = B.$$

Comparando-se os coeficientes dos termos de grau 1 em (3.2) obtemos

$$1 = A.$$

Assim,

$$F(s) = \frac{s-3}{(s+2)^2} = \frac{1}{s+2} - 5 \frac{1}{(s+2)^2}.$$

Observando a Tabela na página 566, usando o 1º Teorema de Deslocamento e o Teorema da Linearidade vemos que a função cuja transformada de Laplace é $F(s)$ é dada por

$$f(t) = e^{-2t} - 5e^{-2t}t.$$

Exemplo 3.13. Se a transformada de Laplace de uma função $f(t)$ é

$$F(s) = \frac{s-2}{2s^2 + 2s + 7/2}$$

então vamos determinar a função $f(t)$. Como não podemos fatorar o denominador em fatores lineares com coeficientes reais, então não podemos decompor $F(s)$ em frações parciais. Vamos completar o quadrado do denominador, ou seja, vamos reescrever $F(s)$ da seguinte forma

$$F(s) = \frac{s-2}{2s^2 + 2s + 7/2} = \frac{s-2}{2[s^2 + s + 7/4]} = \frac{s-2}{2[(s+1/2)^2 + 3/2]}.$$

Pela forma do denominador vemos que temos que usar o 1º Teorema de Deslocamento. Mas, para isso tem que aparecer um múltiplo de $s+1/2$ no numerador. Conseguimos isso somando e subtraindo $1/2$ no numerador, ou seja,

$$\begin{aligned} F(s) &= \frac{s+1/2-1/2-2}{2[(s+1/2)^2 + 3/2]} = \frac{s+1/2}{2[(s+1/2)^2 + 3/2]} - \frac{5/2}{2[(s+1/2)^2 + 3/2]} \\ &= \frac{1}{2} \frac{s+1/2}{(s+1/2)^2 + 3/2} - \frac{5}{4} \frac{1}{(s+1/2)^2 + 3/2} \\ &= \frac{1}{2} \frac{s+1/2}{(s+1/2)^2 + 3/2} - \frac{5}{4} \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \frac{\sqrt{3/2}}{(s+1/2)^2 + 3/2} \end{aligned}$$

Observando a Tabela na página 566, usando o 1º Teorema de Deslocamento e o Teorema da Linearidade vemos que a função cuja transformada de Laplace é $F(s)$ é

dada por

$$f(t) = \frac{1}{2}e^{-t/2} \cos\left(\sqrt{\frac{3}{2}}t\right) - \frac{5}{4}\sqrt{\frac{2}{3}}e^{-t/2} \sin\left(\sqrt{\frac{3}{2}}t\right).$$

Explicação para a transformada inversa de $\frac{s+1/2}{(s+1/2)^2+3/2}$:

Pelo 1º Teorema de Deslocamento

$$\mathcal{L}[e^{at}g(t)](s) = G(s-a) \quad \text{ou} \quad \mathcal{L}^{-1}[G(s-a)](t) = e^{at}g(t).$$

Se $G(s+1/2) = \frac{s+1/2}{(s+1/2)^2+3/2}$, então $G(s) = \frac{s}{s^2+3/2}$ e pela a Tabela na página

566, temos que $g(t) = \cos\left(\sqrt{\frac{3}{2}}t\right)$. Logo,

$$\mathcal{L}^{-1}[G(s+1/2)](t) = e^{-t/2}g(t) = e^{-t/2} \cos\left(\sqrt{\frac{3}{2}}t\right).$$

Explicação para a transformada inversa de $\frac{1}{(s+1/2)^2+3/2}$:

Se $G(s+1/2) = \frac{1}{(s+1/2)^2+3/2}$, então

$$G(s) = \frac{1}{s^2+3/2} = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{\sqrt{3/2}}{s^2+3/2}$$

e pela a Tabela na página 566, temos que $g(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} \sin\left(\sqrt{\frac{3}{2}}t\right)$. Logo,

$$\mathcal{L}^{-1}[G(s+1/2)](t) = e^{-t/2}g(t) = \sqrt{\frac{2}{3}}e^{-t/2} \sin\left(\sqrt{\frac{3}{2}}t\right).$$

3.1.1 Demonstração da Injetividade da Transformada de Laplace

Demonstração do Teorema 3.2 na página 496. Pela linearidade da transformada de Laplace, basta provarmos que se $\mathcal{L}(h)(s) = 0$, para $s > a$, então $h(t) = 0$, para todos os valores de $t > 0$ para os quais $h(t)$ é contínua. Vamos provar somente para o caso em que $h(t)$ seja contínua. Seja $n = 1, 2, \dots$

$$0 = \mathcal{L}(h)(a + n) = \int_0^{\infty} e^{-nt} e^{-at} h(t) dt.$$

Façamos a mudança de variáveis $t = -\ln x$ e definamos $v(x) = e^{a \ln x} h(-\ln x)$. Então,

$$0 = \int_0^{\infty} e^{-nt} e^{-at} h(t) dt = \int_0^1 x^{n-1} v(x) dx. \quad (3.3)$$

Seja $\epsilon > 0$. Existe um polinômio $p(x)$ tal que

$$\int_0^1 |p(x) - v(x)|^2 dx < \epsilon.$$

A existência de tal polinômio é uma consequência imediata do Teorema de aproximação de Weierstrass que será demonstrado a seguir. De (3.3) segue-se que

$$\int_0^1 p(x) v(x) dx = 0.$$

Então,

$$\int_0^1 |p(x) - v(x)|^2 dx = \int_0^1 |p(x)|^2 dx + \int_0^1 |v(x)|^2 dx < \epsilon.$$

Logo,

$$\int_0^1 |v(x)|^2 dx < \epsilon.$$

Como ϵ é um número positivo arbitrário, então $v(x) = 0$, para $0 < x \leq 1$. Logo, $h(t) = 0$, para $t > 0$. ■

Teorema 3.4 (Teorema da Aproximação de Weierstrass). *Seja $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ uma função contínua. Para todo $\epsilon > 0$, existe um polinômio $p(t)$ tal que $|f(t) - p(t)| < \epsilon$, para todo $t \in [a, b]$.*

Demonstração. Seja $t = (1 - x)a + xb$. Então, $x = \frac{1}{b-a}(t-a)$ e $t \in [a, b]$ se, e somente se, $x \in [0, 1]$. Seja $\tilde{f} : [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}$ definida por $\tilde{f}(x) = f((1-x)a + xb)$. Seja

$$\tilde{p}(x) = \sum_{k=0}^n \tilde{f}\left(\frac{k}{n}\right) \binom{n}{k} x^k (1-x)^{n-k} \quad \text{e} \quad p(t) = \tilde{p}\left(\frac{1}{b-a}(t-a)\right).$$

Este polinômio é chamado de **polinômio de Bernstein**.

Vamos usar o fato de que

$$\sum_{k \in A} \binom{n}{k} x^k (1-x)^{n-k} \leq \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} x^k (1-x)^{n-k} = 1, \quad (3.4)$$

para qualquer $A \subseteq \{0, 1, 2, \dots, n\}$.

Como f é contínua existe $\delta > 0$ tal que

$$|x - y| < \delta \quad \Rightarrow \quad |\tilde{f}(x) - \tilde{f}(y)| < \frac{\epsilon}{2}. \quad (3.5)$$

Sejam $b_1 = x - \delta$ e $b_2 = x + \delta$. Seja $M = \max_{x \in [0,1]} |\tilde{f}(x)| = \max_{t \in [a,b]} |f(t)|$. Seja n tal que $4Me^{-2\delta^2 n} < \frac{\epsilon}{2}$. Vamos usar o seguinte fato que será demonstrado a seguir:

$$b_2 \leq \frac{k}{n} \leq 1 \text{ ou } 0 \leq \frac{k}{n} \leq b_1 \quad \Rightarrow \quad x^{\frac{k}{n}} (1-x)^{1-\frac{k}{n}} \leq e^{-2(x-b)^2} b^{\frac{k}{n}} (1-b)^{1-\frac{k}{n}}. \quad (3.6)$$

Então, por (3.4), (3.5) e (3.6) temos que

$$\begin{aligned}
 |\tilde{f}(x) - \tilde{p}(x)| &= \left| \sum_{k=0}^n \tilde{f}(x) \binom{n}{k} x^k (1-x)^{n-k} - \sum_{k=0}^n \tilde{f}\left(\frac{k}{n}\right) \binom{n}{k} x^k (1-x)^{n-k} \right| \leq \\
 &\leq \sum_{k=0}^n |\tilde{f}\left(\frac{k}{n}\right) - \tilde{f}(x)| \binom{n}{k} x^k (1-x)^{n-k} \leq \\
 &\leq \frac{\epsilon}{2} + \sum_{|\frac{k}{n} - x| \geq \delta} |\tilde{f}\left(\frac{k}{n}\right) - \tilde{f}(x)| \binom{n}{k} x^k (1-x)^{n-k} \leq \\
 &\leq \frac{\epsilon}{2} + 2M \sum_{\frac{k}{n} \geq b_2} \binom{n}{k} x^k (1-x)^{n-k} + 2M \sum_{\frac{k}{n} \leq b_1} \binom{n}{k} x^k (1-x)^{n-k} \leq \\
 &\leq \frac{\epsilon}{2} + 2Me^{-2\delta^2 n} \sum_{\frac{k}{n} \geq b_2} \binom{n}{k} b_2^k (1-b_2)^{n-k} + 2Me^{-2\delta^2 n} \sum_{\frac{k}{n} \leq b_1} \binom{n}{k} b_1^k (1-b_1)^{n-k} \\
 &\leq \frac{\epsilon}{2} + 4Me^{-2\delta^2 n} \leq \epsilon.
 \end{aligned}$$

■

Lema 3.5. Se $0 \leq x < b \leq \frac{k}{n} \leq 1$ ou $0 \leq \frac{k}{n} \leq b < x \leq 1$, então

$$x^{\frac{k}{n}} (1-x)^{1-\frac{k}{n}} \leq e^{-2(x-b)^2} b^{\frac{k}{n}} (1-b)^{1-\frac{k}{n}}.$$

Demonstração. Precisamos mostrar que

$$\frac{x^{\frac{k}{n}}(1-x)^{1-\frac{k}{n}}}{b^{\frac{k}{n}}(1-b)^{1-\frac{k}{n}}} \leq e^{-2(x-b)^2},$$

ou aplicando-se o logaritmo nesta desigualdade, que

$$H(x) = \ln \frac{x^{\frac{k}{n}}(1-x)^{1-\frac{k}{n}}}{b^{\frac{k}{n}}(1-b)^{1-\frac{k}{n}}} + 2(x-b)^2 \leq 0.$$

Temos que $H(b) = 0$.

(a) Se $0 < x < b \leq \frac{k}{n} \leq 1$, vamos mostrar que $H'(x) \geq 0$. Como, para $0 < x < 1$, $x(1-x) \leq \frac{1}{4}$, então

$$H'(x) = \frac{\frac{k}{n} - x}{x(1-x)} + 4(x-b) \geq 4\left(\frac{k}{n} - x\right) + 4(x-b) = 4\left(\frac{k}{n} - b\right) \geq 0.$$

(b) Se $0 \leq \frac{k}{n} \leq b < x < 1$, vamos mostrar que $H'(x) \leq 0$. Como, para $0 < x < 1$, $4 \leq \frac{1}{x(1-x)}$, então

$$H'(x) = \frac{\frac{k}{n} - x}{x(1-x)} + 4(x-b) \leq \frac{\frac{k}{n} - x}{x(1-x)} + \frac{x-b}{x(1-x)} = \frac{\frac{k}{n} - b}{x(1-x)} \leq 0.$$

■

Exercícios (respostas na página 567)

1.1. Determine a transformada de Laplace inversa da função

$$F(s) = \frac{2s - 5}{s(s^2 + s - 12)},$$

ou seja, uma função, $f(t)$, cuja transformada de Laplace é a função dada, $F(s)$.

1.2. Considere $\mathcal{L}(y)(s) = Y(s)$. Determine $y(t)$:

(a) $Y(s) = \frac{2}{s^2(s+2)(s-1)} + \frac{1}{(s+2)(s-1)}$

(b) $Y(s) = \frac{3}{(s-1)(s^2+4)}$

1.3. Seja a uma constante. Sabendo-se que a transformada de Laplace de $f(t) = \sin at$ é

$$F(s) = \frac{a}{s^2 + a^2}, \quad s > 0$$

e a de $g(t) = t \cos at$ é

$$G(s) = \frac{s^2 - a^2}{(s^2 + a^2)^2}, \quad s > 0$$

mostre que a transformada de Laplace de $h(t) = \sin at - at \cos at$ é

$$H(s) = \frac{2a^3}{(s^2 + a^2)^2}, \quad s > 0.$$

1.4. Encontre a transformada de Laplace inversa de

$$Y(s) = \frac{2s - 1}{(s^2 - 1)(4s^2 + 4s + 5)}.$$

- 1.5. Mostre que se $f(t)$ é seccionalmente contínua e existem $k > 0$ e $M > 0$ tais que

$$|f(t)| \leq Me^{kt}, \quad \text{para todo } t > 0,$$

então existe a transformada de Laplace de $f(t)$, $\mathcal{L}(f)(s) = F(s)$, definida para $s > k$ e além disso

$$\lim_{s \rightarrow \infty} \mathcal{L}(f)(s) = 0.$$

- 1.6. Mostre que $f(t) = e^{t^2}$ não tem transformada de Laplace. (Sugestão: troque $t^2 - st$ por sua reta tangente em $t = s$.)
- 1.7. (Função Gama) A função gama é definida pela integral imprópria

$$\Gamma(p) = \int_0^{\infty} t^{p-1} e^{-t} dt, \quad \text{para } p > 0.$$

- (a) Mostre que $\Gamma(p+1) = p\Gamma(p)$, para $p > 0$.
- (b) Mostre que $\Gamma(n+1) = n!$, para $n = 1, 2, 3, \dots$.
- (c) Seja $p > 0$. Mostre que $\mathcal{L}(t^p)(s) = \frac{\Gamma(p+1)}{s^{p+1}}$, para $s > 0$.
- (d) Usando o fato de que $\Gamma(\frac{1}{2}) = \sqrt{\pi}$, mostre que $\mathcal{L}(t^{1/2})(s) = \frac{\sqrt{\pi}}{2s^{3/2}}$.

3.2 Problemas de Valor Inicial

O próximo resultado mostra o efeito de aplicar a transformada de Laplace na derivada de uma função.

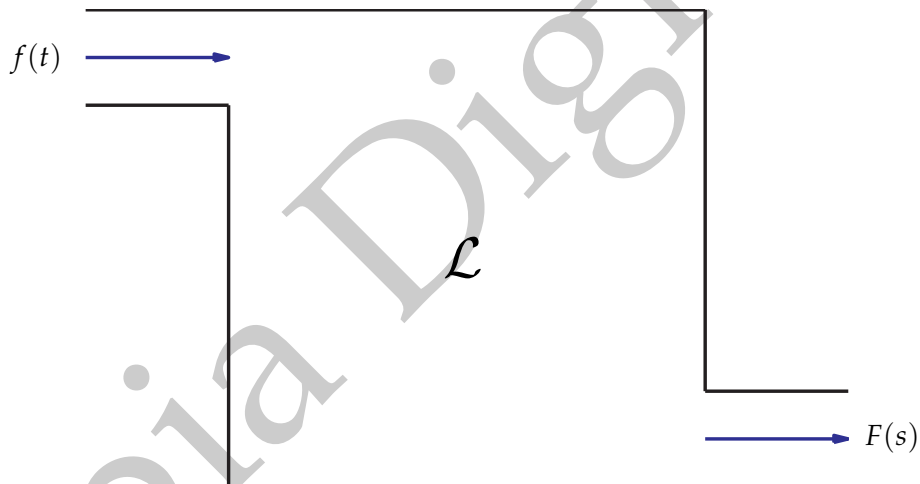


Figura 3.1. Transformada de Laplace como uma “caixa”

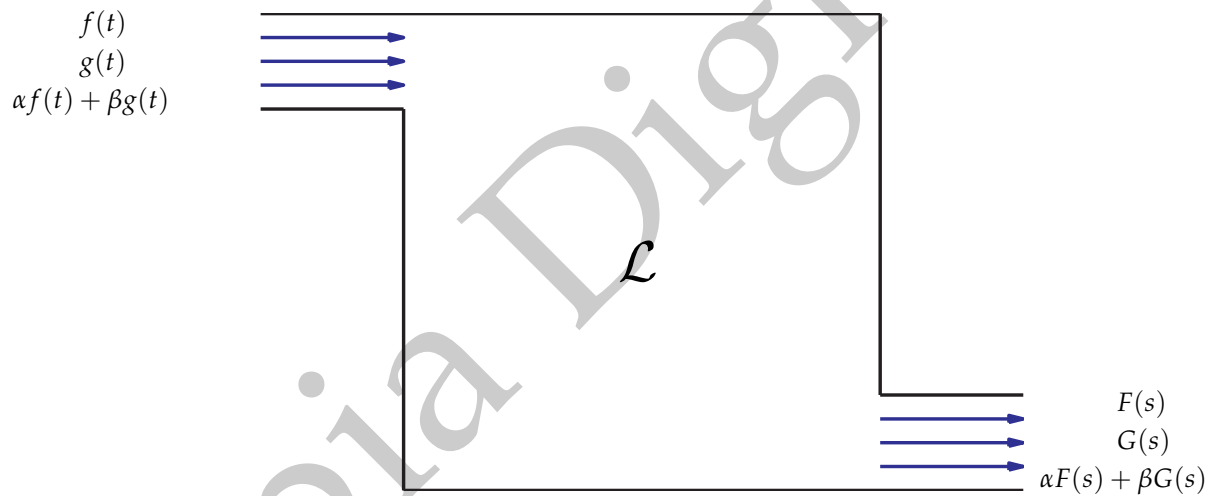


Figura 3.2. Transformada de Laplace de uma combinação linear

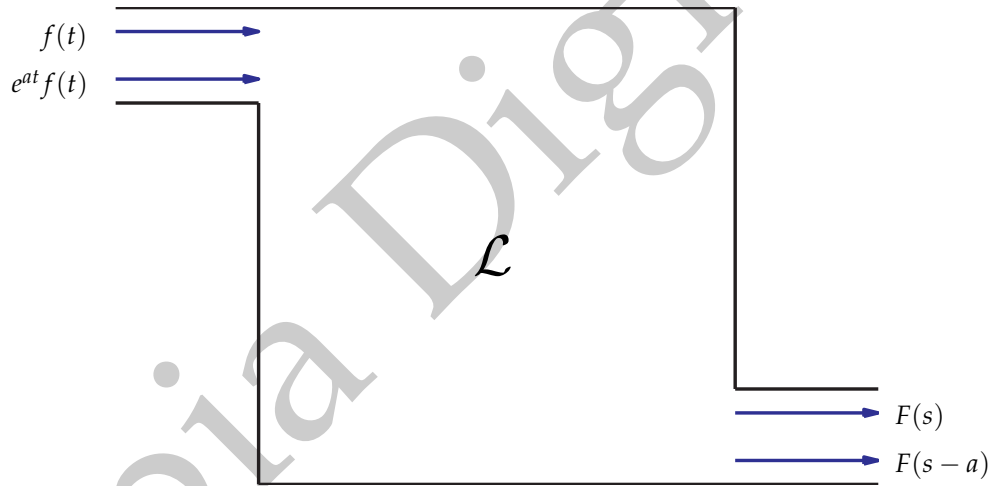


Figura 3.3. 1º Teorema de Deslocamento

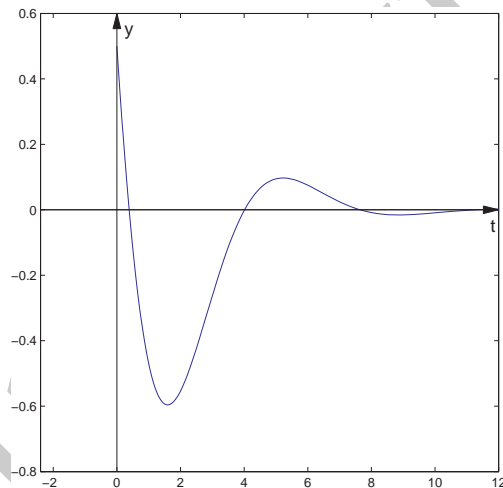


Figura 3.4. $f(t) = \frac{1}{2}e^{-t/2} \cos\left(\sqrt{\frac{3}{2}} t\right) - \frac{5}{4}\sqrt{\frac{2}{3}}e^{-t/2} \text{sen}\left(\sqrt{\frac{3}{2}} t\right)$

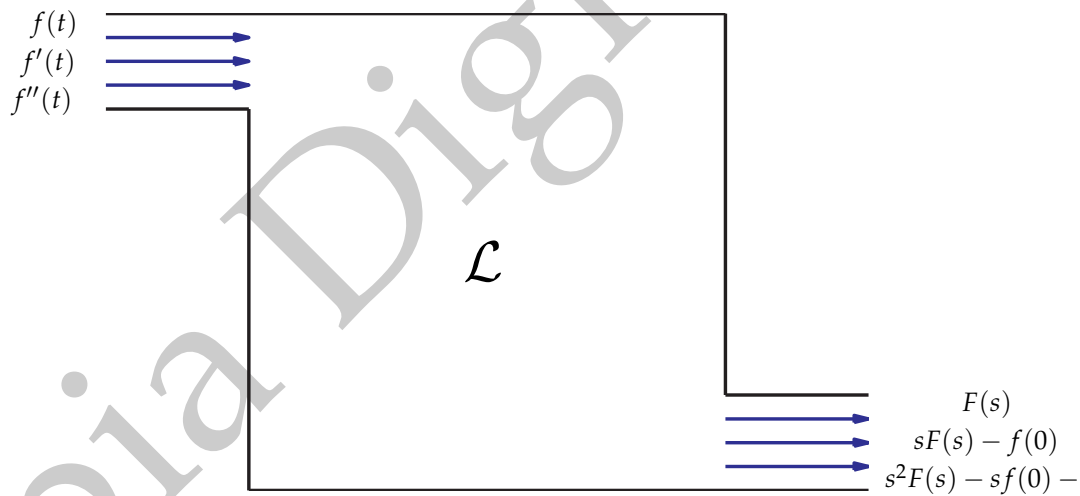


Figura 3.5. Transformada de Laplace das Derivadas

Teorema 3.6 (Derivação). *Seja $f : [0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}$ uma função admissível e contínua.*

(a) *Se $f'(t)$ é seccionalmente contínua, então*

$$\mathcal{L}(f')(s) = sF(s) - f(0),$$

em que $F(s)$ é a transformada de Laplace de $f(t)$.

(b) *Se $f'(t)$ é admissível e contínua e $f''(t)$ é seccionalmente contínua, então*

$$\mathcal{L}(f'')(s) = s^2F(s) - sf(0) - f'(0),$$

em que $F(s)$ é a transformada de Laplace de $f(t)$.

Demonstração. (a) Vamos provar para o caso em que $f'(t)$ é contínua.

$$\begin{aligned}\mathcal{L}(f')(s) &= \int_0^{\infty} e^{-st} f'(t) dt \\ &= e^{-st} f(t) \Big|_0^{\infty} - (-s) \int_0^{\infty} e^{-st} f(t) dt \\ &= -f(0) + sF(s),\end{aligned}$$

pois como $f(t)$ é admissível, $\lim_{T \rightarrow \infty} e^{-sT} f(T) = 0$, para $s > k$.

(b) Vamos provar para o caso em que $f''(t)$ é contínua. Usando o item anterior:

$$\begin{aligned}\mathcal{L}(f'')(s) &= -f'(0) + s\mathcal{L}(f')(s) \\ &= -f'(0) + s(-f(0) + sF(s)) \\ &= -f'(0) - sf(0) + s^2F(s)\end{aligned}$$

■

Podemos usar a Transformada de Laplace para resolver problemas de valor inicial da forma

$$ay'' + by' + cy = f(t), \quad y(0) = y_0, \quad y'(0) = y'_0, \quad \text{para } a, b, c \in \mathbb{R}, a \neq 0.$$

Para isso, aplicando a Transformada de Laplace na equação diferencial e usando a linearidade obtemos

$$a\mathcal{L}(y'') + b\mathcal{L}(y') + c\mathcal{L}(y) = \mathcal{L}(f).$$

Depois, usamos que $\mathcal{L}(y'')(s) = s^2Y(s) - sy(0) - y'(0)$ e $\mathcal{L}(y')(s) = sY(s) - y(0)$. Vejamos o próximo exemplo.

Exemplo 3.14. Vamos resolver o seguinte problema de valor inicial

$$y'' + y' - 2y = 2t, \quad y(0) = 0, \quad y'(0) = 1.$$

Aplicando-se a transformada de Laplace à equação diferencial acima obtemos

$$(s^2Y(s) - sy(0) - y'(0)) + (sY(s) - y(0)) - 2Y(s) = 2\frac{1}{s^2}.$$

Substituindo-se os valores $y(0) = 0$ e $y'(0) = 1$ obtemos

$$(s^2 + s - 2)Y(s) = \frac{2}{s^2} + 1.$$

Assim,

$$\begin{aligned} Y(s) &= \frac{2}{s^2(s+2)(s-1)} + \frac{1}{(s+2)(s-1)} \\ &= \frac{2+s^2}{s^2(s+2)(s-1)} = \frac{A}{s} + \frac{B}{s^2} + \frac{C}{s+2} + \frac{D}{s-1} \end{aligned}$$

Multiplicando-se por $s^2(s+2)(s-1)$ obtemos

$$s^2 + 2 = As(s+2)(s-1) + B(s+2)(s-1) + Cs^2(s-1) + Ds^2(s+2) \quad (3.7)$$

Substituindo-se $s = -2, 0, 1$ obtemos

$$\begin{cases} 6 &= -12C \\ 2 &= -2B \\ 3 &= 3D \end{cases}$$

que tem solução $B = -1$, $C = -\frac{1}{2}$ e $D = 1$. Comparando os termos de grau 3 da equação (3.7) obtemos

$$0 = A + C + D = A + \frac{1}{2}.$$

Logo, $A = -\frac{1}{2}$.

Assim,

$$Y(s) = \frac{-1/2}{s} - \frac{1}{s^2} - \frac{1/2}{s+2} + \frac{1}{s-1}$$

de onde obtemos

$$y(t) = -\frac{1}{2} - t - \frac{1}{2}e^{-2t} + e^t,$$

usando a Tabela na página 566.

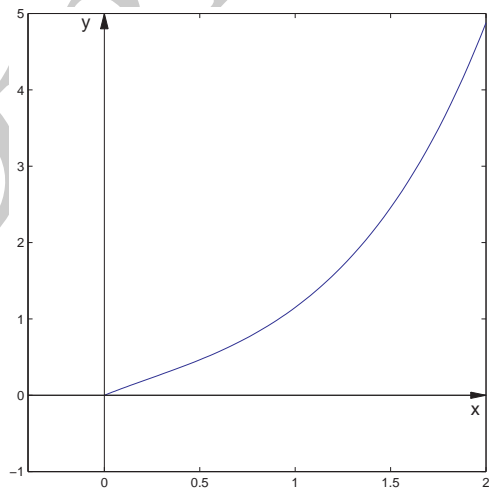


Figura 3.6. Solução do problema de valor inicial do Exemplo 3.14

Exemplo 3.15. Seja a uma constante. Seja $f(t) = t \operatorname{sen} at$. Vamos determinar $F(s)$.

$$f'(t) = \operatorname{sen} at + at \cos at$$

$$f''(t) = 2a \cos at - a^2 t \operatorname{sen} at = 2a \cos at - a^2 f(t)$$

Aplicando a transformada de Laplace e usando o Teorema 3.6 de Derivação, já que $f(t)$ e $f'(t)$ são admissíveis e contínuas e $f''(t)$ é contínua, obtemos

$$s^2 F(s) - s f(0) - f'(0) = 2a \frac{s}{s^2 + a^2} - a^2 F(s)$$

Assim,

$$F(s) = \frac{2as}{(s^2 + a^2)^2}.$$

Como

$$\int_0^\infty e^{-st} t \operatorname{sen} at \, dt \leq \int_0^\infty e^{-st} t \, dt < \infty, \quad \text{para } s > 0,$$

então a transformada de Laplace $\mathcal{L}(f)(s) = F(s)$ está definida para $s > 0$.

Exemplo 3.16. Seja a uma constante. Seja $f(t) = t \cos at$. Deixamos como exercício mostrar usando o Teorema 3.6 de Derivação que

$$F(s) = \frac{s^2 - a^2}{(s^2 + a^2)^2}, \quad \text{para } s > 0.$$

Exercícios (respostas na página 571)

2.1. Resolva os problemas de valor inicial usando a transformada de Laplace:

(a) $y'' + 2y' + 5y = 4e^{-t} \cos 2t$, $y(0) = 1$, $y'(0) = 0$

(b) $y'' + 4y = t^2 + 3e^t$, $y(0) = 0$, $y'(0) = 2$

(c) $y'' - 2y' + y = te^t + 4$, $y(0) = 1$, $y'(0) = 1$

(d) $y'' - 2y' - 3y = 3te^{2t}$, $y(0) = 1$, $y'(0) = 0$

(e) $y'' + 4y = 3 \sin 2t$, $y(0) = 2$, $y'(0) = -1$

(f) $y'' + 4y = e^t$, $y(0) = 0$, $y'(0) = 0$.

(g) $y'' - 2y' + y = e^{2t}$, $y(0) = 0$, $y'(0) = 0$.

(h) $y'' + 2y' + 2y = e^t$, $y(0) = 0$, $y'(0) = 0$.

2.2. Resolva o problema: $y'' - 6y' + 8y = \sin t$, $y(0) = y'(0) = 0$

(a) sem usar transformada de Laplace

(b) usando transformada de Laplace

2.3. Seja a uma constante. Seja $f(t) = t \cos at$. Mostre que

$$F(s) = \frac{s^2 - a^2}{(s^2 + a^2)^2}, \quad s > 0$$

(Sugestão: derive uma vez e use as transformadas de Laplace de $\cos at$ e de $t \sin at$.)

2.4. Resolva o problema de valor inicial

$$\begin{cases} y'' + 4y' + 13y = e^{-2t} \sin 3t, \\ y(0) = 1, y'(0) = 2, \end{cases}$$

usando a transformada de Laplace.

- 2.5. (Derivada da transformada de Laplace) É possível mostrar que se $f(t)$ é admissível, isto é, $f(t)$ é seccionalmente contínua e existem $k > 0$ e $M > 0$, tais que

$$|f(t)| \leq Me^{kt}, \quad \text{para todo } t > 0,$$

então

$$F'(s) = \frac{d}{ds} \mathcal{L}(f)(s) = \int_0^\infty \frac{d}{ds} e^{-st} f(t) dt.$$

- (a) Mostre que $\mathcal{L}(tf(t))(s) = -F'(s)$.
 - (b) Mostre que $\mathcal{L}(t^n f(t))(s) = (-1)^n F^{(n)}(s)$.
 - (c) Use o item anterior para calcular $\mathcal{L}(t^2 \sin at)(s)$.
- 2.6. (Dilatação) Se $F(s) = \mathcal{L}(f)(s)$ e $a > 0$, mostre que

$$\mathcal{L}(f(at))(s) = \frac{1}{a} F\left(\frac{s}{a}\right).$$

3.3 Função de Heaviside e Equações com Termo Não Homogêneo Descontínuo

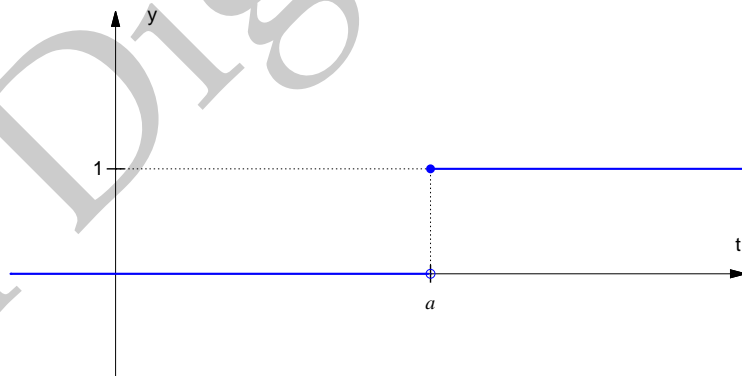


Figura 3.7. Função de Heaviside

Seja a uma constante maior ou igual a zero. Vamos definir a **função degrau (unitário)** ou **função de Heaviside** por

$$u_a(t) = \begin{cases} 0, & \text{para } t < a, \\ 1, & \text{para } t \geq a. \end{cases}$$

A função de Heaviside $u_a(t)$ é um degrau de altura igual a 1 localizado em $t = a$. Por exemplo, $u_3(t)$ é um degrau de altura igual a 1 localizado em $t = 3$. Variando o local do degrau (ou valor de a) obtemos uma infinidade de funções.

Observe que $u_a(t) = u_0(t - a)$. Em muitos sistemas computacionais a função $u_0(t)$ é uma função pré-definida no sistema.

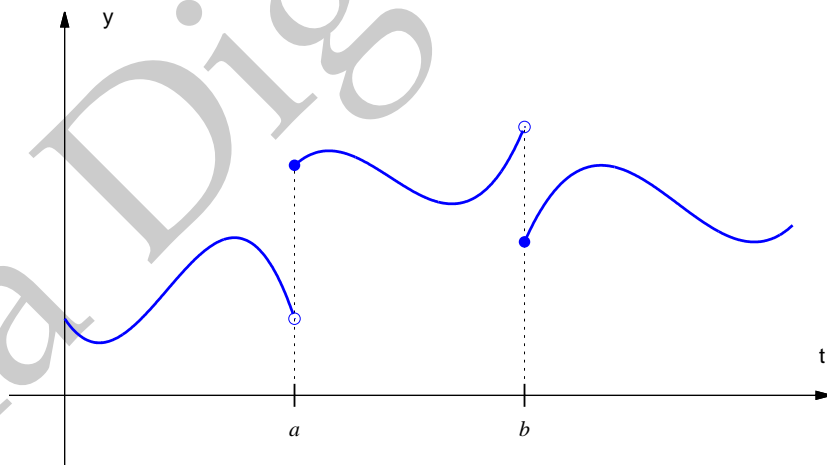


Figura 3.8. Uma função descontínua dada por três expressões

Podemos usar a função de Heaviside para resolver problemas de valor inicial da forma

$$ay'' + by' + cy = f(t), \quad y(0) = y_0, \quad y'(0) = y'_0, \quad \text{para } a, b, c \in \mathbb{R},$$

em que $f(t)$ é uma função descontínua. Para isso, vamos ver como podemos escrever uma função descontínua dada por três expressões em termos da função de Heaviside. Considere uma função

$$f(t) = \begin{cases} f_1(t), & \text{se } 0 \leq t < a \\ f_2(t), & \text{se } a \leq t < b \\ f_3(t), & \text{se } t \geq b \end{cases}.$$

Esta função pode ser escrita como

$$f(t) = f_1(t) - u_a(t)f_1(t) + u_a(t)f_2(t) - u_b(t)f_2(t) + u_b(t)f_3(t).$$

Observe que para “zerar” $f_1(t)$ a partir de $t = a$, subtraímos $u_a(t)f_1(t)$ e para “acrescentar” $f_2(t)$ a partir de $t = a$ somamos $u_a(t)f_2(t)$. Para “zerar” $f_2(t)$ a partir de $t = b$, subtraímos $u_b(t)f_2(t)$ e para “acrescentar” $f_3(t)$ a partir de $t = b$ somamos $u_b(t)f_3(t)$. Esta ideia pode ser repetida para o caso em que existam mais pontos de descontinuidade.

Vamos calcular a transformada de Laplace da função de Heaviside $f(t) = u_a(t)$.

$$\begin{aligned} F(s) &= \int_0^{\infty} e^{-st} u_a(t) dt = \int_0^a e^{-st} u_a(t) dt + \int_a^{\infty} e^{-st} u_a(t) dt = \int_a^{\infty} e^{-st} dt \\ &= \left. \frac{e^{-st}}{-s} \right|_a^{\infty} = 0 - \frac{e^{-sa}}{-s} = \frac{e^{-as}}{s}, \quad \text{para } s > 0 \end{aligned}$$

Exemplo 3.17. Vamos calcular a transformada de Laplace da função

$$f(t) = \begin{cases} 1, & \text{para } 0 \leq t < 2 \\ 0, & \text{para } t \geq 2 \end{cases}$$

Esta função pode ser escrita em termos da função de Heaviside como

$$f(t) = 1 - u_2(t).$$

Assim, usando a linearidade da transformada de Laplace obtemos

$$F(s) = \frac{1}{s} - \frac{e^{-2s}}{s}.$$

Exemplo 3.18. Vamos calcular a transformada de Laplace da função

$$f(t) = \begin{cases} 0, & \text{para } 0 \leq t < 1 \\ 2, & \text{para } 1 \leq t < 2 \\ 0, & \text{para } t \geq 2 \end{cases}$$

Esta função pode ser escrita em termos da função de Heaviside como

$$f(t) = 2u_1(t) - 2u_2(t).$$

Assim, usando a linearidade da transformada de Laplace obtemos

$$F(s) = 2\frac{e^{-s}}{s} - 2\frac{e^{-2s}}{s}.$$

Teorema 3.7 (2º Teorema de Deslocamento). *Seja a uma constante positiva. Se a transformada de Laplace da função $g : [0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}$ é $G(s)$, para $s > c$, então a transformada de Laplace da função*

$$f(t) = u_a(t)g(t - a)$$

é

$$F(s) = e^{-as}G(s), \quad \text{para } s > c.$$

Demonstração.

$$\begin{aligned} F(s) &= \int_0^{\infty} e^{-st} u_a(t) g(t - a) dt = \int_0^a e^{-st} u_a(t) g(t - a) dt + \int_a^{\infty} e^{-st} u_a(t) g(t - a) dt \\ &= \int_a^{\infty} e^{-st} g(t - a) dt = \int_0^{\infty} e^{-s(\tau+a)} g(\tau) d\tau \\ &= e^{-as} \int_0^{\infty} e^{-s\tau} g(\tau) d\tau = e^{-as} G(s). \end{aligned}$$

■

Exemplo 3.19. Vamos calcular a transformada de Laplace da função

$$f(t) = \begin{cases} 0, & \text{para } 0 \leq t < 1 \\ (t - 1)^2, & \text{para } t \geq 1. \end{cases}$$

Esta função pode ser escrita em termos da função de Heaviside como

$$f(t) = u_1(t)(t-1)^2 = u_1(t)g(t-1),$$

em que $g(t) = t^2$. Usando o Teorema 3.7

$$F(s) = e^{-s} \frac{2}{s^3} = \frac{2e^{-s}}{s^3}.$$

Exemplo 3.20. Vamos calcular a transformada de Laplace da função

$$f(t) = \begin{cases} \sin t, & \text{para } 0 \leq t < \pi \\ 0, & \text{para } t \geq \pi. \end{cases}$$

Esta função pode ser escrita em termos da função de Heaviside como

$$f(t) = \sin t - u_\pi(t) \sin t.$$

Para usarmos o Teorema 3.7 precisamos escrever a segunda parcela em termos de uma função $g(t - \pi)$. Para isso, somamos e subtraímos π a t no argumento da função seno, ou seja,

$$\sin t = \sin[(t - \pi) + \pi] = \sin(t - \pi) \cos \pi + \cos(t - \pi) \sin \pi = -\sin(t - \pi).$$

Aqui foi usado que $\sin(a + b) = \sin a \cos b + \sin b \cos a$. Assim,

$$f(t) = \sin t + u_\pi(t) \sin(t - \pi)$$

e

$$F(s) = \frac{1}{s^2 + 1} + e^{-\pi s} \frac{1}{s^2 + 1}.$$

Exemplo 3.21. Vamos resolver o seguinte problema de valor inicial

$$2y'' + 2y' + 2y = f(t), \quad y(0) = 0, \quad y'(0) = 0,$$

em que

$$f(t) = \begin{cases} 0, & \text{para } 0 \leq t < 3 \\ 2, & \text{para } 3 \leq t < 10 \\ 0, & \text{para } t \geq 10 \end{cases}$$

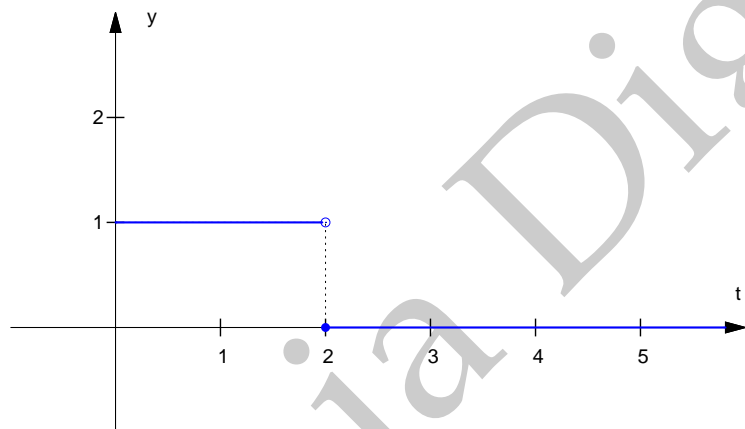


Figura 3.9. Função $f(t) = 1 - u_2(t)$

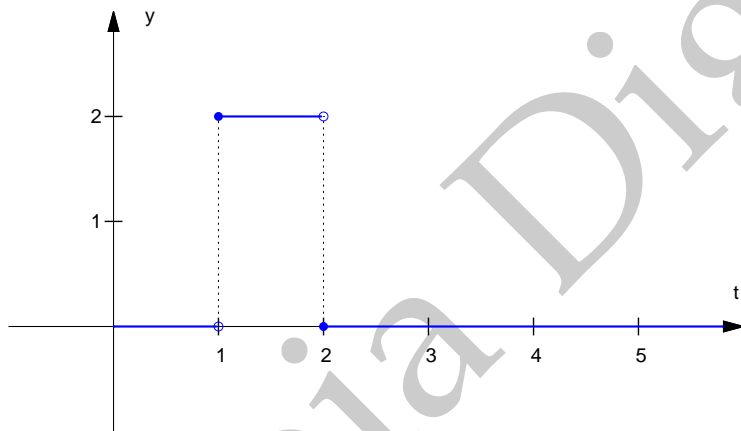


Figura 3.10. Função $f(t) = 2u_1(t) - 2u_2(t)$

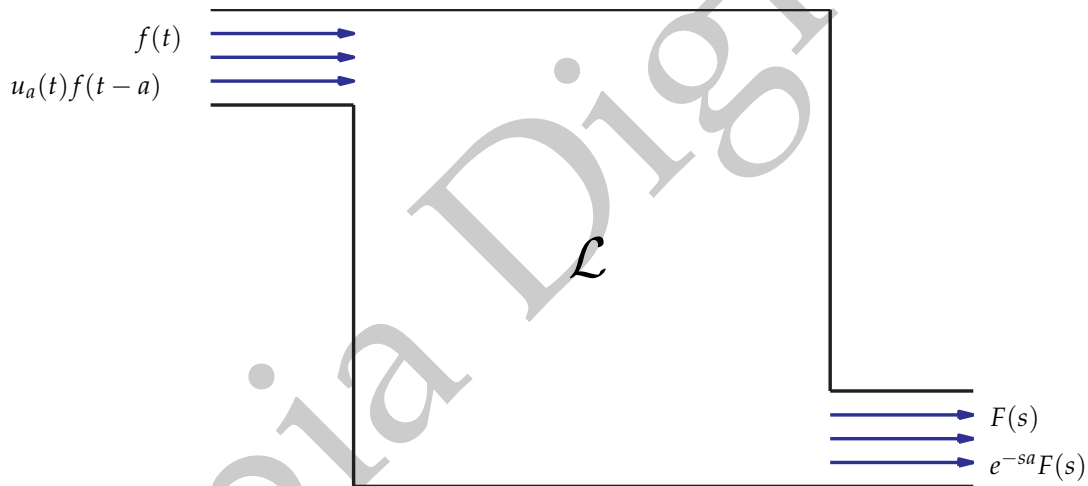


Figura 3.11. 2º Teorema de Deslocamento

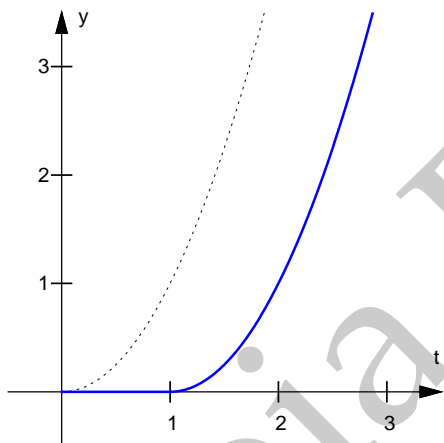


Figura 3.12. Função $f(t) = u_1(t)(t-1)^2$

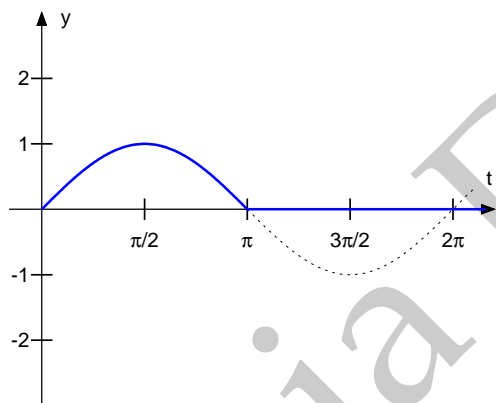


Figura 3.13. Função $f(t) = \sin t - u_{\pi}(t) \sin t$

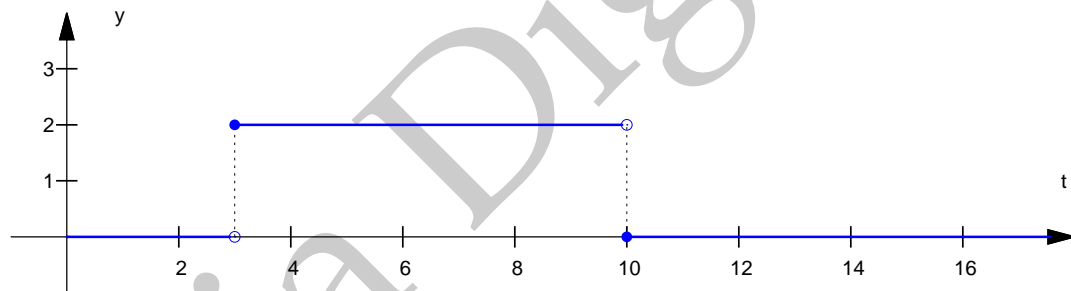


Figura 3.14. $f(t) = 2u_3(t) - 2u_{10}(t)$

Esta função pode ser escrita em termos da função de Heaviside como

$$f(t) = 2u_3(t) - 2u_{10}(t).$$

Aplicando-se a transformada de Laplace à equação acima obtemos

$$2 \left(s^2 Y(s) - sy(0) - y'(0) \right) + 2 (sY(s) - y(0)) + 2Y(s) = 2 \frac{e^{-3s}}{s} - 2 \frac{e^{-10s}}{s}$$

Substituindo-se os valores $y(0) = 0$ e $y'(0) = 0$ obtemos

$$(2s^2 + 2s + 2) Y(s) = 2 \frac{e^{-3s} - e^{-10s}}{s}$$

Assim,

$$Y(s) = \frac{e^{-3s} - e^{-10s}}{s(s^2 + s + 1)}.$$

Para aplicarmos o 2º Teorema de Deslocamento vamos definir

$$H(s) = \frac{1}{s(s^2 + s + 1)}.$$

E assim

$$Y(s) = \frac{e^{-3s} - e^{-10s}}{s(s^2 + s + 1)} = (e^{-3s} - e^{-10s})H(s) = e^{-3s}H(s) - e^{-10s}H(s).$$

Depois de encontrar a função $h(t)$ cuja transformada de Laplace é $H(s)$, a solução do problema de valor inicial é então, pelo 2º Teorema de Deslocamento, dada por

$$y(t) = u_3(t)h(t-3) - u_{10}(t)h(t-10).$$

Vamos a seguir encontrar a função $h(t)$ cuja transformada de Laplace é $H(s)$. Como $s^2 + s + 1$ tem raízes complexas, a decomposição de $H(s)$ em frações parciais é da forma

$$H(s) = \frac{A}{s} + \frac{Bs + C}{s^2 + s + 1}.$$

Multiplicando-se $H(s)$ por $s(s^2 + s + 1)$ obtemos

$$1 = A(s^2 + s + 1) + (Bs + C)s$$

Substituindo-se $s = 0$ obtemos $A = 1$. Comparando-se os coeficientes dos termos de grau 2 e de grau 1 obtemos

$$\begin{cases} 0 &= A + B = 1 + B \\ 0 &= A + C = 1 + C \end{cases}$$

que tem solução $B = -1$ e $C = -1$. Assim,

$$\begin{aligned} H(s) &= \frac{1}{s} - \frac{s+1}{s^2+s+1} = \frac{1}{s} - \frac{s+1}{(s+1/2)^2 + 3/4} \\ &= \frac{1}{s} - \frac{s+1/2}{(s+1/2)^2 + 3/4} - \frac{1/2}{(s+1/2)^2 + 3/4} \\ &= \frac{1}{s} - \frac{s+1/2}{(s+1/2)^2 + 3/4} - \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{\sqrt{3}/2}{(s+1/2)^2 + 3/4} \end{aligned}$$

De onde obtemos que a função cuja transformada de Laplace é $H(s)$ é

$$h(t) = 1 - e^{-t/2} \cos\left(\frac{\sqrt{3}}{2}t\right) - \frac{1}{\sqrt{3}} e^{-t/2} \operatorname{sen}\left(\frac{\sqrt{3}}{2}t\right).$$

Como encontramos acima que

$$Y(s) = e^{-3s}H(s) - e^{-10s}H(s),$$

então usando o 2º Teorema de Deslocamento temos que a solução do problema de valor inicial é dado por

$$y(t) = u_3(t)h(t-3) - u_{10}(t)h(t-10).$$

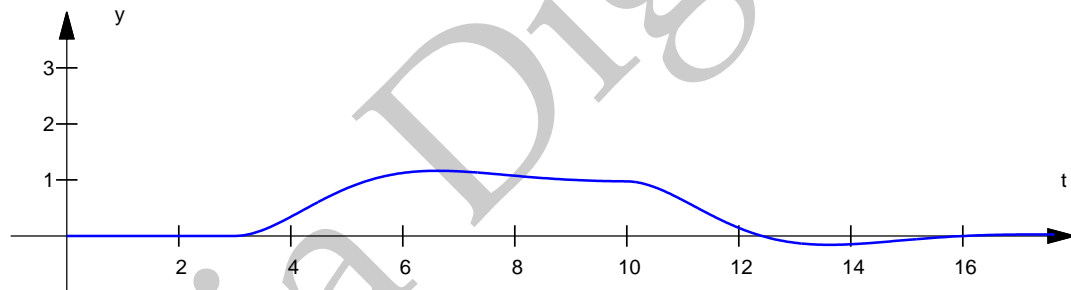
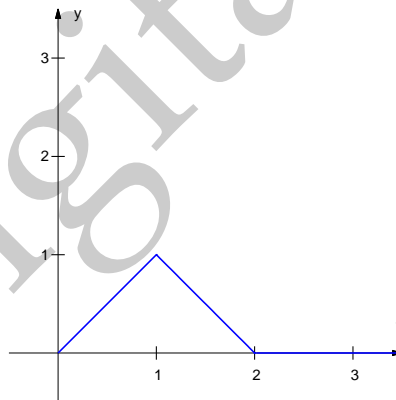


Figura 3.15. Solução do problema de valor inicial do Exemplo 3.21

Exercícios (respostas na página 581)

3.1. Seja $f(t)$ a função cujo gráfico é mostrado na figura ao lado

- (a) Expresse $f(t)$ em termos da função degrau.
- (b) Calcule a transformada de Laplace de $f(t)$.



3.2. Considere

$$f(t) = \begin{cases} \sin t, & 0 \leq t < \pi \\ \cos t, & \pi \leq t < 2\pi \\ e^{-\frac{t}{10}}, & t \geq 2\pi \end{cases}$$

- (a) Expresse f em termos da função degrau.
- (b) Calcule a transformada de Laplace de f .

3.3. Considere

$$f(t) = \begin{cases} |\cos t|, & 0 \leq t < 3\pi/2 \\ 0, & t \geq 3\pi/2 \end{cases}$$

Calcule a transformada de Laplace de f .

3.4. Resolva os problemas de valor inicial:

- (a) $y'' + y = f(t)$, $y(0) = 0$, $y'(0) = 1$, em que $f(t) = \begin{cases} 1, & \text{para } 0 \leq t < \pi/2 \\ 0, & \text{para } t \geq \pi/2 \end{cases}$
- (b) $y'' + 2y' + 2y = f(t)$, $y(0) = 0$, $y'(0) = 1$, em que $f(t) = \begin{cases} 0, & \text{para } 0 \leq t < \pi \\ 2, & \text{para } \pi \leq t < 2\pi \\ 0, & \text{para } t \geq 2\pi \end{cases}$
- (c) $y'' + 4y = f(t)$, $y(0) = 0$, $y'(0) = 0$, em que $f(t) = \begin{cases} \sin t, & \text{para } 0 \leq t < 2\pi \\ 0, & \text{para } t \geq 2\pi \end{cases}$
- (d) $y'' + 4y = f(t)$, $y(0) = 0$, $y'(0) = 0$, em que $f(t) = \begin{cases} \cos t, & \text{para } 0 \leq t < \pi \\ 0, & \text{para } t \geq \pi \end{cases}$
- (e) $y'' + 3y' + 2y = f(t)$, $y(0) = 0$, $y'(0) = 0$, em que $f(t) = \begin{cases} t, & \text{para } 0 \leq t < 10 \\ 0, & \text{para } t \geq 10 \end{cases}$
- (f) $y'' + 3y' + 2y = f(t)$, $y(0) = 0$, $y'(0) = 1$, em que $f(t) = \begin{cases} 0, & \text{para } 0 \leq t < 2 \\ 1, & \text{para } t \geq 2 \end{cases}$
- (g) $y'' + y = f(t)$, $y(0) = 0$, $y'(0) = 1$, em que $f(t) = \begin{cases} 0, & \text{para } 0 \leq t < 3\pi \\ 1, & \text{para } t \geq 3\pi \end{cases}$
- (h) $y'' + y' + \frac{5}{4}y = f(t)$, $y(0) = 0$, $y'(0) = 0$, em que $f(t) = \begin{cases} \sin t, & \text{para } 0 \leq t < \pi \\ 0, & \text{para } t \geq \pi \end{cases}$
- (i) $y'' + 4y = f(t)$, $y(0) = 0$, $y'(0) = 0$, em que $f(t) = \begin{cases} 0, & \text{para } 0 \leq t < \pi \\ 2, & \text{para } \pi \leq t < 3\pi \\ 0, & \text{para } t \geq 3\pi \end{cases}$
- (j) $y'' + 4y = f(t)$, $y(0) = 0$, $y'(0) = 0$, em que $f(t) = \begin{cases} e^t, & \text{se } 0 \leq t < 2 \\ 0, & \text{se } t \geq 2 \end{cases}$
- (k) $y'' - 2y' + y = f(t)$, $y(0) = 0$, $y'(0) = 0$, em que $f(t) = \begin{cases} e^{2t}, & \text{se } 0 \leq t < 1 \\ 0, & \text{se } t \geq 1 \end{cases}$
- (l) $y'' + 2y' + 2y = f(t)$, $y(0) = 0$, $y'(0) = 0$, em que $f(t) = \begin{cases} e^t, & \text{se } 0 \leq t < 1 \\ 0, & \text{se } t \geq 1 \end{cases}$

(m) $y'' + 4y' + 13y = f(t)$, $y(0) = 1$, $y'(0) = 2$. em que $f(t) = \begin{cases} e^{-2t} \operatorname{sen} 3t, & \text{se } 0 \leq t < \pi \\ 0, & \text{se } t \geq \pi \end{cases}$

3.5. Resolva o PVI

$$\begin{cases} 2y'' - 4y' + 6y = f(t) \\ y(0) = 0, y'(0) = 0 \end{cases}$$

para

$$f(t) = \begin{cases} 0, & t < 1, \\ (t-1)^2, & 1 \leq t < 2, \\ -t^2 + 6t - 7, & 2 \leq t \leq 4, \\ 9 - 2t, & t > 4 \end{cases}$$

3.4 Delta de Dirac ou Impulso Unitário

Seja $t_0 \geq 0$. O **Delta de Dirac** ou **Impulso Unitário** $\delta(t)$ é uma função generalizada definido pela seguinte propriedade

$$\int_0^{\infty} f(t)\delta(t - t_0)dt = f(t_0), \quad \text{para toda função } f : [0, \infty) \rightarrow \mathbb{R} \text{ seccionalmente contínua.} \quad (3.8)$$

Pode-se mostrar que não existe uma função (usual) que satisfaça tal propriedade. Entretanto, vamos mostrar como podemos aproximar o Delta de Dirac por uma sequência de funções. Considere a sequência de funções

$$g_n(t) = \begin{cases} n, & \text{se } 0 \leq t < \frac{1}{n}, \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

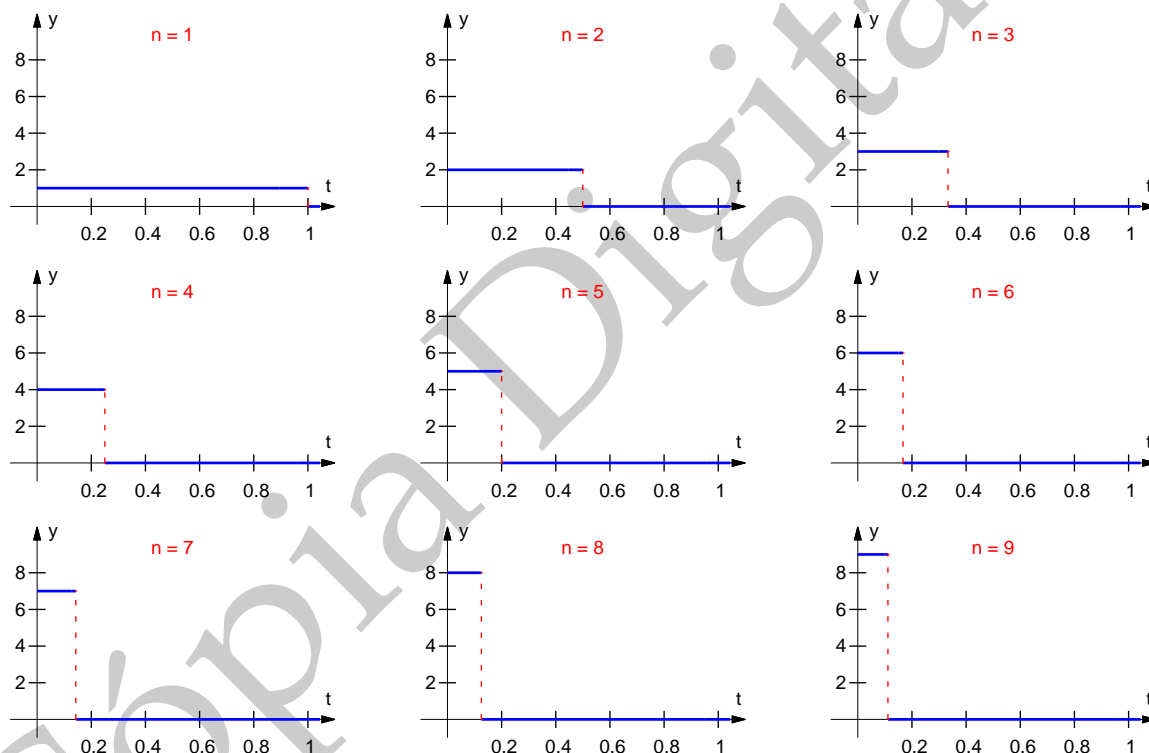


Figura 3.16. Sequência de funções $g_n(t) = 1/n$, se $0 < t < n$ e $g_n(t) = 0$, caso contrário.

Calculando a integral do produto $f(t)g_n(t - t_0)$, para $f(t)$ uma função contínua obtemos

$$\int_0^\infty f(t)g_n(t - t_0)dt = \int_{t_0}^{t_0 + \frac{1}{n}} f(t)n dt = n \int_{t_0}^{t_0 + \frac{1}{n}} f(t)dt.$$

Pelo Teorema do Valor Médio para integrais

$$\int_0^\infty f(t)g_n(t - t_0)dt = f(\xi_n), \quad \text{com } t_0 \leq \xi_n \leq t_0 + \frac{1}{n}.$$

Portanto,

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \int_0^\infty f(t)g_n(t - t_0)dt = \lim_{n \rightarrow \infty} f(\xi_n) = f(t_0).$$

Assim, podemos escrever a propriedade (3.8) como

$$\int_0^\infty f(t)\delta(t - t_0)dt = \lim_{n \rightarrow \infty} \int_0^\infty f(t)g_n(t - t_0)dt = f(t_0).$$

Observe que não podemos passar o limite para dentro da integral, pois enquanto

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \int_0^\infty f(t)g_n(t - t_0)dt = f(t_0),$$

$$\int_0^\infty f(t)(\lim_{n \rightarrow \infty} g_n(t - t_0))dt = 0,$$

já que

$$\lim_{n \rightarrow \infty} g_n(t - t_0) = \begin{cases} \infty, & \text{se } t = t_0 \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

Isto mostra que o Delta de Dirac não é o limite da sequência g_n , para cada t , mas podemos aproximar o delta de Dirac pelas funções g_n no sentido que mostramos acima.

Podemos usar o delta de Dirac, por exemplo, para representar uma força de intensidade extremamente alta com duração extremamente curta, mas cujo impulso é igual a um, pois pela propriedade (3.8) temos que

$$\int_0^{\infty} \delta(t - t_0) dt = 1.$$

A transformada de Laplace do delta de Dirac também pode ser calculada aplicando a propriedade que o define (3.8) obtendo

$$\mathcal{L}(\delta(t - t_0))(s) = \int_0^{\infty} e^{-st} \delta(t - t_0) dt = e^{-t_0 s}$$

Também temos que

$$\mathcal{L}(f(t)\delta(t - t_0))(s) = \int_0^{\infty} e^{-st} f(t)\delta(t - t_0) dt = f(t_0)e^{-t_0 s}$$

Exemplo 3.22. Vamos encontrar a solução do problema de valor inicial:

$$\begin{cases} 10y'' - 3y' - 4y = \delta(t - \pi) \cos t, \\ y(0) = 0, \quad y'(0) = 1/10, \end{cases}$$

Aplicando-se a transformada de Laplace na equação diferencial obtemos

$$10(s^2 Y(s) - sy(0) - y'(0)) - 3(sY(s) - y(0)) - 4Y(s) = e^{-\pi s} \cos \pi$$

Substituindo-se os valores $y(0) = 0$ e $y'(0) = 1/10$ obtemos

$$(10s^2 - 3s - 4) Y(s) = -e^{-\pi s} + 1$$

Assim,

$$Y(s) = \frac{1}{10s^2 - 3s - 4} - \frac{e^{-\pi s}}{10s^2 - 3s - 4} = H(s) - e^{-\pi s}H(s)$$

$$H(s) = \frac{1}{10s^2 - 3s - 4} = \frac{1}{10(s - 4/5)(s + 1/2)} = \frac{A}{s - 4/5} + \frac{B}{s + 1/2}$$

Multiplicando-se $H(s)$ por $10(s - 4/5)(s + 1/2)$:

$$1 = 10A(s + 1/2) + 10B(s - 4/5)$$

Substituindo-se $s = -1/2, 4/5$

$$\begin{cases} 1 = -13B \\ 1 = 13A \end{cases}$$

Resolvendo-se o sistema obtemos a solução $A = 1/13$ e $B = -1/13$. Assim,

$$H(s) = \frac{1}{13} \frac{1}{s - 4/5} - \frac{1}{13} \frac{1}{s + 1/2}$$

$$h(t) = \frac{1}{13} e^{4t/5} - \frac{1}{13} e^{-t/2}$$

$$y(t) = h(t) - u_{\pi}(t)h(t - \pi)$$

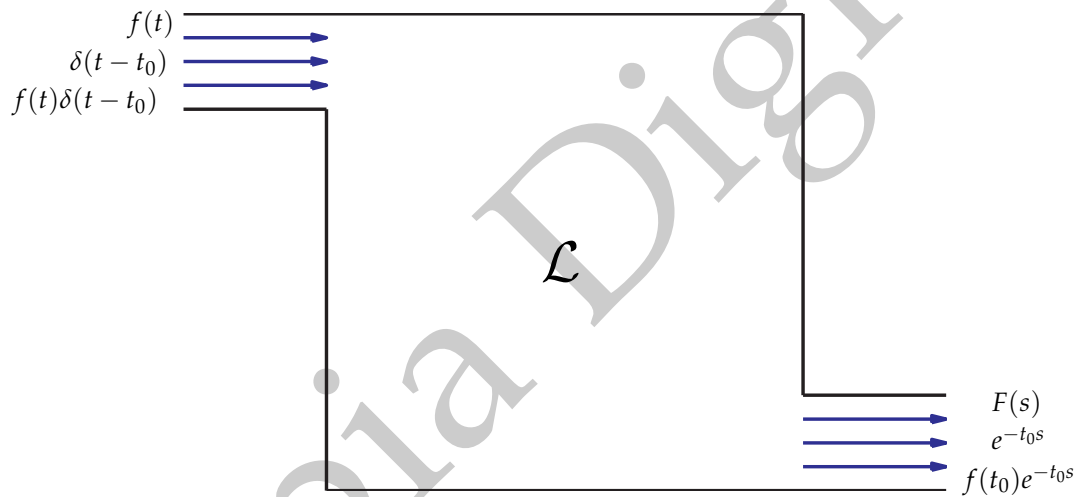
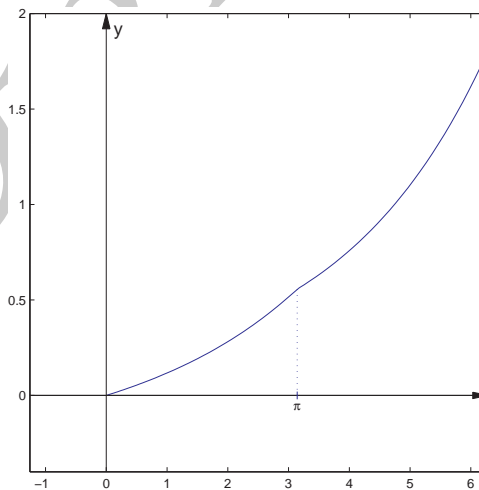


Figura 3.17. Transformada de Laplace do delta de Dirac

Figura 3.18. Solução do problema de valor inicial do Exemplo 3.22



Exemplo 3.23. Considere um sistema massa-mola sem amortecimento em repouso, submetido a um impulso unitário no instante $t = 0$ e a outro impulso unitário no instante $t = \frac{\pi}{\omega_0}$, ou seja, temos o seguinte problema de valor inicial

$$\begin{cases} x'' + \omega_0^2 x = \frac{1}{m}(\delta(t) + \delta(t - \frac{\pi}{\omega_0})), \\ x(0) = 0, \quad x'(0) = 0, \end{cases}$$

Aplicando-se a transformada de Laplace na equação diferencial obtemos

$$(s^2 X(s) - sx(0) - x'(0)) + \omega_0^2 X(s) = \frac{1}{m}(1 + e^{-\frac{\pi}{\omega_0}s})$$

Substituindo-se os valores $x(0) = 0$ e $x'(0) = 0$ obtemos

$$(s^2 + \omega_0^2) X(s) = \frac{1}{m}(1 + e^{-\frac{\pi}{\omega_0}s})$$

Assim,

$$X(s) = \frac{1}{m} \left(\frac{1}{s^2 + \omega_0^2} + \frac{e^{-\frac{\pi}{\omega_0}s}}{s^2 + \omega_0^2} \right) = \frac{1}{m} \left(\frac{1}{s^2 + \omega_0^2} + e^{-\frac{\pi}{\omega_0}s} \frac{1}{s^2 + \omega_0^2} \right)$$

e a solução do problema de valor inicial é

$$\begin{aligned} x(t) &= \frac{1}{m\omega_0} \left(\sin(\omega_0 t) + u_{\frac{\pi}{\omega_0}}(t) \sin[\omega_0(t - \frac{\pi}{\omega_0})] \right) \\ &= \frac{1}{m\omega_0} \left(\sin(\omega_0 t) - u_{\frac{\pi}{\omega_0}}(t) \sin(\omega_0 t) \right) \\ &= \begin{cases} \frac{1}{m\omega_0} \sin(\omega_0 t), & \text{se } 0 \leq t < \frac{\pi}{\omega_0}, \\ 0, & \text{se } t \geq \frac{\pi}{\omega_0}, \end{cases} \end{aligned}$$

que mostra que o primeiro impulso põe o sistema em movimento, enquanto o segundo impulso para o sistema.

Exercícios (respostas na página 598)

4.1. Resolva os problemas de valor inicial:

(a)
$$\begin{cases} y'' + y = \delta(t - 2\pi) \cos t, \\ y(0) = 0, y'(0) = 1 \end{cases}$$

(b)
$$\begin{cases} y'' + 2y' + 2y = e^t \delta(t - 1), \\ y(0) = 0, y'(0) = 0. \end{cases}$$

(c)
$$\begin{cases} y'' + 4y = e^t \delta(t - 2), \\ y(0) = 0, y'(0) = 0. \end{cases}$$

(d)
$$\begin{cases} y'' - 2y' + y = e^{2t} \delta(t - 1), \\ y(0) = 0, y'(0) = 0. \end{cases}$$

(e)
$$\begin{cases} y'' + 2y' + 2y = \delta(t - 1) + u_3(t)t^2, \\ y(0) = 0, y'(0) = 1. \end{cases}$$

4.2. (a) Determine a solução do problema

$$y'' + 4y' + 20y = e^{-\frac{\pi}{2}} \delta(t - \frac{\pi}{4}) \quad \text{com } y(0) = 0, y'(0) = 1$$

(b) Esboce o gráfico da solução encontrada

4.3. Resolva o seguinte problema de valor inicial

$$y'' + y' = u_1(t) + \delta(t - 2), \quad y(0) = 0, y'(0) = 1$$

4.4. (a) Encontre a solução para o seguinte PVI:

$$\begin{cases} 6y'' + \frac{1}{6}y = \delta(t - 12\pi) + \delta(t - 18\pi) \\ y(0) = 0, y'(0) = 0. \end{cases}$$

- (b) Esboce o gráfico da solução do PVI acima. Descreva em palavras o comportamento das soluções em cada um dos intervalos: $0 \leq t < 12\pi$, $12\pi \leq t \leq 18\pi$ e $t > 18\pi$. Indique ainda o valor de t para o qual a solução assume o seu valor máximo.

3.5 Convolução

A **convolução de duas funções** $f, g : [0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}$ é uma função definida por

$$(f * g)(t) = \int_0^t f(t - \tau)g(\tau)d\tau, \quad \text{para } t \geq 0.$$

Exemplo 3.24. Considere

$$f(t) = g(t) = \begin{cases} 1, & \text{se } 0 \leq t < 1, \\ 0, & \text{se } t \geq 2. \end{cases}$$

$$(f * g)(t) = \int_0^t f(t - \tau)g(\tau)d\tau = \begin{cases} \int_0^t d\tau = t, & \text{se } 0 < t < 1, \\ \int_{t-1}^1 d\tau = 2 - t, & \text{se } 1 \leq t < 2, \\ 0, & \text{se } t \geq 2. \end{cases}$$

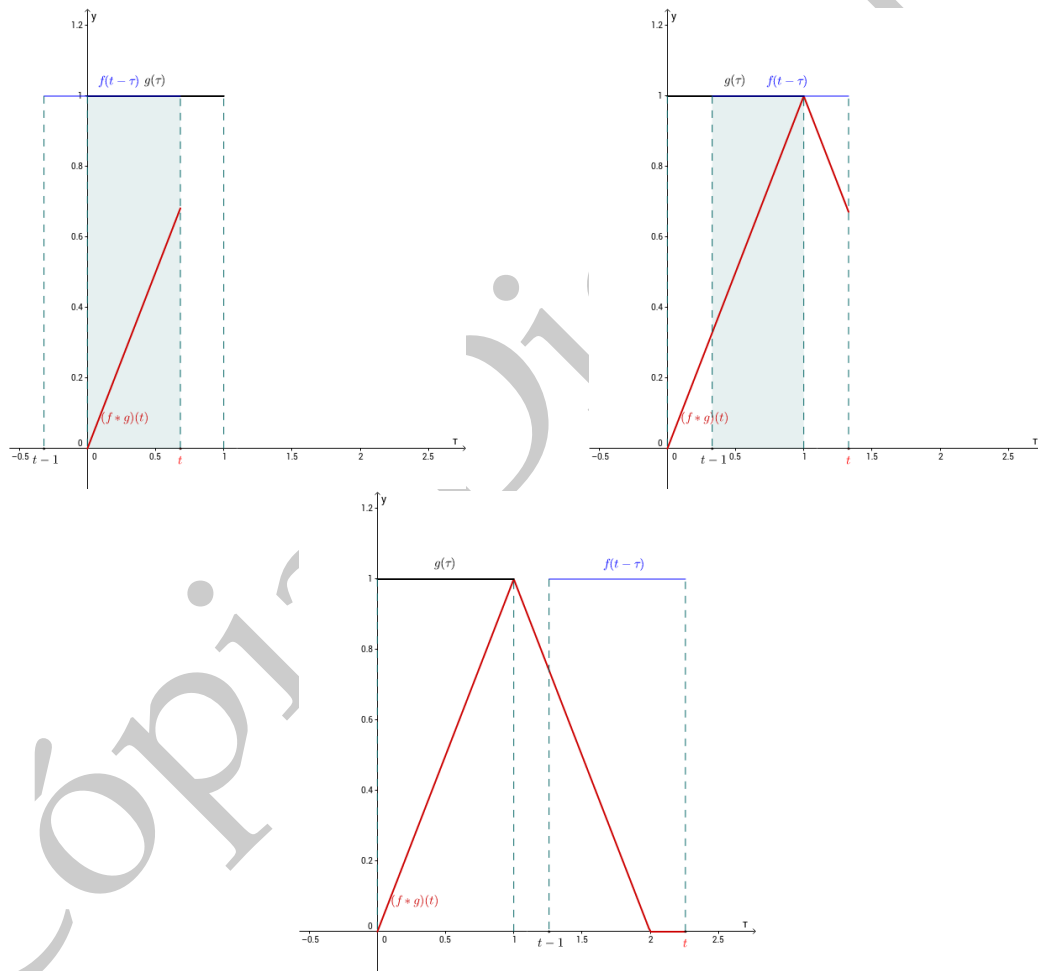


Figura 3.19. $f(t - \tau)$, $g(\tau)$ e a convolução $(f * g)(t)$ do Exemplo 3.24.

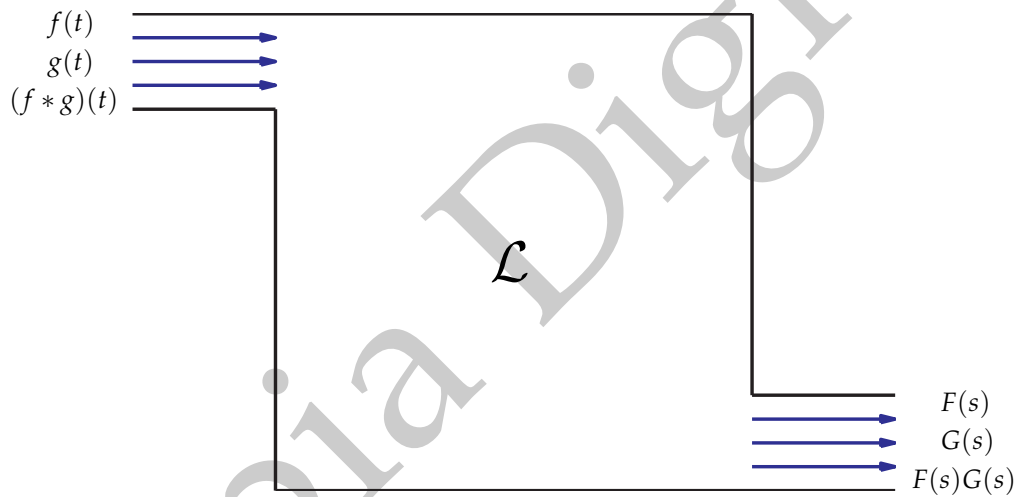


Figura 3.20. Transformada de Laplace da Convolução

Teorema 3.8 (da Convolução). *Seja $F(s)$ a transformada de Laplace de $f : [0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}$ e $G(s)$ a transformada de Laplace de*

$$g : [0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}.$$

Então,

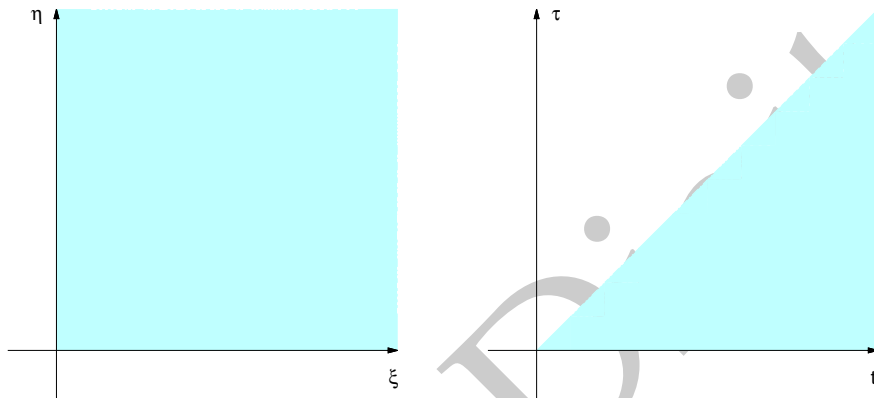
$$\mathcal{L}(f * g)(s) = F(s)G(s)$$

Demonstração. Por um lado,

$$\mathcal{L}(f * g)(s) = \int_0^\infty e^{-st} \int_0^t f(t - \tau)g(\tau)d\tau dt = \int_0^\infty \int_0^t e^{-st} f(t - \tau)g(\tau)d\tau dt.$$

Por outro lado,

$$\begin{aligned} F(s)G(s) &= \int_0^\infty e^{-s\xi} f(\xi)d\xi \int_0^\infty e^{-s\eta} g(\eta)d\eta = \\ &= \int_0^\infty \int_0^\infty e^{-s(\eta+\xi)} f(\xi)g(\eta)d\xi d\eta. \end{aligned}$$



Fazendo a mudança de variáveis $t = \eta + \xi$ e $\tau = \eta$ obtemos

$$F(s)G(s) = \int_0^\infty \int_\tau^\infty e^{-st} f(t-\tau) g(\tau) dt d\tau,$$

Trocando a ordem de integração obtemos

$$F(s)G(s) = \int_0^\infty \int_0^t e^{-st} f(t-\tau) g(\tau) d\tau dt.$$

Logo,

$$\mathcal{L}(f * g)(s) = F(s)G(s).$$

■

Exemplo 3.25. Considere $\mathcal{L}(h)(s) = H(s) = \frac{1}{(s-4)(s+1)}$. Vamos determinar $h(t)$ usando convolução. Sejam

$$F(s) = \frac{1}{s-4} \quad \text{e} \quad G(s) = \frac{1}{s+1}.$$

Então, pelo Teorema da Convolução 3.8, temos que

$$h(t) = (f * g)(t) = \int_0^t e^{4(t-\tau)} e^{-\tau} d\tau = e^{4t} \int_0^t e^{-5\tau} d\tau = e^{4t} \frac{1}{-5} e^{-5\tau} \Big|_0^t = -\frac{e^{4t}}{5} (e^{-5t} - 1)$$

Teorema 3.9. A convolução satisfaz as seguintes propriedades:

- (a) $f * g = g * f$
- (b) $f * (g_1 + g_2) = f * g_1 + f * g_2$
- (c) $(f * g) * h = f * (g * h)$
- (d) $f * 0 = 0 * f = 0$

Demonstração. (a)

$$(f * g)(t) = \int_0^t f(t - \tau)g(\tau)d\tau$$

Fazendo a mudança de variáveis $\sigma = t - \tau$ obtemos

$$(f * g)(t) = - \int_t^0 f(\sigma)g(t - \sigma)d\sigma = \int_0^t f(\sigma)g(t - \sigma)d\sigma = (g * f)(t)$$

(b)

$$\begin{aligned} f * (g_1 + g_2)(t) &= \int_0^t f(t - \tau)(g_1(\tau) + g_2(\tau))d\tau \\ &= \int_0^t f(t - \tau)g_1(\tau)d\tau + \int_0^t f(t - \tau)g_2(\tau)d\tau \\ &= (f * g_1)(t) + (f * g_2)(t) \end{aligned}$$

(c) Por um lado,

$$\begin{aligned} f * (g * h)(t) &= \int_0^t f(t - \tau)(g * h)(\tau)d\tau = \int_0^t f(t - \tau) \left(\int_0^\tau g(\tau - \sigma)h(\sigma)d\sigma \right) d\tau \\ &= \int_0^t \int_0^\tau f(t - \tau)g(\tau - \sigma)h(\sigma)d\sigma d\tau \end{aligned} \quad (3.9)$$

Por outro lado,

$$\begin{aligned} ((f * g) * h)(t) &= \int_0^t (f * g)(t - x)h(x)dx = \int_0^t \left(\int_0^{t-x} f(t - x - y)g(y)dy \right) h(x)dx \\ &= \int_0^t \int_0^{t-x} f(t - x - y)g(y)h(x)dydx \\ &= \int_0^t \int_0^{t-y} f(t - x - y)g(y)h(x)dx dy \end{aligned}$$

Fazendo a mudança de variáveis $\sigma = x$ e $\tau = x + y$, obtemos

$$((f * g) * h)(t) = \int_0^t \int_0^\tau f(t - \tau)g(\tau - \sigma)h(\sigma)d\sigma d\tau$$

Logo, por (3.9)

$$(f * g) * h = f * (g * h)$$

(d)

$$(f * 0)(t) = \int_0^t f(t - \tau) 0 d\tau = 0 = (0 * f)(t)$$



Vimos acima que várias das propriedades do produto de funções são válidas para a convolução, mas duas propriedades do produto não são válidas para a convolução:

(a) $1 * f \neq f$, pois, por exemplo, para $f(t) = t$,

$$(1 * f)(t) = \int_0^t f(\tau) d\tau = \int_0^t \tau d\tau = \frac{\tau^2}{2} \Big|_0^t = \frac{t^2}{2}$$

(b) $f * f \not\geq 0$, pois, por exemplo, para $f(t) = \cos t$,

$$\begin{aligned} (f * f)(t) &= \int_0^t f(t - \tau) f(\tau) d\tau = \int_0^t \cos(t - \tau) \cos \tau d\tau \\ &= \cos t \int_0^t \cos^2 \tau d\tau + \sin t \int_0^t \sin \tau \cos \tau d\tau \\ &= \frac{1}{2} \cos t \left(t + \frac{1}{2} \sin 2t \right) + \frac{1}{2} \sin^3 t \\ (f * f)(\pi) &= -\frac{\pi}{2} \end{aligned}$$

Exemplo 3.26. Vamos encontrar a solução do problema de valor inicial:

$$\begin{cases} y'' + 4y = f(t), \\ y(0) = 0, y'(0) = 1, \end{cases}$$

em que $f(t)$ é uma função qualquer que tem uma transformada de Laplace.

Aplicando-se a transformada de Laplace na equação obtemos

$$(s^2 Y(s) - sy(0) - y'(0)) + 4Y(s) = F(s)$$

Substituindo-se os valores $y(0) = 0$ e $y'(0) = 1$ obtemos

$$(s^2 + 4) Y(s) = F(s) + 1$$

Assim,

$$Y(s) = \frac{F(s)}{s^2 + 4} + \frac{1}{s^2 + 4} = F(s)H(s) + H(s)$$

em que

$$H(s) = \frac{1}{s^2 + 4} = \frac{1}{2} \frac{2}{s^2 + 4}.$$

Assim,

$$h(t) = \frac{1}{2} \sin 2t$$

e, pelo Teorema da Convolução 3.8, a solução do problema de valor inicial é

$$y(t) = h(t) + (h * f)(t) = \frac{1}{2} \sin 2t + \frac{1}{2} \int_0^t f(t - \tau) \sin 2\tau d\tau.$$

Exemplo 3.27. Dadas duas funções, $f(t)$ e $g(t)$, a equação integral

$$f(t) + \int_0^t g(t - \tau)y(\tau)d\tau = y(t)$$

pode ser resolvida usando a transformada de Laplace. Esta equação é chamada **equação integral de Volterra**. Por exemplo, se $f(t) = 1$ e $g(t) = \cos(t)$, temos a equação integral

$$1 + \int_0^t \cos(t - \tau)y(\tau)d\tau = y(t).$$

Pelo Teorema da Convolução 3.8, aplicando-se a transformada de Laplace na equação obtemos

$$\frac{1}{s} + \frac{s}{s^2 + 1}Y(s) = Y(s)$$

$$Y(s) \left(1 - \frac{s}{s^2 + 1} \right) = \frac{1}{s}$$

$$Y(s) = \frac{s^2 + 1}{(s^2 - s + 1)s}$$

Decompondo $Y(s)$ em frações parciais:

$$Y(s) = \frac{A}{s} + \frac{Bs + C}{s^2 - s + 1}$$

Multiplicando-se por $(s^2 - s + 1)s$:

$$s^2 + 1 = A(s^2 - s + 1) + (Bs + C)s$$

Substituindo-se $s = 0$ obtemos $A = 1$. Comparando-se os coeficientes dos termos de grau 2 obtemos $1 = A + B$ ou $B = 0$. Comparando-se os coeficientes dos termos de

grau 1 obtemos $0 = -A + C$ ou $C = 1$. Assim,

$$Y(s) = \frac{1}{s} + \frac{1}{s^2 - s + 1} = \frac{1}{s} + \frac{1}{(s - \frac{1}{2})^2 + \frac{3}{4}} = \frac{1}{s} + \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{\frac{\sqrt{3}}{2}}{(s - \frac{1}{2})^2 + \frac{3}{4}}$$

Portanto, a solução da equação integral é

$$y(t) = 1 + \frac{2}{\sqrt{3}} e^{\frac{t}{2}} \operatorname{sen} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} t \right).$$

Exemplo 3.28. Considere o PVI

$$\begin{cases} ay'' + by' + cy = f(t), \\ y(0) = 0, y'(0) = 0, \end{cases}$$

Aplicando-se a transformada de Laplace na equação diferencial obtemos

$$a(s^2 Y(s) - sy(0) - y'(0)) + b(sY(s) - y(0)) + cY(s) = F(s).$$

Usando o fato de que $y(0) = y'(0) = 0$ obtemos que

$$Y(s) = \frac{F(s)}{as^2 + bs + c} = F(s)W(s),$$

em que

$$W(s) = \frac{1}{as^2 + bs + c}.$$

Logo, pelo Teorema da Convolução 3.8, temos que

$$y(t) = (f * w)(t) = \int_0^t f(t - \tau)w(\tau)d\tau. \quad (3.10)$$

Observe que $w(t)$ é a solução do PVI acima se $f(t) = \delta(t)$ (verifique!). Portanto, a função $w(t)$ é a resposta do sistema a um impulso unitário aplicado em $t = 0$ e é chamada **resposta ao impulso unitário**.

Assim, a solução do PVI (3.10) é a convolução do termo não homogêneo $f(t)$ com a resposta ao impulso unitário.

Exercícios (respostas na página 605)

5.1. Considere $\mathcal{L}(f)(s) = F(s) = \frac{1}{s(s+3)}$. Determine $f(t)$:

- (a) Utilizando frações parciais.
- (b) Utilizando convolução.

5.2. Considere $\mathcal{L}(f)(s) = F(s) = \frac{1}{s(s^2 - 4s + 5)}$. Determine $f(t)$:

- (a) Utilizando frações parciais.
- (b) Utilizando convolução.

5.3. Resolva o problema de valor inicial

$$y'' + 4y' + 4y = f(t), \quad y(0) = 2, \quad y'(0) = -3,$$

para uma função $f(t)$ arbitrária.

5.4. Resolva a equação integral

$$1 + t + \int_0^t \sin 2(t - \tau)y(\tau)d\tau = y(t)$$

5.5. Considere

$$f(t) = \begin{cases} t, & \text{se } 0 < t < 1, \\ 2 - t, & \text{se } 1 \leq t < 2, \\ 0, & \text{se } t \geq 2 \end{cases} \quad \text{e} \quad g(t) = \begin{cases} 1, & \text{se } 0 < t < 1, \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}.$$

Calcule $f * g$.

3.6 Tabela de Transformadas de Laplace

Transformadas de Laplace Elementares			
$f(t) = \mathcal{L}^{-1}(F)(t)$	$F(s) = \mathcal{L}(f)(s)$	$f(t) = \mathcal{L}^{-1}(F)(t)$	$F(s) = \mathcal{L}(f)(s)$
1	$\frac{1}{s}, \text{ para } s > 0$	e^{at}	$\frac{1}{s-a}, \text{ para } s > a$
$\cos at$	$\frac{s}{s^2 + a^2}, \text{ para } s > 0$	$\sin at$	$\frac{a}{s^2 + a^2}, \text{ para } s > 0$
$t^n, \text{ para } n = 0, 1, 2, \dots$	$\frac{n!}{s^{n+1}}, \text{ para } s > 0$	$e^{at}f(t)$	$F(s-a)$
$f'(t)$	$sF(s) - f(0)$	$f''(t)$	$s^2F(s) - sf(0) - f'(0)$
$t \cos at$	$\frac{s^2 - a^2}{(s^2 + a^2)^2}, s > 0$	$t \sin at$	$\frac{2as}{(s^2 + a^2)^2}, s > 0$
$\sin at - at \cos at$	$\frac{2a^3}{(s^2 + a^2)^2}, s > 0$	$\delta(t - t_0)$	$e^{-t_0 s}, s > 0$
$u_a(t) = \begin{cases} 0, & 0 \leq t < a \\ 1, & t \geq a \end{cases}$	$\frac{e^{-as}}{s}, \text{ para } s > 0$	$u_a(t)f(t-a)$	$e^{-as}F(s)$
$f(t)\delta(t - t_0)$	$e^{-t_0 s}f(t_0), s > 0$	$\int_0^t f(t-\tau)g(\tau)d\tau$	$F(s)G(s)$

3.7 Respostas dos Exercícios

1. Introdução (página 506)

1.1.

$$\begin{aligned} F(s) &= \frac{2s-5}{s(s-3)(s+4)} \\ &= \frac{A}{s} + \frac{B}{s-3} + \frac{C}{s+4} \end{aligned}$$

Multiplicando por $s(s-3)(s+4)$ obtemos

$$2s-5 = A(s-3)(s+4) + Bs(s+4) + Cs(s-3)$$

Substituindo-se $s = 0, 3, -4$ obtemos $A = \frac{5}{12}$, $B = \frac{1}{21}$ e $C = -\frac{13}{28}$. Assim,

$$f(t) = \frac{5}{12} + \frac{1}{21}e^{3t} - \frac{13}{28}e^{-4t}$$

$$\begin{aligned} 1.2. \quad (a) \quad Y(s) &= \frac{2}{s^2(s+2)(s-1)} + \frac{1}{(s+2)(s-1)} \\ &= \frac{2+s^2}{s^2(s+2)(s-1)} \\ &= \frac{A}{s} + \frac{B}{s^2} + \frac{C}{s+2} + \frac{D}{s-1} \end{aligned}$$

Multiplicando-se por $s^2(s+2)(s-1)$ obtemos

$$s^2 + 2 = \tag{3.11}$$

$$= As(s+2)(s-1) + B(s+2)(s-1) + Cs^2(s-1) + Ds^2(s+2)$$

Substituindo-se $s = -2, 0, 1$ obtemos

$$\begin{cases} 6 &= -12C \\ 2 &= -2B \\ 3 &= 3D \end{cases}$$

que tem solução $B = -1$, $C = -\frac{1}{2}$ e $D = 1$. Comparando-se os coeficientes dos termos de grau 3 em (3.11):

$$0 = A + C + D = A - \frac{1}{2} + 1$$

de onde obtemos $A = -\frac{1}{2}$.

Assim,

$$Y(s) = \frac{-1/2}{s} - \frac{1}{s^2} - \frac{1/2}{s+2} + \frac{1}{s-1}$$

$$y(t) = -\frac{1}{2} - t - \frac{1}{2}e^{-2t} + e^t$$

(b) $Y(s) = \frac{3}{(s-1)(s^2+4)} = \frac{A}{s-1} + \frac{Bs+C}{s^2+4}$

O numerador da segunda parcela é de 1º grau ($Bs + C$), pois o denominador tem raízes complexas. Multiplicando-se a equação pelo denominador $(s-1)(s^2+4)$ obtemos

$$3 = A(s^2+4) + (Bs+C)(s-1)$$

Substituindo-se $s = 1$ obtemos $A = 3/5$. Comparando-se os coeficientes dos termos de grau 2 e os de grau 1 obtemos

$$\begin{cases} 0 &= A + B = 3/5 + B \\ 0 &= -B + C \end{cases}$$

que tem solução $B = -3/5$ e $C = -3/5$. Assim,

$$Y(s) = \frac{3}{(s-1)(s^2+4)} = \frac{3}{5} \frac{1}{s-1} - \frac{3}{5} \frac{s+1}{s^2+4} = \frac{3}{5} \frac{1}{s-1} - \frac{3}{5} \frac{s}{s^2+4} - \frac{3}{10} \frac{2}{s^2+4}$$

$$y(t) = \frac{3}{5}e^t - \frac{3}{5} \cos 2t - \frac{3}{10} \sin 2t$$

$$h(t) = f(t) - ag(t)$$

Aplicando-se a linearidade da transformada de Laplace obtemos

$$\begin{aligned}
 H(s) &= \mathcal{L}(h)(s) \\
 &= \mathcal{L}(f)(s) - a \mathcal{L}(g)(s) \\
 &= F(s) - a G(s) \\
 &= \frac{a}{s^2 + a^2} - a \frac{s^2 - a^2}{(s^2 + a^2)^2} \\
 &= \frac{2a^3}{(s^2 + a^2)^2}
 \end{aligned}$$

1.4. $Y(s) = \frac{2s-1}{(s^2-1)(4s^2+4s+5)} = \frac{2s-1}{(s-1)(s+1)(4s^2+4s+5)} = \frac{A}{s-1} + \frac{B}{s+1} + \frac{Cs+D}{4s^2+4s+5}.$

Multiplicando-se a equação pelo denominador $(s^2 - 1)(4s^2 + 4s + 5)$ obtemos

$$2s - 1 = A(s + 1)(4s^2 + 4s + 5) + B(s - 1)(4s^2 + 4s + 5) + (Cs + D)(s^2 - 1)$$

Substituindo-se $s = +1, -1$ obtemos:

$$1 = 26A \text{ e } -3 = -10B. \text{ Logo, } A = 1/26 \text{ e } B = 3/10.$$

Comparando-se os coeficientes dos termos de graus 3 e 2 obtemos:

$$0 = 4A + 4B + C = 88/65 + C \text{ e } 0 = 8A + D = 4/13 + D. \text{ Logo, } C = -88/65 \text{ e } D = -20/65.$$

$$\text{Assim, } Y(s) = \frac{1}{26} \frac{1}{s-1} + \frac{3}{10} \frac{1}{s+1} - \frac{1}{65} \frac{88s+20}{4s^2+4s+5}$$

$$Y(s) = \frac{1}{26} \frac{1}{s-1} + \frac{3}{10} \frac{1}{s+1} - \frac{1}{65} \frac{22s+5}{s^2+s+5/4} =$$

$$\frac{1}{26} \frac{1}{s-1} + \frac{3}{10} \frac{1}{s+1} - \frac{1}{65} \frac{22(s+1/2)-6}{(s+1/2)^2+1} =$$

$$\frac{1}{26} \frac{1}{s-1} + \frac{3}{10} \frac{1}{s+1} - \frac{22}{65} \frac{(s+1/2)}{(s+1/2)^2+1} + \frac{6}{65} \frac{1}{(s+1/2)^2+1}$$

Logo, a transformada de Laplace inversa de $Y(s)$ é

$$y(t) = \frac{1}{26} e^t + \frac{3}{10} e^{-t} - \frac{22}{65} e^{-t/2} \cos t + \frac{6}{65} e^{-t/2} \sen t.$$

1.5. $\int_0^\infty e^{-st} f(t) dt \leq \int_0^\infty e^{-st} |f(t)| dt \leq M \int_0^\infty e^{-(s-k)t} dt = \frac{M}{s-k}, \text{ para } s > k.$

Logo, $\mathcal{L}(f)(s) = F(s)$ está definida para $s > k$ e além disso

$$\lim_{s \rightarrow \infty} F(s) = 0.$$

- 1.6. Para $s > 0$ temos que a reta tangente à parábola $y(t) = t^2 - st$ em $t = s$ é $y(t) = st - s^2$ e assim
- $$\lim_{T \rightarrow \infty} \int_0^T e^{-st} e^{t^2} dt = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_0^T e^{t^2 - st} dt$$
- $$\geq \lim_{T \rightarrow \infty} \int_0^T e^{st - s^2} dt \geq e^{-s^2} \lim_{T \rightarrow \infty} \int_0^T e^{st} dt = \infty.$$
- Logo, $f(t) = e^{t^2}$ não tem transformada de Laplace.

- 1.7. (a) Usando integração por partes temos que

$$\begin{aligned} \Gamma(p+1) &= \int_0^\infty e^{-x} x^p dx \\ &= -x^p e^{-x} \Big|_0^\infty + p \int_0^\infty e^{-x} x^{p-1} dx \\ &= p\Gamma(p). \end{aligned}$$

pois $\lim_{x \rightarrow \infty} x^p e^{-x} = 0$.

- (b) $\Gamma(n+1) = n\Gamma(n) = n(n-1) \cdots \Gamma(1) = n(n-1) \cdots 1 = n!$
- (c) Fazendo a mudança de variáveis $x = st$ obtemos que

$$\begin{aligned} \mathcal{L}(t^p)(s) &= \int_0^\infty e^{-st} t^p dt = \\ &= \frac{1}{s^{p+1}} \int_0^\infty e^{-x} x^{p-1} dx = \frac{\Gamma(p)}{s^{p+1}}. \end{aligned}$$

(d) $\mathcal{L}(t^{1/2})(s) = \frac{\Gamma(3/2)}{s^{3/2}} = \frac{\frac{1}{2}\Gamma(1/2)}{s^{3/2}} = \frac{\sqrt{\pi}}{2s^{3/2}}.$

2. Problemas de Valor Inicial (página 519)

2.1. (a) $(s^2 Y(s) - sy(0) - y'(0)) + 2(sY(s) - y(0)) + 5Y(s) = 4 \frac{s+1}{(s+1)^2 + 4}$

Explicação para o segundo membro:

Seja $f(t) = e^{-t} \cos(2t)$. Seja $g(t) = \cos(2t)$. Então,

$$f(t) = e^{-t} g(t).$$

Pela tabela da página 566,

$$G(s) = \frac{s}{s^2 + 4},$$

$$F(s) = G(s+1) = \frac{s+1}{(s+1)^2 + 4}.$$

Substituindo-se os valores $y(0) = 1$ e $y'(0) = 0$ obtemos

$$(s^2 + 2s + 5) Y(s) = 4 \frac{s+1}{(s+1)^2 + 4} + s + 2$$

Assim,

$$\begin{aligned} Y(s) &= \frac{4s+4}{(s^2+2s+5)^2} + \frac{s+2}{s^2+2s+5} \\ &= 4 \frac{s+1}{[(s+1)^2+4]^2} + \frac{s+1+1}{(s+1)^2+4} \\ &= \frac{2 \cdot 2(s+1)}{[(s+1)^2+4]^2} + \frac{s+1}{(s+1)^2+4} + \\ &\quad + \frac{1}{2} \frac{2}{(s+1)^2+4} \end{aligned}$$

De onde obtemos

$$y(t) = te^{-t} \sen 2t + e^{-t} \cos 2t + \frac{1}{2}e^{-t} \sen 2t.$$

Aqui usamos a tabela da página 566 e o 1º Teorema de Deslocamento.

$$(b) (s^2 Y(s) - sy(0) - y'(0)) + 4Y(s) = \frac{2}{s^3} + \frac{3}{s-1}$$

Substituindo-se os valores $y(0) = 0$ e $y'(0) = 2$ obtemos

$$(s^2 + 4) Y(s) = \frac{2}{s^3} + \frac{3}{s-1} + 2 \text{ Assim,}$$

$$Y(s) = \quad (3.12)$$

$$= \frac{2}{s^3(s^2+4)} + \frac{3}{(s-1)(s^2+4)} + \frac{2}{s^2+4}$$

A primeira parcela de (3.12) pode ser decomposta como

$$\frac{2}{s^3(s^2+4)} = \frac{A}{s} + \frac{B}{s^2} + \frac{C}{s^3} + \frac{Ds+E}{s^2+4}$$

Multiplicando-se a equação acima por $s^3(s^2 + 4)$ obtemos

$$2 = \quad (3.13)$$

$$= As^2(s^2 + 4) + Bs(s^2 + 4) + C(s^2 + 4) + (Ds + E)s^3 = 4C + 4Bs + (4A + C)s^2 + (B + E)s^3 + (A + D)s^4$$

Substituindo-se $s = 0$ em (3.13) obtemos $2 = 4C$. De onde obtemos $C = \frac{1}{2}$. Comparando-se os coeficientes dos termos de graus 1, 2, 3 e 4 obtemos

$$\begin{cases} 0 &= 4B \\ 0 &= 4A + C \\ 0 &= E + B \\ 0 &= D + A \end{cases}$$

De onde obtemos $A = -\frac{1}{8}$, $B = 0$, $D = \frac{1}{8}$ e $E = 0$.

Assim, substituindo-se os valores encontrados obtemos

$$\frac{2}{s^3(s^2+4)} = -\frac{1/8}{s} + \frac{1}{4} \frac{2}{s^3} + \frac{1}{8} \frac{s}{s^2+4}$$

A segunda parcela de (3.12) pode ser decomposta como

$$\frac{3}{(s-1)(s^2+4)} = \frac{A}{s-1} + \frac{Bs+C}{s^2+4}$$

$$3 = A(s^2+4) + (Bs+C)(s-1)$$

Substituindo-se $s = 1$ obtemos $A = 3/5$. Comparando-se os coeficientes dos termos de grau 2 e os de grau 1 obtemos

$$\begin{cases} 0 &= A + B = 3/5 + B \\ 0 &= -B + C \end{cases}$$

que tem solução $B = -3/5$ e $C = -3/5$. Assim,

$$\frac{3}{(s-1)(s^2+4)} = \frac{3}{5} \frac{1}{s-1} - \frac{3}{5} \frac{s+1}{s^2+4} = \frac{3}{5} \frac{1}{s-1} - \frac{3}{5} \frac{s}{s^2+4} - \frac{3}{10} \frac{2}{s^2+4}$$

$$Y(s) = -\frac{1}{8} \frac{1}{s} + \frac{1}{4} \frac{2}{s^3} + \frac{1}{8} \frac{s}{s^2+4} + \frac{3}{5} \frac{1}{s-1} - \frac{3}{5} \frac{s}{s^2+4} - \frac{3}{10} \frac{2}{s^2+4} + \frac{2}{s^2+4}$$

$$y(t) = -\frac{1}{8} + \frac{1}{4} t^2 - \frac{19}{40} \cos 2t + \frac{3}{5} e^t + \frac{7}{10} \sin 2t$$

$$(c) (s^2 Y(s) - s y(0) - y'(0)) - 2(s Y(s) - y(0)) + Y(s) = \frac{1}{(s-1)^2} + \frac{4}{s}$$

Substituindo-se os valores $y(0) = 1$ e $y'(0) = 1$ obtemos

$$(s^2 - 2s + 1) Y(s) = \frac{1}{(s-1)^2} + \frac{4}{s} + s - 1$$

Assim,

$$Y(s) = \frac{1}{(s-1)^4} + \frac{4}{s(s-1)^2} + \frac{s-1}{(s-1)^2} = \frac{1}{(s-1)^4} + \frac{4}{s(s-1)^2} + \frac{1}{s-1}$$

$$\frac{4}{s(s-1)^2} = \frac{A}{s} + \frac{B}{s-1} + \frac{C}{(s-1)^2}$$

Multiplicando-se por $s(s-1)^2$ obtemos

$$4 = A(s-1)^2 + B(s-1)s + Cs \quad (3.14)$$

Substituindo-se $s = 0, 1$ obtemos

$$\begin{cases} 4 &= A \\ 4 &= C \end{cases}$$

Comparando-se os coeficientes dos termos de grau 2 na equação (3.14) obtemos

$$0 = A + B = A + 4$$

Logo, $B = -4$.

Assim,

$$Y(s) = \frac{1}{(s-1)^4} + \frac{4}{s} - \frac{4}{s-1} + \frac{4}{(s-1)^2} + \frac{1}{s-1} = \frac{1}{6} \frac{6}{(s-1)^4} + \frac{4}{s} - \frac{3}{s-1} + \frac{4}{(s-1)^2}$$

$$y(t) = \frac{1}{6} t^3 e^t + 4 - 3e^t + 4te^t$$

$$(d) (s^2 Y(s) - sy(0) - y'(0)) - 2(sY(s) - y(0)) - 3Y(s) = 3 \frac{1}{(s-2)^2}$$

Substituindo-se os valores $y(0) = 1$ e $y'(0) = 0$ obtemos

$$(s^2 - 2s - 3)Y(s) = 3 \frac{1}{(s-2)^2} + s - 2$$

Assim,

$$\begin{aligned} Y(s) &= 3 \frac{1}{(s^2 - 2s - 3)(s-2)^2} + \frac{s-2}{s^2 - 2s - 3} \\ &= 3 \frac{1}{(s-3)(s+1)(s-2)^2} + \frac{s-2}{(s-3)(s+1)} \\ &= \frac{3 + (s-2)^3}{(s-3)(s+1)(s-2)^2} \\ &= \frac{A}{s-3} + \frac{B}{s+1} + \frac{C}{s-2} + \frac{D}{(s-2)^2} \end{aligned}$$

Multiplicando-se $Y(s)$ por $(s-3)(s+1)(s-2)^2$ obtemos

$$3 + (s-2)^3 = \quad (3.15)$$

$$= A(s+1)(s-2)^2 + B(s-3)(s-2)^2 + C(s-3)(s+1)(s-2) + D(s-3)(s+1)$$

Substituindo-se $s = -1, 2$ e 3 na equação acima obtemos $A = 1$, $B = \frac{2}{3}$ e $D = -1$. Comparando-se os coeficientes dos termos de grau 3 em (3.15) obtemos

$$1 = A + B + C = 1 + \frac{2}{3} + C$$

que tem solução $C = -\frac{2}{3}$.

Assim,

$$Y(s) = \frac{1}{s-3} + \frac{2/3}{s+1} - \frac{2/3}{s-2} - \frac{1}{(s-2)^2}$$

$$y(t) = e^{3t} + \frac{2}{3}e^{-t} - \frac{2}{3}e^{2t} - te^{2t}$$

(e) $(s^2Y(s) - sy(0) - y'(0)) + 4Y(s) = 3\frac{2}{s^2+4}$

Substituindo-se os valores $y(0) = 2$ e $y'(0) = -1$ obtemos

$$(s^2 + 4)Y(s) = 3\frac{2}{s^2 + 4} + 2s - 1$$

Assim,

$$\begin{aligned} Y(s) &= \frac{6}{(s^2 + 4)^2} + \frac{2s - 1}{s^2 + 4} \\ &= \frac{6}{16} \frac{16}{(s^2 + 4)^2} + 2\frac{s}{s^2 + 4} - \frac{1}{s^2 + 4} \\ &= \frac{3}{8} \frac{16}{(s^2 + 4)^2} + 2\frac{s}{s^2 + 4} - \frac{1}{2} \frac{2}{s^2 + 4} \end{aligned}$$

$$y(t) = \frac{3}{8}(\sin 2t - 2t \cos 2t) + 2 \cos 2t - \frac{1}{2} \sin 2t$$

$$= 2 \cos 2t - \frac{1}{8} \sin 2t - \frac{3}{4} t \cos 2t$$

(f) $(s^2Y(s) - sy(0) - y'(0)) + 4Y(s) = \frac{1}{s-1}$

Substituindo-se os valores $y(0) = 0$ e $y'(0) = 0$ obtemos

$$(s^2 + 4)Y(s) = \frac{1}{s-1}$$

Assim,

$$Y(s) = \frac{1}{(s-1)(s^2+4)}$$

$$Y(s) = \frac{A}{s-1} + \frac{Bs+C}{s^2+4}$$

Multiplicando-se $Y(s)$ por $(s-1)(s^2+4)$:

$$1 = A(s^2+4) + (Bs+C)(s-1)$$

Substituindo-se $s = 1$ obtemos $A = 1/5$. Comparando-se os coeficientes dos termos de grau 2 e os de grau 0 obtemos o sistema

$$\begin{cases} 1/5 + B = 0 \\ 4/5 - C = 1 \end{cases}$$

Resolvendo-se o sistema obtemos a solução $B = -1/5$ e $C = -1/5$. Assim,

$$\begin{aligned} Y(s) &= \frac{1}{5} \frac{1}{s-1} - \frac{1}{5} \frac{s+1}{s^2+4} \\ &= \frac{1}{5} \frac{1}{s-1} - \frac{1}{5} \frac{s}{s^2+4} - \frac{1}{5} \frac{1}{s^2+4} \end{aligned}$$

$$y(t) = \frac{1}{5}e^t - \frac{1}{5}\cos 2t - \frac{1}{10}\sin 2t$$

(g) $(s^2Y(s) - sy(0) - y'(0)) - 2(sY(s) - y(0)) + Y(s) = \frac{1}{s-2}$

Substituindo-se os valores $y(0) = 0$ e $y'(0) = 0$ obtemos

$$(s^2 - 2s + 1)Y(s) = \frac{1}{s-2}$$

Assim,

$$\begin{aligned} Y(s) &= \frac{1}{(s-2)(s^2-2s+1)} \\ &= \frac{1}{(s-2)(s-1)^2} \end{aligned}$$

$$\frac{1}{(s-2)(s-1)^2} = \frac{A}{s-2} + \frac{B}{s-1} + \frac{C}{(s-1)^2}$$

Multiplicando-se por $(s-2)(s-1)^2$ obtemos

$$1 = A(s-1)^2 + B(s-1)(s-2) + C(s-2)$$

Substituindo-se $s = 1$ e $s = 2$ obtemos $C = -1$ e $A = 1$. Comparando-se os termos de grau 2 obtemos

$0 = A + B = 1 + B$. Logo, $B = -1$. Assim,

$$Y(s) = \frac{1}{s-2} - \frac{1}{s-1} - \frac{1}{(s-1)^2}$$

$$y(t) = e^{2t} - e^t - te^t$$

(h) $(s^2 Y(s) - sy(0) - y'(0)) + 2(sY(s) - y(0)) + 2Y(s) = \frac{1}{s-1}$

Substituindo-se os valores $y(0) = 0$ e $y'(0) = 0$ obtemos

$$(s^2 + 2s + 2)Y(s) = \frac{1}{s-1}$$

Assim,

$$Y(s) = \frac{1}{(s-1)(s^2+2s+2)} = \frac{A}{s-1} + \frac{Bs+C}{s^2+2s+2}$$

Multiplicando-se $Y(s)$ por $(s-1)(s^2+2s+2)$ obtemos

$$1 = A(s^2 + 2s + 2) + (Bs + C)(s - 1)$$

Substituindo-se $s = 1$ obtemos $A = 1/5$. Comparando-se os coeficientes dos termos de grau 2 e os de grau 0 obtemos

$$\begin{cases} 1/5 + B = 0 \\ 2/5 - C = 1 \end{cases}$$

que tem solução $B = -1/5$ e $C = -3/5$. Assim,

$$\begin{aligned} Y(s) &= \frac{1}{5} \frac{1}{s-1} - \frac{1}{5} \frac{s+3}{s^2+2s+2} \\ &= \frac{1}{5} \frac{1}{s-1} - \frac{1}{5} \frac{s+3}{(s+1)^2+1} \\ &= \frac{1}{5} \frac{1}{s-1} - \frac{1}{5} \frac{s+1}{(s+1)^2+1} - \frac{2}{5} \frac{1}{(s+1)^2+1} \end{aligned}$$

De onde obtemos que a solução do problema de valor inicial é dado por

$$y(t) = \frac{1}{5}e^t - \frac{1}{5}e^{-t} \cos t - \frac{2}{5}e^{-t} \sin t.$$

- 2.2. (a)** A equação característica é $r^2 - 6r + 8 = 0$, que tem raízes $r_1 = 2$ e $r_2 = 4$. A equação homogênea correspondente tem solução geral

$$y(t) = c_1 e^{2t} + c_2 e^{4t}.$$

Uma solução particular da equação não homogênea é da forma $y_p(t) = A \cos t + B \sin t$. Substituindo-se $y_p(t)$, $y_p'(t)$ e $y_p''(t)$ na equação:

$$(7A - 6B) \cos t + (6A + 7B) \sin t = \sin t$$

De onde obtemos $A = 6/85$ e $B = 7/85$. A solução geral da equação não homogênea é

$$y(t) = \frac{6}{85} \cos t + \frac{7}{85} \sin t + c_1 e^{2t} + c_2 e^{4t}$$

$$y'(0) = 0 = \frac{7}{85} + 2c_1 + 4c_2$$

$$y(0) = 0 = \frac{6}{85} + c_1 + c_2$$

$$c_1 = -1/10 \text{ e } c_2 = 1/34.$$

$$y(t) = \frac{6}{85} \cos t + \frac{7}{85} \sin t - \frac{1}{10} e^{2t} + \frac{1}{34} e^{4t}$$

$$(b) (s^2 Y(s) - sy(0) - y'(0)) - 6(sY(s) - y(0)) + 8Y(s) = \frac{1}{s^2+1}$$

Substituindo-se os valores $y(0) = 0$ e $y'(0) = 0$ obtemos

$$(s^2 - 6s + 8) Y(s) = \frac{1}{s^2+1}$$

Assim,

$$Y(s) = \frac{1}{(s^2 - 6s + 8)(s^2 + 1)}$$

$$\frac{1}{(s^2 - 6s + 8)(s^2 + 1)} = \frac{A}{s-2} + \frac{B}{s-4} + \frac{Cs+D}{s^2+1}$$

Multiplicando-se por $(s-2)(s-4)(s^2+1)$ obtemos

$$1 = A(s-4)(s^2+1) + B(s-2)(s^2+1) + (Cs+D)(s-2)(s-4)$$

Substituindo-se $s = 2, 4$ obtemos

$$\begin{cases} 1 = -10A \\ 1 = 34B \end{cases}$$

que tem solução $A = -1/10$, $B = 1/34$.

Comparando-se os coeficientes dos termos de grau 3 obtemos

$$0 = C + B + A, \text{ de onde obtemos } C = 6/85.$$

Comparando-se os coeficientes dos termos de grau 2 obtemos

$$0 = D - 6C - 2B - 4A, \text{ de onde obtemos } D = 7/85. \text{ Assim,}$$

$$Y(s) = -\frac{1}{10} \frac{1}{s-2} + \frac{1}{34} \frac{1}{s-4} + \frac{6}{85} \frac{s}{s^2+1} + \frac{7}{85} \frac{1}{s^2+1}$$

$$y(t) = -\frac{1}{10} e^{2t} + \frac{1}{34} e^{4t} + \frac{6}{85} \cos t + \frac{7}{85} \sin t$$

2.3.

$$f'(t) = \cos at - a t \sin at$$

Aplicando a transformada de Laplace e usando o Teorema 3.6 de Derivação, já que $f(t)$ é admissível e contínua e $f'(t)$ é contínua, obtemos

$$sF(s) - f(0) = \frac{s}{s^2 + a^2} - a \frac{2as}{(s^2 + a^2)^2}$$

Isolando-se $F(s)$

$$F(s) = \frac{s^2 - a^2}{(s^2 + a^2)^2}.$$

Como

$$\int_0^{\infty} e^{-st} t \cos at \, dt \leq \int_0^{\infty} e^{-st} t \, dt < \infty, \quad \text{para } s > 0,$$

então a transformada de Laplace $\mathcal{L}(f)(s) = F(s)$ está definida para $s > 0$.

$$2.4. \quad (s^2 Y(s) - sy(0) - y'(0)) + 4(sY(s) - y(0)) + 13Y(s) = \frac{3}{(s+2)^2 + 9}$$

Substituindo-se os valores $y(0) = 1$ e $y'(0) = 2$ obtemos

$$(s^2 + 4s + 13)Y(s) = \frac{3}{(s+2)^2 + 9} + s + 6$$

Assim,

$$\begin{aligned} Y(s) &= \frac{3}{(s^2 + 4s + 13)^2} + \frac{s + 6}{s^2 + 4s + 13} \\ &= \frac{1}{2 \cdot 3^2} \frac{2 \cdot 3 \cdot 3^2}{[(s+2)^2 + 9]^2} + \frac{s + 2 + 4}{(s+2)^2 + 9} \\ &= \frac{1}{18} \frac{2 \cdot 3^3}{[(s+2)^2 + 9]^2} + \frac{s + 2}{(s+2)^2 + 9} + \\ &\quad + \frac{4}{3} \frac{3}{(s+2)^2 + 9}. \end{aligned}$$

De onde obtemos que a solução do PVI é

$$y(t) = \frac{1}{18}e^{-2t}(\sin 3t - 3t \cos 3t) + e^{-2t} \cos 3t + \frac{4}{3}e^{-2t} \sin 3t.$$

Aqui usamos a tabela da página 566 e o 1º Teorema de Deslocamento:

$$\mathcal{L}[e^{bt}g(t)](s) = G(s - b),$$

onde $G(s) = \mathcal{L}[g(t)](s)$.

$$2.5. \quad (a) \quad F'(s) = \frac{d}{ds} \mathcal{L}(f)(s) = \int_0^\infty \frac{d}{ds} e^{-st} f(t) dt \\ = \int_0^\infty (-t) e^{-st} f(t) dt = \mathcal{L}(-t f(t))(s).$$

$$(b) \quad F^{(n)}(s) = \frac{d^n}{ds^n} \mathcal{L}(f)(s) = \int_0^\infty \frac{d^n}{ds^n} e^{-st} f(t) dt \\ = \int_0^\infty (-t)^n e^{-st} f(t) dt = \mathcal{L}((-t)^n f(t))(s).$$

$$(c) \quad \mathcal{L}(-t \operatorname{sen} at)(s) = F'(s) = -\frac{2as}{(s^2+a^2)^2}. \\ \mathcal{L}(t^2 \operatorname{sen} at)(s) = F''(s) = \frac{2a(3s^2-a^2)}{(s^2+a^2)^3}, \text{ para } s > 0.$$

$$2.6. \quad \mathcal{L}(f(at))(s) = \int_0^\infty e^{-st} f(at) dt \\ = \int_0^\infty e^{-s\tau/a} f(\tau) \frac{d\tau}{s} = \frac{1}{s} \mathcal{L}(f(t))\left(\frac{s}{a}\right).$$

3. Equações com Termo não Homogêneo Descontínuo (página 540)

3.1. (a)

$$f(t) = \begin{cases} t, & 0 \leq t < 1 \\ -(t-2), & 1 \leq t < 2 \\ 0, & t \geq 2 \end{cases}$$

$$f(t) = t - tu_1(t) - (t-2)u_1(t) + (t-2)u_2(t)$$

(b)

$$f(t) = t - 2(t-1)u_1(t) + (t-2)u_2(t)$$

$$F(s) = \frac{1}{s^2} - 2\frac{e^{-s}}{s^2} + \frac{e^{-2s}}{s^2}$$

$$3.2. \quad (a) \quad f(t) = \operatorname{sen} t - u_\pi(t) \operatorname{sen} t + u_\pi(t) \cos t - u_{2\pi}(t) \cos t + u_{2\pi}(t) e^{-\frac{t}{10}}$$

$$(b) \quad f(t) = \operatorname{sen} t + u_\pi(t)(\operatorname{sen}(t-\pi) - \cos(t-\pi)) + u_{2\pi}(t)(-\cos(t-2\pi) + e^{-\frac{t}{10}}) \\ F(s) = \frac{1}{1+s^2} + e^{-\pi s} \left(\frac{1}{1+s^2} - \frac{s}{1+s^2} \right) + e^{-2\pi s} \left(-\frac{s}{1+s^2} + e^{-\frac{s}{10}} \frac{1}{s+\frac{1}{10}} \right)$$

3.3.

$$f(t) = \begin{cases} \cos t, & 0 \leq t < \pi/2 \\ -\cos t, & \pi/2 \leq t < 3\pi/2 \\ 0, & t \geq 3\pi/2 \end{cases}$$

$$\begin{aligned} f(t) &= \cos t - u_{\pi/2}(t) \cos t - u_{\pi/2}(t) \cos t + u_{3\pi/2}(t) \cos t \\ &= \cos t - 2u_{\pi/2}(t) \cos[(t - \pi/2) + \pi/2] \\ &\quad + u_{3\pi/2}(t) \cos[(t - 3\pi/2) + 3\pi/2] \\ &= \cos t + 2u_{\pi/2}(t) \sin(t - \pi/2) + u_{3\pi/2}(t) \sin(t - 3\pi/2) \end{aligned}$$

$$F(s) = \frac{s}{1+s^2} + 2e^{-\frac{\pi}{2}s} \frac{1}{1+s^2} + e^{-3\pi s/2} \frac{1}{1+s^2}$$

3.4. (a) $(s^2 Y(s) - sy(0) - y'(0)) + Y(s) = \frac{1}{s} - \frac{e^{-\pi s/2}}{s}$ Substituindo-se os valores $y(0) = 0$ e $y'(0) = 1$ obtemos

$$(s^2 + 1) Y(s) = \frac{1}{s} - \frac{e^{-\pi s/2}}{s} + 1$$

Assim,

$$\begin{aligned} Y(s) &= \frac{1}{s(s^2+1)} + \frac{1}{s^2+1} - \frac{e^{-\pi s/2}}{s(s^2+1)} \\ &= \frac{1}{s^2+1} + H(s) - e^{-\pi s/2} H(s), \end{aligned}$$

em que

$$H(s) = \frac{1}{s(s^2+1)}$$

$$y(t) = \sin t + h(t) - h(t - \pi/2)u_{\pi/2}(t).$$

$$H(s) = \frac{1}{s(s^2+1)} = \frac{A}{s} + \frac{Bs+C}{s^2+1}.$$

Multiplicando-se $H(s)$ por $s(s^2+1)$ obtemos

$$1 = A(s^2+1) + (Bs+C)s$$

Substituindo-se $s = 0$ e $s = i$

$$\begin{cases} 1 = A \\ 1 = (Bi + C)i = -B + Ci \end{cases}$$

De onde obtemos $A = 1$. Comparando-se as partes real e imaginária da segunda equação obtemos $B = -1$ e $C = 0$.

Assim,

$$H(s) = \frac{1}{s} - \frac{s}{s^2 + 1}$$

De onde obtemos que a função cuja transformada de Laplace é $H(s)$ é

$$h(t) = 1 - \cos t$$

e a solução do problema de valor inicial é dado por

$$y(t) = \sin t + h(t) - h(t - \pi/2)u_{\pi/2}(t) = 1 - \cos t + \sin t - u_{\pi/2}(t)(1 - \sin t).$$

$$(b) (s^2 Y(s) - sy(0) - y'(0)) + 2(sY(s) - y(0)) + 2Y(s) = 2\frac{e^{-\pi s}}{s} - 2\frac{e^{-2\pi s}}{s}$$

Substituindo-se os valores $y(0) = 0$ e $y'(0) = 1$ obtemos

$$(s^2 + 2s + 2)Y(s) = 2\frac{e^{-\pi s} - e^{-2\pi s}}{s} + 1$$

Assim,

$$\begin{aligned} Y(s) &= 2\frac{e^{-\pi s} - e^{-2\pi s}}{s(s^2 + 2s + 2)} + \frac{1}{s^2 + 2s + 2} \\ &= (e^{-\pi s} - e^{-2\pi s})H(s) + \frac{1}{(s+1)^2 + 1}, \end{aligned}$$

em que

$$H(s) = \frac{2}{s(s^2 + 2s + 2)}$$

$$y(t) = h(t - \pi)u_{\pi}(t) - h(t - 2\pi)u_{2\pi}(t) + e^{-t} \sin t.$$

$$H(s) = \frac{A}{s} + \frac{Bs+C}{s^2+2s+2}.$$

Multiplicando-se $H(s)$ por $s(s^2 + 2s + 2)$ obtemos

$$2 = A(s^2 + 2s + 2) + (Bs + C)s$$

Substituindo-se $s = 0$ obtemos $A = 1$. Comparando-se os coeficientes dos termos de grau 2 e os de grau 1 obtemos

$$\begin{cases} 0 &= A + B = 1 + B \\ 0 &= 2A + C = 2 + C \end{cases}$$

que tem solução $B = -1$ e $C = -2$. Assim,

$$\begin{aligned} H(s) &= \frac{1}{s} - \frac{s+2}{s^2+2s+2} = \frac{1}{s} - \frac{s+2}{(s+1)^2+1} \\ &= \frac{1}{s} - \frac{s+1}{(s+1)^2+1} - \frac{1}{(s+1)^2+1} \end{aligned}$$

De onde obtemos que a função cuja transformada de Laplace é $H(s)$ é

$$h(t) = 1 - e^{-t} \cos t - e^{-t} \sin t$$

e a solução do problema de valor inicial é dado por

$$y(t) = h(t - \pi)u_{\pi}(t) - h(t - 2\pi)u_{2\pi}(t) + e^{-t} \sin t.$$

$$(c) \quad (s^2 Y(s) - sy(0) - y'(0)) + 4Y(s) = \frac{1}{s^2+1} - e^{-2\pi s} \frac{1}{s^2+1}$$

Substituindo-se os valores $y(0) = 0$ e $y'(0) = 0$ obtemos

$$(s^2 + 4) Y(s) = \frac{1}{s^2+1} - \frac{e^{-2\pi s}}{s^2+1}$$

Assim,

$$Y(s) = \frac{1}{(s^2+1)(s^2+4)} - \frac{e^{-2\pi s}}{(s^2+1)(s^2+4)}$$

$$= H(s) - e^{-2\pi s} H(s)$$

em que

$$H(s) = \frac{1}{(s^2+1)(s^2+4)}$$

$$y(t) = h(t) - u_{2\pi}(t)h(t - 2\pi)$$

$$H(s) = \frac{1}{(s^2+1)(s^2+4)} = \frac{As+B}{s^2+1} + \frac{Cs+D}{s^2+4}$$

Multiplicando-se por $(s^2+1)(s^2+4)$:

$$1 = (As+B)(s^2+4) + (Cs+D)(s^2+1)$$

De onde obtemos $A = 0$, $B = 1/3$, $C = 0$ e $D = -1/3$.

Assim,

$$H(s) = \frac{1/3}{s^2+1} + \frac{-1/3}{s^2+4}$$

$$h(t) = \frac{1}{3} \sin t - \frac{1}{6} \sin 2t$$

$$y(t) = h(t) - u_{2\pi}(t)h(t-2\pi) = \frac{1}{3} \sin t - \frac{1}{6} \sin 2t - u_{2\pi}(t)\left(\frac{1}{3} \sin t - \frac{1}{6} \sin 2t\right)$$

- (d) $(s^2Y(s) - sy(0) - y'(0)) + 4Y(s) = \frac{s}{s^2+1} + e^{-\pi s} \frac{s}{s^2+1}$ Substituindo-se os valores $y(0) = 0$ e $y'(0) = 0$ obtemos

$$(s^2+4)Y(s) = \frac{s}{s^2+1} + \frac{e^{-\pi s}s}{s^2+1}$$

Assim,

$$Y(s) = \frac{s}{(s^2+1)(s^2+4)} + e^{-\pi s} \frac{s}{(s^2+1)(s^2+4)}$$

$$= H(s) + e^{-\pi s}H(s)$$

em que

$$H(s) = \frac{s}{(s^2+1)(s^2+4)} = \frac{As+B}{s^2+1} + \frac{Cs+D}{s^2+4}.$$

$$y(t) = h(t) + u_{\pi}(t)h(t-\pi).$$

Multiplicando-se $H(s)$ por $(s^2+1)(s^2+4)$ obtemos

$$s = (As+B)(s^2+4) + (Cs+D)(s^2+1).$$

De onde obtemos que $A = 1/3$, $B = 0$, $C = -1/3$ e $D = 0$.

$$H(s) = \frac{1}{3} \frac{s}{s^2+1} - \frac{1}{3} \frac{s}{s^2+4}$$

Assim,

$$h(t) = \frac{1}{3} \cos t - \frac{1}{3} \cos 2t$$

e portanto

$$y(t) = h(t) + u_{\pi}(t)h(t - \pi) = \frac{1}{3} \cos t - \frac{1}{3} \cos 2t - u_{\pi}(t)\left(\frac{1}{3} \cos t + \frac{1}{3} \cos 2t\right)$$

$$(e) \quad (s^2 Y(s) - sy(0) - y'(0)) + 3(sY(s) - y(0)) + 2Y(s) = -\frac{10e^{-10s}}{s} - \frac{e^{-10s}}{s^2} + \frac{1}{s^2}$$

Substituindo-se os valores $y(0) = 0$ e $y'(0) = 0$ obtemos

$$(s^2 + 3s + 2)Y(s) = -\frac{10e^{-10s}}{s} - \frac{e^{-10s}}{s^2} + \frac{1}{s^2}$$

Assim,

$$Y(s) = \frac{1}{s^2(s^2+3s+2)} - \frac{e^{-10s}}{s^2(s^2+3s+2)} = Y_1(s) - e^{-10s}H(s)$$

em que

$$Y_1(s) = \frac{1}{s^2(s^2+3s+2)}$$

$$H(s) = -\frac{1+10s}{s^2(s^2+3s+2)}$$

$$y(t) = y_1(t) - u_{10}(t)h(t-10).$$

$$H(s) = \frac{1}{s^2(s^2+3s+2)} = \frac{1}{s^2(s+1)(s+2)} = \frac{A}{s} + \frac{B}{s^2} + \frac{C}{s+1} + \frac{D}{s+2}$$

Multiplicando $H(s)$ por $s^2(s^2+3s+2)$ obtemos

$$-10s - 1 = s^2(3A + B + 2C + D) + s^3(A + C + D) + s(2A + 3B) + 2B.$$

De onde obtemos

$$A = -\frac{17}{4}, B = -\frac{1}{2}, C = 9, D = -\frac{19}{4}$$

Assim,

$$H(s) = -\frac{19}{4(s+2)} + \frac{9}{s+1} - \frac{17}{4s} - \frac{1}{2s^2}$$

$$h(t) = 9e^{-t} - \frac{19e^{-2t}}{4} - \frac{t}{2} - \frac{17}{4}$$

$$Y_1(s) = \frac{1}{s^2(s^2+3s+2)} = \frac{1}{s^2(s+1)(s+2)} = \frac{A}{s} + \frac{B}{s^2} + \frac{C}{s+1} + \frac{D}{s+2}.$$

Multiplicando $Y_1(s)$ por $s^2 (s^2 + 3s + 2)$ obtemos

$$1 = s^2 (3A + B + 2C + D) + s^3 (A + C + D) + s (2A + 3B) + 2B.$$

De onde obtemos

$$A = -\frac{3}{4}, B = \frac{1}{2}, C = 1, D = -\frac{1}{4}.$$

Assim,

$$Y_1(s) = -\frac{1}{4(s+2)} + \frac{1}{s+1} - \frac{3}{4s} + \frac{1}{2s^2}$$

$$y_1(t) = e^{-t} - \frac{e^{-2t}}{4} + \frac{t}{2} - \frac{3}{4}$$

$$y(t) = y_1(t) - u_{10}(t)h(t-10)$$

$$(f) (s^2 Y(s) - sy(0) - y'(0)) + 3(sY(s) - y(0)) + 2Y(s) = \frac{e^{-2s}}{s}$$

Substituindo-se os valores $y(0) = 0$ e $y'(0) = 1$ obtemos

$$(s^2 + 3s + 2) Y(s) = \frac{e^{-2s}}{s} + 1$$

Assim,

$$Y(s) = \frac{1}{s^2+3s+2} + \frac{e^{-2s}}{s(s^2+3s+2)} = Y_1(s) + e^{-2s}H(s)$$

em que

$$H(s) = \frac{1}{s(s^2+3s+2)} \text{ e } Y_1(s) = \frac{1}{s^2+3s+2}$$

$$y(t) = y_1(t) + u_2(t)h(t-2).$$

$$Y_1(s) = \frac{1}{s^2+3s+2} = Y_1(s) = \frac{1}{(s+1)(s+2)} = \frac{A}{s+1} + \frac{B}{s+2}$$

Multiplicando $Y_1(s)$ por $(s+1)(s+2)$:

$$1 = A(s+2) + B(s+1)$$

Substituindo-se $s = -1, -2$ obtemos $A = 1$ e $B = -1$. Assim,

$$Y_1(s) = \frac{1}{s+1} - \frac{1}{s+2}$$

$$y_1(t) = e^{-t} - e^{-2t}.$$

Do exercício anterior

$$H(s) = \frac{1}{2} \frac{1}{s} - \frac{1}{s+1} + \frac{1}{2} \frac{1}{s+2}$$

$$h(t) = \frac{1}{2} - e^{-t} + \frac{1}{2} e^{-2t}$$

$$y(t) = y_1(t) + u_2(t)h(t-2) = e^{-t} - e^{-2t} + u_2(t)h(t-2)$$

$$(g) \quad (s^2 Y(s) - sy(0) - y'(0)) + Y(s) = \frac{e^{-3\pi s}}{s}$$

Substituindo-se os valores $y(0) = 0$ e $y'(0) = 1$ obtemos

$$(s^2 + 1) Y(s) = \frac{e^{-3\pi s}}{s} + 1$$

Assim,

$$\begin{aligned} Y(s) &= \frac{e^{-3\pi s}}{s(s^2+1)} + \frac{1}{s^2+1} \\ &= e^{-3\pi s} H(s) + \frac{1}{s^2+1}, \end{aligned}$$

em que

$$H(s) = \frac{1}{s(s^2+1)}$$

$$y(t) = \sin t + h(t - 3\pi)u_{3\pi}(t).$$

$$H(s) = \frac{1}{s(s^2+1)} = \frac{A}{s} + \frac{Bs+C}{s^2+1}.$$

Multiplicando-se $H(s)$ por $s(s^2 + 1)$ obtemos

$$1 = A(s^2 + 1) + (Bs + C)s$$

De onde obtemos $A = 1$, $B = -1$ e $C = 0$. Assim,

$$H(s) = \frac{1}{s} - \frac{s}{s^2 + 1}$$

De onde obtemos que a função cuja transformada de Laplace é $H(s)$ é

$$h(t) = 1 - \cos t$$

$$y(t) = \sin t + h(t - 3\pi)u_{3\pi}(t) = \sin t + u_{3\pi}(t)[1 - \cos(t - 3\pi)]$$

$$(h) \quad (s^2 Y(s) - sy(0) - y'(0)) + (sY(s) - y(0)) + \frac{5}{4}Y(s) = \frac{1}{s^2+1} + e^{-\pi s} \frac{1}{s^2+1}$$

Substituindo-se os valores $y(0) = 0$ e $y'(0) = 0$ obtemos

$$(s^2 + s + \frac{5}{4}) Y(s) = \frac{1}{s^2+1} + e^{-\pi s} \frac{1}{s^2+1}$$

Assim,

$$Y(s) = \frac{1}{(s^2+1)(s^2+s+\frac{5}{4})} + e^{-\pi s} \frac{1}{(s^2+1)(s^2+s+\frac{5}{4})}$$

$$= H(s) + e^{-\pi s} H(s)$$

em que

$$H(s) = \frac{1}{(s^2 + 1)(s^2 + s + \frac{5}{4})}$$

$$y(t) = h(t) + u_{\pi}(t)h(t - \pi)$$

$$H(s) = \frac{1}{(s^2+1)(s^2+s+\frac{5}{4})} = \frac{As+B}{s^2+1} + \frac{Cs+D}{s^2+s+\frac{5}{4}}$$

Multiplicando-se $H(s)$ por $(s^2 + 1)(s^2 + s + 5/4)$:

$$1 = (As + B)(s^2 + s + 5/4) + (Cs + D)(s^2 + 1)$$

De onde obtemos $A = -16/17$, $B = 4/17$, $C = -A = 16/17$ e $D = 1 - 5B/4 = 12/17$.

Assim,

$$\begin{aligned} H(s) &= \frac{4}{17} \left(\frac{-4s+1}{s^2+1} + \frac{4s+3}{s^2+s+\frac{5}{4}} \right) \\ &= \frac{4}{17} \left(-4 \frac{s}{s^2+1} + \frac{1}{s^2+1} + \frac{4s+3}{(s+1/2)^2+1} \right) \\ &= \frac{4}{17} \left(-4 \frac{s}{s^2+1} + \frac{1}{s^2+1} + 4 \frac{s+3/4}{(s+1/2)^2+1} \right) \\ &= \frac{4}{17} \left(-4 \frac{s}{s^2+1} + \frac{1}{s^2+1} + 4 \frac{s+1/2}{(s+1/2)^2+1} + \frac{1}{(s+1/2)^2+1} \right) \\ h(t) &= \\ \frac{4}{17} &\left(-4 \cos t + \sin t + 4e^{-t/2} \cos t + e^{-t/2} \sin t \right) \end{aligned}$$

$$y(t) = h(t) + u_{\pi}(t)h(t - \pi)$$

$$(i) \quad (s^2 Y(s) - sy(0) - y'(0)) + 4Y(s) = 2 \frac{e^{-\pi s}}{s} - 2 \frac{e^{-3\pi s}}{s}$$

Substituindo-se os valores $y(0) = 0$ e $y'(0) = 0$ obtemos

$$(s^2 + 4) Y(s) = 2 \frac{e^{-\pi s} - e^{-3\pi s}}{s}$$

Assim,

$$\begin{aligned} Y(s) &= 2 \frac{e^{-\pi s} - e^{-3\pi s}}{s(s^2+4)} \\ &= (e^{-\pi s} - e^{-3\pi s}) H(s), \end{aligned}$$

em que

$$H(s) = \frac{2}{s(s^2+4)}$$

$$y(t) = u_{\pi}(t)h(t - \pi) - u_{3\pi}(t)h(t - 3\pi).$$

$$H(s) = \frac{2}{s(s^2+4)} = \frac{A}{s} + \frac{Bs+C}{s^2+4}.$$

Multiplicando-se $H(s)$ por $s(s^2 + 4)$ obtemos

$$2 = A(s^2 + 4) + (Bs + C)s$$

De onde obtemos $A = 1/2$, $B = -1/2$ e $C = 0$. Assim,

$$H(s) = \frac{1}{2} \frac{1}{s} - \frac{1}{2} \frac{s}{s^2+4}$$

De onde obtemos que a função cuja transformada de Laplace é $H(s)$ é

$$h(t) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos 2t$$

$$y(t) = u_{\pi}(t)h(t - \pi) - u_{3\pi}h(t - 3\pi)$$

(j)

$$f(t) = e^t - u_2(t)e^t = e^t - u_2(t)e^{(t-2)+2} = e^t - e^2 u_2(t)e^{t-2}$$

$$F(s) = \frac{1}{s-1} - e^2 \frac{e^{-2s}}{s-1}$$

$$\left(s^2 Y(s) - sy(0) - y'(0) \right) + 4Y(s) = \frac{1}{s-1} - e^2 \frac{e^{-2s}}{s-1}$$

Substituindo-se os valores $y(0) = 0$ e $y'(0) = 0$ obtemos

$$(s^2 + 4) Y(s) = \frac{1}{s-1} - e^2 \frac{e^{-2s}}{s-1}$$

Assim,

$$\begin{aligned} Y(s) &= \frac{1}{(s-1)(s^2+4)} - e^2 \frac{e^{-2s}}{(s-1)(s^2+4)} \\ &= H(s) - e^2 e^{-2s} H(s) \end{aligned}$$

em que

$$H(s) = \frac{1}{(s-1)(s^2+4)}.$$

$$H(s) = \frac{A}{s-1} + \frac{Bs+C}{s^2+4}$$

Multiplicando-se $H(s)$ por $(s-1)(s^2+4)$:

$$1 = A(s^2+4) + (Bs+C)(s-1)$$

Substituindo-se $s = 1$ obtemos $A = 1/5$. Comparando-se os coeficientes dos termos de grau 2 e os termos de grau 0 obtemos o sistema

$$\begin{cases} 1/5 + B = 0 \\ 4/5 - C = 1 \end{cases}$$

Resolvendo-se o sistema obtemos a solução $A = 1/5$, $B = -1/5$ e $C = -1/5$. Assim,

$$H(s) = \frac{1}{5} \frac{1}{s-1} - \frac{1}{5} \frac{s+1}{s^2+4} = \frac{1}{5} \frac{1}{s-1} - \frac{1}{5} \frac{s}{s^2+4} - \frac{1}{5} \frac{1}{s^2+4}$$

$$h(t) = \frac{1}{5} e^t - \frac{1}{5} \cos 2t - \frac{1}{10} \sin 2t.$$

Assim, a solução do problema de valor inicial é

$$y(t) = h(t) - e^2 u_2(t) h(t-2)$$

(k)

$$f(t) = e^{2t}(1 - u_1(t)) = e^{2t} - e^2 e^{2(t-1)} u_1(t)$$

$$F(s) = \frac{1}{s-2} - e^2 \frac{e^{-s}}{s-2}$$

$$\begin{aligned} & \left(s^2 Y(s) - s y(0) - y'(0) \right) \\ & - 2(sY(s) - y(0)) + Y(s) = \frac{1}{s-2} - e^2 \frac{e^{-s}}{s-2} \end{aligned}$$

Substituindo-se os valores $y(0) = 0$ e $y'(0) = 0$ obtemos

$$(s^2 - 2s + 1) Y(s) = \frac{1}{s-2} - e^2 \frac{e^{-s}}{s-2}$$

Assim,

$$\begin{aligned} Y(s) &= \frac{1}{(s-1)^2(s-2)} - e^2 \frac{e^{-s}}{(s-1)^2(s-2)} \\ &= H(s) - e^2 e^{-s} H(s) \end{aligned}$$

em que

$$H(s) = \frac{1}{(s-1)^2(s-2)}.$$

$$\frac{1}{(s-2)(s-1)^2} = \frac{A}{s-2} + \frac{B}{s-1} + \frac{C}{(s-1)^2}$$

Multiplicando-se por $(s-2)(s-1)^2$ obtemos

$$1 = A(s-1)^2 + B(s-1)(s-2) + C(s-2)$$

Substituindo-se $s = 1$ e $s = 2$ obtemos $C = -1$ e $A = 1$. Comparando-se os termos de grau 2 obtemos $0 = A + B = 1 + B$, de onde obtemos $B = -1$.

Assim,

$$H(s) = \frac{1}{s-2} - \frac{1}{s-1} - \frac{1}{(s-1)^2}$$

$$h(t) = e^{2t} - e^t - te^t$$

Assim, a solução do problema de valor inicial é

$$y(t) = h(t) - e^2 u_1(t) h(t-1)$$

(l)

$$f(t) = e^t(1 - u_1(t)) = e^t - ee^{t-1}u_1(t)$$

$$F(s) = \frac{1}{s-1} - e \frac{e^{-s}}{s-1}$$

$$\begin{aligned} & \left(s^2 Y(s) - sy(0) - y'(0) \right) \\ & + 2(sY(s) - y(0)) + 2Y(s) = \frac{1}{s-1} - e \frac{e^{-s}}{s-1} \end{aligned}$$

Substituindo-se os valores $y(0) = 0$ e $y'(0) = 0$ obtemos

$$(s^2 + 2s + 2) Y(s) = \frac{1}{s-1} - e \frac{e^{-s}}{s-1}$$

Assim,

$$\begin{aligned} Y(s) &= \frac{1}{(s-1)(s^2 + 2s + 2)} \\ &\quad - e \frac{e^{-s}}{(s^2 + 2s + 2)(s-1)} \\ &= H(s) - ee^{-s}H(s) \end{aligned}$$

em que

$$\begin{aligned} H(s) &= \frac{1}{(s-1)(s^2 + 2s + 2)}, \\ &= \frac{A}{s-1} + \frac{Bs + C}{s^2 + 2s + 2} \end{aligned}$$

Multiplicando-se $H(s)$ por $(s-1)(s^2+2s+2)$ obtemos

$$1 = A(s^2 + 2s + 2) + (Bs + C)(s - 1)$$

Substituindo-se $s = 1$ obtemos $A = 1/5$. Comparando-se os coeficientes dos termos de grau 2 e os de grau 0 obtemos

$$\begin{cases} 1/5 + B = 0 \\ 2/5 - C = 1 \end{cases}$$

que tem solução $B = -1/5$ e $C = -3/5$. Assim,

$$\begin{aligned} H(s) &= \frac{1}{5} \frac{1}{s-1} - \frac{1}{5} \frac{s+3}{s^2+2s+2} \\ &= \frac{1}{5} \frac{1}{s-1} - \frac{1}{5} \frac{s+3}{(s+1)^2+1} \\ &= \frac{1}{5} \frac{1}{s-1} - \frac{1}{5} \frac{s+1}{(s+1)^2+1} - \frac{2}{5} \frac{1}{(s+1)^2+1} \end{aligned}$$

Pelo item anterior temos que

$$h(t) = \frac{1}{5}e^t - \frac{1}{5}e^{-t} \cos t - \frac{2}{5}e^{-t} \sin t.$$

Assim, a solução do problema de valor inicial é

$$y(t) = h(t) - eu_1(t)h(t-1)$$

$$(m) \quad f(t) = e^{-2t} \sin 3t - u_{\pi}(t)e^{-2t} \sin 3t = e^{-2t} \sin 2t + u_{\pi}(t)e^{-2\pi}e^{-2(t-\pi)} \sin 3(t-\pi). \\ (s^2 Y(s) - sy(0) - y'(0)) + 4(sY(s) - y(0)) + 13Y(s) = (1 + e^{-2\pi}e^{-\pi s}) \frac{3}{(s+2)^2+9}$$

Substituindo-se os valores $y(0) = 1$ e $y'(0) = 2$ obtemos

$$(s^2 + 4s + 13) Y(s) = (1 + e^{-2\pi}e^{-\pi s}) \frac{3}{(s+2)^2+9} + s + 6$$

Assim,

$$\begin{aligned} Y(s) &= (1 + e^{-2\pi} e^{-\pi s}) \frac{3}{(s^2 + 4s + 13)^2} + \frac{s + 6}{s^2 + 4s + 13} \\ &= (1 + e^{-2\pi} e^{-\pi s}) H(s) + G(s). \end{aligned}$$

$$\text{em que } H(s) = \frac{3}{(s^2 + 4s + 13)^2} = \frac{1}{23^2} \frac{233^2}{[(s+2)^2 + 9]^2}$$

$$G(s) = \frac{s+6}{s^2+4s+13} = \frac{s+2+4}{(s+2)^2+9} = \frac{s+2}{(s+2)^2+9} + \frac{4}{3} \frac{3}{(s+2)^2+9}$$

Logo

$$h(t) = \frac{1}{18} e^{-2t} (\sin 3t - 3t \cos 3t)$$

$$g(t) = e^{-2t} \cos 3t + \frac{4}{3} e^{-2t} \sin 3t$$

De onde obtemos que a solução do PVI é

$$y(t) = h(t) + e^{-2\pi} u_{\pi}(t) h(t - \pi) + g(t) =$$

$$\frac{1}{18} e^{-2t} (\sin 3t - 3t \cos 3t)$$

$$+ \frac{e^{-2t}}{18} u_{\pi}(t) (-\sin 3t + 3(t - \pi) \cos 3t)$$

$$+ e^{-2t} \cos 3t + \frac{4}{3} e^{-2t} \sin 3t.$$

3.5. A função $f(t)$ pode ser escrita em termos da função de Heaviside como

$$\begin{aligned} f(t) &= u_1(t)(t-1)^2 - u_2(t)(t-1)^2 \\ &\quad + (-t^2 + 6t - 7)u_2(t) - (-t^2 + 6t - 7)u_4(t) + (9 - 2t)u_4(t) \\ &= u_1(t)(t-1)^2 + u_2(t)(-2t^2 + 8t - 8) + u_4(t)(t^2 - 8t + 16) \\ &= u_1(t)(t-1)^2 - 2u_2(t)(t-2)^2 + u_4(t)(t-4)^2. \end{aligned}$$

Usando o 2º Teorema do Deslocamento temos que

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L}\{f(t)\}(s) &= \\
 &= \mathcal{L}\{u_1(t)(t-1)^2 - 2u_2(t)(t-2)^2 + u_4(t)(t-4)^2\}(s) = \\
 &= \mathcal{L}\{u_1(t)(t-1)^2\}(s) - 2\mathcal{L}\{u_2(t)(t-2)^2\}(s) + \mathcal{L}\{u_4(t)(t-4)^2\}(s) = \\
 &= e^{-s}\mathcal{L}\{t^2\}(s^3) - 2e^{-2s}\mathcal{L}\{t^2\}(s) + e^{-4s}\mathcal{L}\{t^2\}(s) = \\
 &= \frac{e^{-s}}{s^3} - 2\frac{e^{-2s}}{s^3} + \frac{e^{-4s}}{s^3}.
 \end{aligned}$$

Aplicando-se a transformada de Laplace na equação diferencial obtemos

$$\begin{aligned}
 2\left(s^2Y(s) - sy(0) - y'(0)\right) - 4(sY(s) - y(0)) + 6Y(s) \\
 = \frac{e^{-s}}{s^3} - 2\frac{e^{-2s}}{s^3} + \frac{e^{-4s}}{s^3}
 \end{aligned}$$

Substituindo-se os valores $y(0) = 0$ e $y'(0) = 0$ obtemos

$$(2s^2 - 4s + 6)Y(s) = \frac{e^{-s}}{s^3} - 2\frac{e^{-2s}}{s^3} + \frac{e^{-4s}}{s^3}$$

Assim,

$$\begin{aligned}
 Y(s) &= \frac{e^{-s} - 2e^{-2s} + e^{-4s}}{s^3(3s^2 - 12s + 13)} = (e^{-s} - 2e^{-2s} + e^{-4s})H(s) \\
 H(s) &= \frac{1}{s^3(2s^2 - 4s + 6)} = \frac{A}{s} + \frac{B}{s^2} + \frac{C}{s^3} + \frac{Ds + E}{2s^2 - 4s + 6}
 \end{aligned}$$

Multiplicando-se $H(s)$ por $s^3(2s^2 - 4s + 6)$:

$$1 = As^2(2s^2 - 4s + 6) + Bs(2s^2 - 4s + 6) + C(2s^2 - 4s + 6) + (Ds + E)s^3$$

De onde obtemos $A = 1/54$, $B = 1/9$, $C = 1/6$, $D = -1/27$ e $E = -4/27$. Assim,

$$\begin{aligned} H(s) &= \frac{1}{54} \frac{1}{s} + \frac{1}{9} \frac{1}{s^2} + \frac{1}{6} \frac{1}{s^3} + \frac{-\frac{1}{27}s - \frac{4}{27}}{2s^2 - 4s + 6} \\ &= \frac{1}{54} \frac{1}{s} + \frac{1}{9} \frac{1}{s^2} + \frac{1}{6} \frac{1}{s^3} + \\ &\quad - \frac{1}{54} \frac{s-1}{(s-1)^2 + 2} + \frac{5}{54\sqrt{2}} \frac{\sqrt{2}}{(s-1)^2 + 2} \end{aligned}$$

Logo,

$$\begin{aligned} h(t) &= \frac{1}{54} + \frac{1}{9}t + \frac{1}{12}t^2 - \frac{1}{54}e^t \cos(\sqrt{2}t) \\ &\quad + \frac{5}{54\sqrt{2}}e^t \sin(\sqrt{2}t) \end{aligned}$$

Como encontramos acima que

$$Y(s) = (e^{-s} - 2e^{-2s} + e^{-4s})H(s),$$

então, usando o 2º Teorema do Deslocamento, a solução do PVI é

$$y(t) = u_1(t)h(t-1) - 2u_2(t)h(t-2) + u_4(t)h(t-4).$$

4. Transformada de Laplace do Delta de Dirac (página 551)

4.1. (a) $(s^2 Y(s) - sy(0) - y'(0)) + Y(s) = e^{-2\pi s} \cos(2\pi)$

Substituindo-se os valores $y(0) = 0$ e $y'(0) = 1$ obtemos

$$(s^2 + 1)Y(s) = e^{-2\pi s} + 1$$

Assim,

$$Y(s) = \frac{e^{-2\pi s}}{s^2+1} + \frac{1}{s^2+1}$$

e a solução do problema de valor inicial é dado por

$$y(t) = u_{2\pi}(t) \sin(t - 2\pi) + \sin t = (u_{2\pi}(t) + 1) \sin t.$$

(b) $(s^2 Y(s) - sy(0) - y'(0)) + 2(sY(s) - y(0)) + 2Y(s) = ee^{-s}$

Substituindo-se os valores $y(0) = 0$ e $y'(0) = 0$ obtemos

$$Y(s) (s^2 + 2s + 2) = ee^{-s}$$

Assim,

$$Y(s) = \frac{ee^{-s}}{s^2 + 2s + 2} = \frac{ee^{-s}}{(s+1)^2 + 1} = ee^{-s} G(s),$$

$$G(s) = \frac{1}{(s+1)^2 + 1} \Rightarrow g(t) = e^{-t} \sin t$$

Assim, a solução do problema de valor inicial é

$$y(t) = eu_1(t)e^{-t+1} \sin(t-1) = e^{-t+2} \sin(t-1)u_1(t)$$

(c) $(s^2 Y(s) - sy(0) - y'(0)) + 4Y(s) = e^2 e^{-2s}$ Substituindo-se os valores $y(0) = 0$ e $y'(0) = 0$ obtemos

$$(s^2 + 4) Y(s) = e^2 e^{-2s}$$

Assim,

$$Y(s) = \frac{e^2 e^{-2s}}{s^2 + 4} = e^2 e^{-2s} G(s)$$

$$G(s) = \frac{1}{s^2 + 4} \Rightarrow g(t) = \frac{1}{2} \sin 2t$$

Assim, a solução do problema de valor inicial é

$$y(t) = \frac{e^2}{2} u_2(t) \sin(2(t-2))$$

- (d) $(s^2Y(s) - sy(0) - y'(0)) - 2(sY(s) - y(0)) + Y(s) = e^2e^{-s}$. Substituindo-se os valores $y(0) = 0$ e $y'(0) = 0$ obtemos

$$(s^2 - 2s + 1)Y(s) = e^2e^{-s}$$

Assim,

$$Y(s) = \frac{e^2e^{-s}}{(s-1)^2} = e^2e^{-s}G(s)$$

$$G(s) = \frac{1}{(s-1)^2} \Rightarrow g(t) = te^t$$

Assim, a solução do problema de valor inicial é

$$y(t) = e^2u_1(t)(t-1)e^{t-1} = (t-1)e^{t+1}u_1(t)$$

- (e) $f(t) = \delta(t-1) + u_3(t)t^2 = \delta(t-1) + u_3(t)((t-3)+3)^2 = \delta(t-1) + u_3(t)((t-3)^2 + 6(t-3) + 9)$

$$F(s) = e^{-s} + e^{-3s}\left(\frac{2}{s^3} + \frac{6}{s^2} + \frac{9}{s}\right)$$

$$s^2Y(s) - sy(0) - y'(0) + 2(sY(s) - y(0)) + 2Y(s) = e^{-s} + e^{-3s}\left(\frac{2}{s^3} + \frac{6}{s^2} + \frac{9}{s}\right)$$

Substituindo-se os valores $y(0) = 0$ e $y'(0) = 1$ obtemos

$$\begin{aligned}(s^2 + 2s + 2)Y(s) &= e^{-s} + e^{-3s}\left(\frac{2}{s^3} + \frac{6}{s^2} + \frac{9}{s}\right) + 1 \\ &= 1 + e^{-s} + e^{-3s}\frac{2 + 6s + 9s^2}{s^3}\end{aligned}$$

Assim,

$$\begin{aligned}Y(s) &= (1 + e^{-s})\frac{1}{s^2 + 2s + 2} + e^{-3s}\frac{2 + 6s + 9s^2}{s^3(s^2 + 2s + 2)} \\ &= (1 + e^{-s})\frac{1}{(s+1)^2 + 1} + e^{-3s}H(s)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 H(s) &= \frac{2 + 6s + 9s^2}{s^3(s^2 + 2s + 2)} \\
 &= \frac{A}{s} + \frac{B}{s^2} + \frac{C}{s^3} + \frac{Ds + E}{s^2 + 2s + 2} \\
 2 + 6s + 9s^2 &= As^2(s^2 + 2s + 2) + Bs(s^2 + 2s + 2) + \\
 &\quad + C(s^2 + 2s + 2) + (Ds + E)s^3 \\
 &= (As^2 + Bs + C)(s^2 + 2s + 2) \\
 &\quad + (Ds + E)s^3
 \end{aligned} \tag{3.16}$$

Substituindo-se $s = 0$ obtemos $C = 1$.

Comparando-se os coeficientes dos termos de grau 1 obtemos $6 = 2C + 2B = 2 + 2B$, de onde obtemos $B = 2$.

Comparando-se os coeficientes dos termos de grau 2 obtemos $9 = C + 2B + 2A = 5 + 2A$, de onde obtemos $A = 2$.

Comparando-se os coeficientes dos termos de grau 3 obtemos $0 = E + B + 2A = E + 6$, de onde obtemos $E = -6$.

Comparando-se os coeficientes dos termos de grau 4 obtemos $0 = D + A = D + 2$, de onde obtemos $D = -2$.

Assim,

$$\begin{aligned}
 H(s) &= \frac{2}{s} + \frac{2}{s^2} + \frac{1}{s^3} + \frac{-2s - 6}{s^2 + 2s + 2} \\
 &= \frac{2}{s} + \frac{2}{s^2} + \frac{1}{s^3} + \frac{-2s - 6}{(s+1)^2 + 1} \\
 &= \frac{2}{s} + \frac{2}{s^2} + \frac{1}{2s^3} \\
 &\quad - 2 \left(\frac{s+1}{(s+1)^2 + 1} + \frac{2}{(s+1)^2 + 1} \right)
 \end{aligned}$$

$$h(t) = 2 + 2t + \frac{1}{2}t^2 - 2(e^{-t} \cos t + 2e^{-t} \sin t)$$

Como

$$Y(s) = (1 + e^{-s}) \frac{1}{(s+1)^2 + 1} + e^{-3s} H(s)$$

então

$$y(t) = e^{-t} \sin t + u_1(t) e^{-(t-1)} \sin(t-1) + u_3(t) h(t-3)$$

4.2. (a) Aplicando-se a transformada de Laplace na equação obtemos
 $(s^2 Y(s) - sy(0) - y'(0)) + 4(sY(s) - y(0)) + 20Y(s) = e^{-\frac{\pi}{2}} e^{-\frac{\pi}{4}s}$
 Substituindo-se $y(0) = 0$ e $y'(0) = 1$ obtemos

$$(s^2 + 4s + 20)Y(s) = e^{-\frac{\pi}{2}} e^{-\frac{\pi}{4}s} + 1$$

$$Y(s) = e^{-\frac{\pi}{2}} \frac{e^{-\frac{\pi}{4}s}}{s^2 + 4s + 20} + \frac{1}{s^2 + 4s + 20} = e^{-\frac{\pi}{2}} e^{-\frac{\pi}{4}s} H(s) + H(s)$$

em que

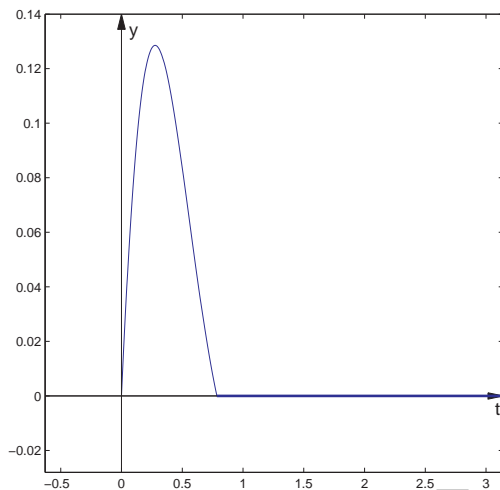
$$H(s) = \frac{1}{s^2 + 4s + 20} = \frac{1}{(s+2)^2 + 16}$$

Assim,

$$h(t) = \frac{1}{4} e^{-2t} \sin 4t$$

$$y(t) = e^{-\frac{\pi}{2}} u_{\frac{\pi}{4}}(t) h(t - \frac{\pi}{4}) + h(t)$$

$$(b) \quad y(t) = e^{-\frac{\pi}{2}} u_{\frac{\pi}{4}}(t) \frac{1}{4} e^{-2(t-\frac{\pi}{4})} \sin(4t - \pi) + \frac{1}{4} e^{-2t} \sin 4t = (-u_{\frac{\pi}{4}}(t) + 1) \frac{1}{4} e^{-2t} \sin 4t = \begin{cases} \frac{1}{4} e^{-2t} \sin 4t, & 0 \leq t < \frac{\pi}{4} \\ 0, & t \geq \frac{\pi}{4} \end{cases}$$



4.3. Aplicando-se a transformada de Laplace na equação obtemos

$$(s^2 Y(s) - sy(0) - y'(0)) + (sY(s) - y(0)) = \frac{e^{-s}}{s} + e^{-2s}$$

Substituindo-se $y(0) = 0$ e $y'(0) = 1$ obtemos

$$(s^2 + s)Y(s) = 1 + \frac{e^{-s}}{s} + e^{-2s}$$

$$Y(s) = \frac{1}{s(s+1)} + \frac{e^{-s}}{s^2(s+1)} + \frac{e^{-2s}}{s(s+1)} = (1 + e^{-2s})H_2(s) + e^{-s}H_1(s)$$

em que

$$H_2(s) = \frac{1}{s(s+1)} \text{ e } H_1(s) = \frac{1}{s^2(s+1)}$$

$$H_2(s) = \frac{1}{s(s+1)} = \frac{A}{s} + \frac{B}{s+1}$$

Multiplicando-se por $s(s+1)$ obtemos

$$1 = A(s+1) + Bs$$

Substituindo-se $s = 0, -1$ obtemos $A = 1$ e $B = -1$.

$$H_1(s) = \frac{1}{s^2(s+1)} = \frac{A}{s} + \frac{B}{s^2} + \frac{C}{s+1}$$

Multiplicando-se por $s^2(s+1)$ obtemos

$$1 = As(s+1) + B(s+1) + Cs^2$$

Substituindo-se $s = 0, -1$ obtemos $C = 1$ e $B = 1$. Comparando-se os coeficientes dos termos de grau 2 obtemos $A = -1$.

Assim,

$$h_2(t) = 1 - e^{-t}$$

$$h_1(t) = -1 + t + e^{-t}$$

$$y(t) = h_2(t) + u_1(t)h_1(t-1) + u_2(t)h_2(t-2)$$

4.4. (a) Aplicando-se a Transformada de Laplace na equação diferencial, obtemos que:

$$6s^2Y(s) + \frac{1}{6}Y(s) = e^{-12\pi s} + e^{-18\pi s}.$$

Então

$$Y(s) = \frac{\frac{1}{6}}{s^2 + \frac{1}{36}}e^{-12\pi s} + \frac{\frac{1}{6}}{s^2 + \frac{1}{36}}e^{-18\pi s}.$$

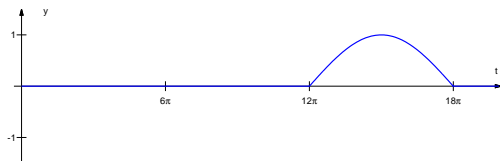
Denotando por u a função degrau (ou função de Heaviside) e tomando a transformada inversa obtemos a solução:

$$y(t) = u_{12\pi}(t) \operatorname{sen}(t/6 - 2\pi) + u_{18\pi} \operatorname{sen}(t/6 - 3\pi)$$

que pode ser escrita de maneira mais simples como:

$$y(t) = \operatorname{sen}(t/6) [u_{12\pi}(t) - u_{18\pi}(t)]$$

(b) Como o termo $u_{12\pi}(t) - u_{18\pi}(t)$ é nulo para todos t nos intervalos $0 \leq t < 12\pi$ e $t > 18\pi$ temos que a solução é também nula nesses intervalos. Já para t no intervalo $12\pi \leq t \leq 18\pi$ a solução é igual a $\operatorname{sen}(t/6)$. Isso significa que ela é nula em $t = 12\pi$ e depois oscila como uma senóide de período igual a 12π durante meio período voltando a ser nula em $t = 18\pi$. Em particular ela assume o valor máximo para $t = 15\pi$.



5. Convolução (página 565)

5.1. (a)

$$F(s) = \frac{1}{s(s+3)} = \frac{A}{s} + \frac{B}{s+3}$$

Multiplicando $F(s)$ por $s(s+3)$ obtemos

$$1 = A(s+3) + Bs$$

Substituindo-se $s = 0, -3$ obtemos $A = 1/3$ e $B = -1/3$. Assim,

$$F(s) = \frac{1}{3} \frac{1}{s} - \frac{1}{3} \frac{1}{s+3}$$

$$f(t) = \frac{1}{3} - \frac{1}{3} e^{-3t}$$

(b) $f(t) = \int_0^t e^{-3\tau} d\tau = -\frac{1}{3} e^{-3\tau} \Big|_0^t = -\frac{1}{3} e^{-3t} + \frac{1}{3}$

5.2. (a) $H(s) = \frac{1}{s(s^2-4s+5)} = \frac{A}{s} + \frac{Bs+C}{s^2-4s+5}$

Multiplicando-se $H(s)$ por $s(s^2-4s+5)$:

$$1 = A(s^2-4s+5) + (Bs+C)s$$

Substituindo-se $s = 0$ obtemos $A = 1/5$. Comparando-se os coeficientes dos termos de grau 2 e de grau 1 obtemos o sistema

$$\begin{cases} A + B = 0 \\ -4A + C = 0 \end{cases}$$

Resolvendo-se o sistema obtemos a solução $B = -1/5$ e $C = 4/5$. Assim,

$$\begin{aligned} H(s) &= \frac{1}{5} \frac{1}{s} - \frac{1}{5} \frac{s-4}{s^2-4s+5} \\ &= \frac{1}{5} \frac{1}{s} - \frac{1}{5} \frac{s-4}{(s-2)^2+1} \\ &= \frac{1}{5} \frac{1}{s} - \frac{1}{5} \frac{s-2}{(s-2)^2+1} - \frac{1}{5} \frac{-2}{(s-2)^2+1} \\ h(t) &= \frac{1}{5} - \frac{1}{5} e^{2t} \cos t + \frac{2}{5} e^{2t} \sin t \end{aligned}$$

(b)

$$h(t) = \int_0^t \sin \tau e^{2\tau} d\tau$$

$$\begin{aligned} \int \sin \tau e^{2\tau} d\tau &= e^{2\tau} (-\cos \tau) - 2 \int e^{2\tau} (-\cos \tau) d\tau \\ &= -e^{2\tau} \cos \tau + \\ &\quad + 2 \left(e^{2\tau} \sin \tau - 2 \int e^{2\tau} \sin \tau d\tau \right) \end{aligned}$$

$$\int \sin \tau e^{2\tau} d\tau = \frac{1}{5} \left(-e^{2\tau} \cos \tau + 2e^{2\tau} \sin \tau \right)$$

$$\begin{aligned} h(t) &= \frac{1}{5} \left(-e^{2\tau} \cos \tau + 2e^{2\tau} \sin \tau \right) \Big|_0^t \\ &= -\frac{1}{5} e^{2t} \cos t + \frac{1}{5} + \frac{2}{5} e^{2t} \sin t \end{aligned}$$

- 5.3. $(s^2Y(s) - sy(0) - y'(0)) + 4(sY(s) - y(0)) + 4Y(s) = F(s)$, em que $F(s)$ é a transformada de Laplace de $f(t)$. Substituindo-se os valores $y(0) = 2$ e $y'(0) = -3$ obtemos

$$(s^2 + 4s + 4)Y(s) = F(s) + 5 + 2s$$

Assim,

$$\begin{aligned} Y(s) &= \frac{F(s)}{s^2 + 4s + 4} + \frac{5 + 2s}{s^2 + 4s + 4} \\ &= \frac{F(s)}{(s + 2)^2} + \frac{5 + 2s}{(s + 2)^2} \\ \frac{5 + 2s}{(s + 2)^2} &= \frac{A}{s + 2} + \frac{B}{(s + 2)^2} \end{aligned}$$

Multiplicando-se por $(s + 2)^2$ obtemos

$$5 + 2s = A(s + 2) + B$$

Substituindo-se $s = -2$ obtemos $1 = B$. Comparando-se os coeficientes dos termos de grau zero obtemos $5 = 2A + B = 2A + 1$, de onde obtemos $2 = A$. Assim,

$$Y(s) = \frac{F(s)}{(s + 2)^2} + \frac{2}{s + 2} + \frac{1}{(s + 2)^2}$$

$$\begin{aligned} y(t) &= (e^{-2t}t * f)(t) + 2e^{-2t} + e^{-2t}t \\ &= \int_0^t e^{-2(t-\tau)}(t-\tau)f(\tau)d\tau + 2e^{-2t} + e^{-2t}t \end{aligned}$$

5.4. Aplicando-se a transformada de Laplace na equação obtemos

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s^2} + \frac{2}{s^2 + 4} Y(s) = Y(s)$$

$$Y(s) \left(1 - \frac{2}{s^2 + 4} \right) = \frac{s+1}{s^2}$$

$$\begin{aligned} Y(s) &= \frac{(s+1)(s^2+4)}{s^2(s^2+2)} \\ &= \frac{A}{s} + \frac{B}{s^2} + \frac{Cs+D}{s^2+2} \end{aligned}$$

Multiplicando-se por $s^2(s^2+2)$ obtemos

$$(s+1)(s^2+4) = As(s^2+2) + B(s^2+2) + (Cs+D)s^2$$

Substituindo-se $s = 0$ obtemos $B = 2$. Comparando-se os coeficientes dos termos de grau 1 obtemos

$$4 = 2A.$$

Logo, $A = 2$. Comparando-se os coeficientes dos termos de grau 2 e de grau 3 obtemos

$$1 = B + D = 2 + D,$$

$$1 = A + C = 2 + C.$$

Logo, $C = -1$ e $D = -1$. Assim,

$$y(t) = 2 + 2t - [\cos(\sqrt{2}t) + \frac{1}{\sqrt{2}} \operatorname{sen}(\sqrt{2}t)]$$

$$\begin{aligned} 5.5. \quad (f * g)(t) &= \int_0^t f(t-\tau)g(\tau)d\tau \\ &= \begin{cases} \int_0^t (t-\tau)d\tau, & \text{se } 0 < t < 1, \\ \int_0^{t-1} (\tau-t+2)d\tau + \int_{t-1}^1 (t-\tau)d\tau, & \text{se } 1 \leq t < 2, \\ \int_{t-2}^1 (\tau+2-t)d\tau, & \text{se } 2 \leq t < 3, \\ 0, & \text{se } t \geq 3. \end{cases} \\ &= \begin{cases} \frac{t^2}{2}, & \text{se } 0 < t < 1, \\ 1 - \frac{(t-2)^2}{2} - \frac{(t-1)^2}{2}, & \text{se } 1 \leq t < 2, \\ \frac{(t-3)^2}{2}, & \text{se } 2 \leq t < 3, \\ 0, & \text{se } t \geq 3. \end{cases} \end{aligned}$$

4

SISTEMAS DE EQUAÇÕES DIFERENCIAIS LINEARES

Exemplo 4.1. Considere o sistema de equações diferenciais lineares

$$\begin{cases} x_1'(t) = \lambda_1 x_1(t) \\ x_2'(t) = \lambda_2 x_2(t) \end{cases}$$

em que $\lambda_1, \lambda_2 \in \mathbb{R}$. Temos aqui um sistema de equações que envolvem derivadas das funções que são incógnitas. Neste caso as duas equações são desacopladas, isto é, podem ser resolvidas independentemente. A solução do sistema é

$$x_1(t) = c_1 e^{\lambda_1 t} \quad \text{e} \quad x_2(t) = c_2 e^{\lambda_2 t}.$$

ou escrito na forma matricial

$$\begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1 e^{\lambda_1 t} \\ c_2 e^{\lambda_2 t} \end{bmatrix}.$$

Exemplo 4.2. Considere, agora, o sistema

$$\begin{cases} x_1'(t) &= \lambda x_1(t) + x_2(t) \\ x_2'(t) &= \lambda x_2(t) \end{cases}$$

Este sistema não é desacoplado, mas podemos resolver a segunda equação independentemente da primeira. A segunda equação tem solução

$$x_2(t) = c_2 e^{\lambda t}.$$

Substituindo $x_2(t)$ na primeira equação obtemos a equação

$$x_1'(t) = \lambda x_1(t) + c_2 e^{\lambda t}$$

que tem solução

$$x_1(t) = c_1 e^{\lambda t} + c_2 t e^{\lambda t}.$$

Assim, a solução do sistema acima é

$$\begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1 e^{\lambda t} + c_2 t e^{\lambda t} \\ c_2 e^{\lambda t} \end{bmatrix}.$$

Os sistemas anteriores foram resolvidos porque pelo menos uma das equações pode ser resolvida independentemente das outras.

Considere o sistema de equações diferenciais lineares

$$\begin{cases} x_1'(t) &= a_{11}(t)x_1(t) + \cdots + a_{1n}(t)x_n(t) + f_1(t) \\ \vdots & \vdots \\ x_n'(t) &= a_{n1}(t)x_1(t) + \cdots + a_{nn}(t)x_n(t) + f_n(t) \end{cases}$$

que pode ser escrito na forma de uma equação diferencial matricial

$$\begin{bmatrix} x'_1(t) \\ \vdots \\ x'_n(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11}(t) & \cdots & a_{1n}(t) \\ \vdots & & \vdots \\ a_{n1}(t) & \cdots & a_{nn}(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ \vdots \\ x_n(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f_1(t) \\ \vdots \\ f_n(t) \end{bmatrix}$$

ou

$$X'(t) = A(t)X(t) + F(t), \quad (4.1)$$

em que

$$A(t) = \begin{bmatrix} a_{11}(t) & \cdots & a_{1n}(t) \\ \vdots & & \vdots \\ a_{n1}(t) & \cdots & a_{nn}(t) \end{bmatrix}, \quad X(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ \vdots \\ x_n(t) \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad F(t) = \begin{bmatrix} f_1(t) \\ \vdots \\ f_n(t) \end{bmatrix}.$$

Observe que o sistema do [Exemplo 4.1](#) pode ser escrito na forma matricial como

$$\begin{bmatrix} y'_1(t) \\ y'_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \end{bmatrix}$$

e o do [Exemplo 4.2](#), como

$$\begin{bmatrix} y'_1(t) \\ y'_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda & 1 \\ 0 & \lambda \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \end{bmatrix}$$

Para sistemas lineares é válido o seguinte teorema sobre existência e unicidade de soluções que será demonstrado somente ao final deste capítulo.

Teorema 4.1 (Existência e Unicidade). *Considere o problema de valor inicial*

$$\begin{cases} X'(t) &= A(t)X(t) + F(t) \\ X(t_0) &= X^{(0)} \end{cases} \quad (4.2)$$

Suponha que $a_{ij}(t)$, $f_i(t)$ sejam funções contínuas num intervalo I contendo t_0 . Então, o problema (4.2) tem uma única solução no intervalo I .

Para os **sistemas de equações lineares homogêneos**, isto é, sistemas da forma (4.1) com $F(t) = \vec{0}$,

$$X'(t) = A(t)X(t), \quad (4.3)$$

é válido o **princípio da superposição** que diz que se $X_1(t)$ e $X_2(t)$ são soluções de (4.3), então

$$X(t) = \alpha X_1(t) + \beta X_2(t) \quad (4.4)$$

também o é, para todas as constantes α e β . Uma expressão da forma (4.4) é chamada **combinação linear** de $X_1(t)$ e $X_2(t)$.

Vamos verificar que realmente $X(t)$ dado por (4.4) é solução de (4.3).

$$\begin{aligned} X'(t) &= \alpha X_1'(t) + \beta X_2'(t) = \alpha A(t)X_1(t) + \beta A(t)X_2(t) \\ &= A(t)(\alpha X_1(t) + \beta X_2(t)) = A(t)X(t), \end{aligned}$$

pois como $X_1(t)$ e $X_2(t)$ são soluções de (4.3), então $X_1'(t) = A(t)X_1(t)$ e $X_2'(t) = A(t)X_2(t)$. Provamos o seguinte teorema.

Teorema 4.2 (Princípio da Superposição). *Se $X_1(t)$ e $X_2(t)$ são soluções do sistema homogêneo*

$$X'(t) = A(t)X(t)$$

então, $X(t) = \alpha X_1(t) + \beta X_2(t)$, para α e β números, também o é.

Vamos considerar o problema de valor inicial

$$\begin{cases} X'(t) &= AX(t) \\ X(0) &= X^{(0)} \end{cases} \quad (4.5)$$

Vamos determinar condições sobre n soluções $X_1(t), \dots, X_n(t)$ para que existam constantes c_1, \dots, c_n tais que $X(t) = c_1 X_1(t) + \dots + c_n X_n(t)$ seja solução do problema de valor inicial (4.5).

Substituindo-se $t = 0$ na solução

$$X(t) = c_1 X_1(t) + \dots + c_n X_n(t)$$

obtemos o sistema de equações lineares algébricas

$$c_1 X_1(0) + \dots + c_n X_n(0) = X^{(0)}$$

que pode ser escrito na forma

$$MC = X^{(0)}$$

em que

$$M = \begin{bmatrix} X_1(0) & \cdots & X_n(0) \end{bmatrix} \text{ e } C = \begin{bmatrix} c_1 \\ \vdots \\ c_n \end{bmatrix}.$$

Se a matriz do sistema M é invertível, então para toda condição inicial $X^{(0)} \in \mathbb{R}^n$ o sistema $MC = X^{(0)}$ tem uma única solução (c_1, \dots, c_n) (A solução é $C = M^{-1}X^{(0)}$). Mas uma matriz quadrada é invertível se, e somente se, o seu determinante é diferente de zero

Portanto, se

$$\det \begin{bmatrix} X_1(0) & \cdots & X_n(0) \end{bmatrix} \neq 0,$$

então para toda condição inicial $X^{(0)}$ existem constantes c_1, \dots, c_n tais que

$$X(t) = c_1 X_1(t) + \cdots + c_n X_n(t)$$

é solução do problema de valor inicial (4.5).

Teorema 4.3. *Sejam $X_1(t), \dots, X_n(t)$ soluções do sistema $X' = AX$ tais que*

$$\det [X_1(0) \ \dots \ X_n(0)] \neq 0$$

Então, para toda condição inicial $X^{(0)} \in \mathbb{R}^n$ o problema de valor inicial

$$\begin{cases} X'(t) &= AX(t) \\ X(0) &= X^{(0)} \end{cases}$$

tem uma única solução e é da forma

$$X(t) = c_1 X_1(t) + \dots + c_n X_n(t). \quad (4.6)$$

Definição 4.1. (a) Sejam $X_1 : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^n, \dots, X_n : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^n$ funções vetoriais. O determinante

$$W[X_1, \dots, X_n](t) = \det [X_1(t) \ \dots \ X_n(t)]$$

é chamado **wronskiano** das funções vetoriais $X_1(t), \dots, X_n(t)$ em $t \in \mathbb{R}$.

(b) Se n soluções $X_1(t), \dots, X_n(t)$ do sistema $X' = AX$ são tais que o seu wronskiano é diferente de zero no ponto $t = 0$ dizemos que elas são **soluções fundamentais** do sistema homogêneo

$$X' = AX.$$

(c) Se $X_1(t), \dots, X_n(t)$ são soluções fundamentais do sistema $X' = AX$, então a família de soluções

$$X(t) = c_1 X_1(t) + \dots + c_n X_n(t), \quad (4.7)$$

para constantes c_1, \dots, c_n é chamada **solução geral** de $X' = AX$.

Assim, para encontrar a solução geral de um sistema homogêneo $X' = AX$, precisamos encontrar n soluções fundamentais, ou seja, soluções $X_1(t), \dots, X_n(t)$ tais que no ponto $t = 0$,

$$W[X_1, \dots, X_n](0) = \det \begin{bmatrix} X_1(0) & \dots & X_n(0) \end{bmatrix} \neq 0.$$

Exemplo 4.3. A solução encontrada do sistema do [Exemplo 4.1](#) é a solução geral pois ela pode ser escrita como

$$X(t) = c_1 \begin{bmatrix} e^{\lambda_1 t} \\ 0 \end{bmatrix} + c_2 \begin{bmatrix} 0 \\ e^{\lambda_2 t} \end{bmatrix}$$

e

$$X_1(t) = \begin{bmatrix} e^{\lambda_1 t} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad X_2(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ e^{\lambda_2 t} \end{bmatrix}$$

são tais que $\det[X_1(0) \ X_2(0)] = \det(I_2) = 1 \neq 0$.

Exemplo 4.4. A solução encontrada do sistema do [Exemplo 4.2](#) é a solução geral pois ela pode ser escrita como

$$X(t) = c_1 \begin{bmatrix} e^{\lambda t} \\ 0 \end{bmatrix} + c_2 \begin{bmatrix} te^{\lambda t} \\ e^{\lambda t} \end{bmatrix}$$

e

$$X_1(t) = \begin{bmatrix} e^{\lambda t} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad X_2(t) = \begin{bmatrix} te^{\lambda t} \\ e^{\lambda t} \end{bmatrix}$$

são tais que $\det[X_1(0) \ X_2(0)] = \det(I_2) = 1 \neq 0$.

Os sistemas dos [Exemplos 4.1 e 4.2](#) foram resolvidos porque pelo menos uma das equações pode ser resolvida independentemente das outras. O sistema do [Exemplo 4.1](#) pode ser escrito na forma matricial como

$$\begin{bmatrix} x'_1(t) \\ x'_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix}$$

e o do [Exemplo 4.2](#), como

$$\begin{bmatrix} x'_1(t) \\ x'_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda & 1 \\ 0 & \lambda \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix}.$$

Enquanto a matriz do primeiro sistema é diagonal a do segundo é “quase” diagonal. O estudo que faremos, a seguir, de sistemas de equações diferenciais se baseia em transformar o sistema em um no qual a sua matriz é diagonal ou “quase” diagonal.

4.1 A Matriz A é Diagonalizável em \mathbb{R}

4.1.1 Sistema com 2 Equações e 2 Incógnitas

Vamos supor que existam matrizes $P = \begin{bmatrix} v_1 & w_1 \\ v_2 & w_2 \end{bmatrix}$ e $D = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{bmatrix}$, com $\lambda_1, \lambda_2 \in \mathbb{R}$, tais que

$$A = PDP^{-1}. \quad (4.8)$$

Substituindo-se (4.8) em (4.3) obtemos

$$X'(t) = PDP^{-1}X(t).$$

Multiplicando-se à esquerda por P^{-1} , obtemos

$$P^{-1}X'(t) = DP^{-1}X(t). \quad (4.9)$$

Fazendo a mudança de variável

$$Y(t) = P^{-1}X(t), \quad (4.10)$$

a equação (4.9) pode ser escrita como

$$Y'(t) = DY(t),$$

que pode ser escrita na forma de um sistema de equações desacopladas

$$\begin{cases} y_1'(t) &= \lambda_1 y_1(t) \\ y_2'(t) &= \lambda_2 y_2(t) \end{cases}$$

as equações podem ser resolvidas independentemente. Este sistema foi resolvido no [Exemplo 4.1 na página 610](#) e sua solução é

$$y_1(t) = c_1 e^{\lambda_1 t} \quad \text{e} \quad y_2(t) = c_2 e^{\lambda_2 t}.$$

ou escrito na forma matricial

$$Y(t) = \begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1 e^{\lambda_1 t} \\ c_2 e^{\lambda_2 t} \end{bmatrix}.$$

Assim, da mudança de variáveis (4.10), a solução da equação (4.3) é

$$X(t) = PY(t) = P \begin{bmatrix} c_1 e^{\lambda_1 t} \\ c_2 e^{\lambda_2 t} \end{bmatrix}.$$

Como $P = \begin{bmatrix} v_1 & w_1 \\ v_2 & w_2 \end{bmatrix}$, então a solução do sistema pode ser escrita como

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} v_1 & w_1 \\ v_2 & w_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_1 e^{\lambda_1 t} \\ c_2 e^{\lambda_2 t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_1 c_1 e^{\lambda_1 t} + w_1 c_2 e^{\lambda_2 t} \\ v_2 c_1 e^{\lambda_1 t} + w_2 c_2 e^{\lambda_2 t} \end{bmatrix} \\ &= c_1 e^{\lambda_1 t} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} + c_2 e^{\lambda_2 t} \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (4.11)$$

Pelo Teorema 4.3 na página 616 esta é a solução geral do sistema, pois para as soluções

$$X_1(t) = e^{\lambda_1 t} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix}, \quad X_2(t) = e^{\lambda_2 t} \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \end{bmatrix},$$

$$\det \begin{bmatrix} X_1(0) & X_2(0) \end{bmatrix} = \det(P) \neq 0$$

e assim a solução de qualquer problema de valor inicial

$$\begin{cases} X'(t) = AX(t) \\ X(0) = X_0 \end{cases}$$

pode ser obtida desta solução atribuindo-se valores adequados às constantes c_1 e c_2 como mostraremos a seguir.

Se são dadas as condições iniciais $x_1(0) = x_1^{(0)}$ e $x_2(0) = x_2^{(0)}$, então para determinarmos c_1 e c_2 substituímos $t = 0$ na solução, ou seja,

$$\begin{bmatrix} x_1(0) \\ x_2(0) \end{bmatrix} = c_1 \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} + c_2 \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1^{(0)} \\ x_2^{(0)} \end{bmatrix}.$$

que é equivalente ao sistema linear

$$\begin{cases} v_1 c_1 + w_1 c_2 = x_1^{(0)} \\ v_2 c_1 + w_2 c_2 = x_2^{(0)} \end{cases}$$

4.1.2 Sistema com n Equações e n Incógnitas

O que fizemos anteriormente pode ser estendido para uma sistema com n equações e n incógnitas.

Supondo que existam matrizes

$$P = [V_1 \ V_2 \ \dots \ V_n] \text{ e } D = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & \dots & 0 \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & \lambda_n \end{bmatrix},$$

em que V_j é a coluna j de P , com $\lambda_1, \dots, \lambda_n \in \mathbb{R}$, tais que

$$A = PDP^{-1}. \quad (4.12)$$

Substituindo-se (4.12) em (4.3) obtemos

$$X'(t) = PDP^{-1}X(t).$$

Multiplicando-se à esquerda por P^{-1} , obtemos

$$P^{-1}X'(t) = DP^{-1}X(t). \quad (4.13)$$

Fazendo a mudança de variável

$$Y(t) = P^{-1}X(t), \quad (4.14)$$

a equação (4.13) pode ser escrita como

$$Y'(t) = DY(t),$$

que pode ser escrita na forma de um sistema de equações desacopladas

$$\begin{cases} y_1'(t) &= \lambda_1 y_1(t) \\ \vdots & \vdots \\ y_n'(t) &= \lambda_n y_n(t) \end{cases}$$

as equações podem ser resolvidas independentemente. A solução deste sistema é

$$y_1(t) = c_1 e^{\lambda_1 t}, \dots, y_n(t) = c_n e^{\lambda_n t}.$$

ou escrito na forma matricial

$$Y(t) = \begin{bmatrix} y_1(t) \\ \vdots \\ y_n(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1 e^{\lambda_1 t} \\ \vdots \\ c_n e^{\lambda_n t} \end{bmatrix}.$$

Assim, da mudança de variáveis (4.14), a solução da equação (4.3) é

$$X(t) = PY(t) = P \begin{bmatrix} c_1 e^{\lambda_1 t} \\ \vdots \\ c_n e^{\lambda_n t} \end{bmatrix}.$$

Como $P = [V_1 \ V_2 \ \dots \ V_n]$, então a solução geral do sistema é

$$\begin{aligned} X(t) &= \begin{bmatrix} x_1(t) \\ \vdots \\ x_n(t) \end{bmatrix} = [V_1 \ V_2 \ \dots \ V_n] \begin{bmatrix} c_1 e^{\lambda_1 t} \\ \vdots \\ c_n e^{\lambda_n t} \end{bmatrix} \\ &= c_1 e^{\lambda_1 t} V_1 + \dots + c_n e^{\lambda_n t} V_n, \end{aligned}$$

pois pelo [Teorema 4.3 na página 616](#), para as soluções

$$\begin{aligned} X_1(t) &= e^{\lambda_1 t} V_1, \quad \dots, \quad X_n(t) = e^{\lambda_n t} V_n, \\ \det [X_1(0) \ \dots \ X_n(0)] &= \det(P) \neq 0. \end{aligned}$$

4.1.3 Como Encontrar as Matrizes P e D

• Vamos, agora, mostrar como determinar matrizes

$$P = [V_1 \ V_2 \ \dots \ V_n] \text{ e } D = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & \dots & 0 \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & \lambda_n \end{bmatrix},$$

em que V_j é a coluna j de P , com $\lambda_1, \dots, \lambda_n \in \mathbb{R}$, tais que

$$A = PDP^{-1}. \quad (4.15)$$

Multiplicando à direita por P ambos os membros da equação anterior, obtemos

$$AP = PD. \quad (4.16)$$

Por um lado

$$AP = A \begin{bmatrix} V_1 & V_2 & \dots & V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} AV_1 & AV_2 & \dots & AV_n \end{bmatrix}$$

e por outro lado

$$PD = \begin{bmatrix} V_1 & V_2 & \dots & V_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & \lambda_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_1 V_1 & \lambda_2 V_2 & \dots & \lambda_n V_n \end{bmatrix}$$

Assim, (4.16) pode ser reescrita como,

$$\begin{bmatrix} AV_1 & AV_2 & \dots & AV_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_1 V_1 & \lambda_2 V_2 & \dots & \lambda_n V_n \end{bmatrix}.$$

Logo,

$$AV_j = \lambda_j V_j,$$

para $j = 1, \dots, n$. Ou seja, as colunas de P , V_j , e os elementos da diagonal de D , λ_j , satisfazem a equação

$$AV = \lambda V.$$

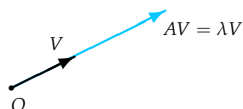
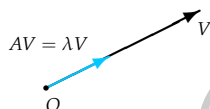
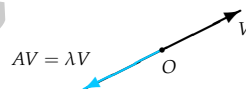
Isto motiva a seguinte definição.

Definição 4.2. Seja A uma matriz $n \times n$. Um escalar λ é chamado **autovalor** de A , se existe um vetor *não nulo*

$$V = \begin{bmatrix} v_1 \\ \vdots \\ v_n \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^n, \text{ tal que}$$

$$AV = \lambda V. \quad (4.17)$$

Um vetor *não nulo* que satisfaça (4.17), é chamado de **autovetor** de A .

 $\lambda > 1$  $0 < \lambda < 1$  $\lambda < 0$

Observe que, usando o fato de que a matriz identidade

$$I_n = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

é tal que $I_n V = V$, a equação (4.17) pode ser escrita como

$$AV = \lambda I_n V,$$

ou

$$(A - \lambda I_n)V = \vec{0}. \quad (4.18)$$

Como os autovetores são vetores não nulos, os autovalores são os valores de λ , para os quais o sistema $(A - \lambda I_n)V = \vec{0}$ tem solução não trivial. Mas, este sistema homogêneo tem solução não trivial se, e somente se, $\det(A - \lambda I_n) = 0$. Assim, temos um método para encontrar os autovalores e os autovetores de uma matriz A .

Proposição 4.4. *Seja A uma matriz $n \times n$.*

(a) *Os autovalores de A são as raízes do polinômio*

$$p(t) = \det(A - t I_n) \quad (4.19)$$

(b) *Para cada autovalor λ , os autovetores associados a λ são os vetores não nulos da solução do sistema*

$$(A - \lambda I_n)X = \vec{0}. \quad (4.20)$$

Definição 4.3. *Seja A uma matriz $n \times n$. O polinômio*

$$p(t) = \det(A - t I_n) \quad (4.21)$$

*é chamado **polinômio característico de A** .*

Já vimos que se uma matriz A é diagonalizável, então as colunas da matriz P , que faz a diagonalização, são autovetores associados a autovalores, que por sua vez são

elementos da matriz diagonal D . Como a matriz P é invertível, estes n autovetores são LI. Vamos mostrar, a seguir, que se a matriz A tem n autovetores LI, então ela é diagonalizável.

Teorema 4.5. *Seja A uma matriz $n \times n$ que tem n autovetores LI V_1, \dots, V_n associados a $\lambda_1, \dots, \lambda_n$, respectivamente. Então, as matrizes*

$$P = [V_1 \ V_2 \ \dots \ V_n] \quad e \quad D = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & \dots & 0 \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & \lambda_n \end{bmatrix}.$$

são tais que

$$A = PDP^{-1},$$

ou seja, A é diagonalizável.

Demonstração. Suponha que V_1, \dots, V_n são n autovetores linearmente independentes associados a $\lambda_1, \dots, \lambda_n$, respectivamente. Vamos definir as matrizes

$$P = [V_1 \ V_2 \ \dots \ V_n] \quad \text{e} \quad D = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & \dots & 0 \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & \lambda_n \end{bmatrix}.$$

Como $AV_j = \lambda_j V_j$, para $j = 1, \dots, n$, então

$$\begin{aligned} AP &= A [V_1 \ V_2 \ \dots \ V_n] = [AV_1 \ AV_2 \ \dots \ AV_n] \\ &= [\lambda_1 V_1 \ \lambda_2 V_2 \ \dots \ \lambda_n V_n] = [V_1 \ V_2 \ \dots \ V_n] \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & \dots & 0 \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & \lambda_n \end{bmatrix} = PD. \end{aligned}$$

Como V_1, \dots, V_n são LI, a matriz P é invertível. Assim, multiplicando a equação anterior por P^{-1} à direita obtemos

$$A = PDP^{-1}.$$

Ou seja, a matriz A é diagonalizável. ■

Assim, se uma matriz A é diagonalizável e $A = PDP^{-1}$, então os autovalores de A formam a diagonal de D e n autovetores linearmente independentes associados aos autovalores formam as colunas de P .

O resultado que vem a seguir, cuja demonstração pode ser encontrada por exemplo em [11], garante que se conseguirmos para cada autovalor, autovetores LI, então ao juntarmos todos os autovetores obtidos, eles continuarão sendo LI

Proposição 4.6. *Seja A uma matriz $n \times n$. Se $V_1^{(1)}, \dots, V_{n_1}^{(1)}$ são autovetores LI associados a λ_1 , $V_1^{(2)}, \dots, V_{n_2}^{(2)}$ são autovetores LI associados a λ_2 , ..., $V_1^{(k)}, \dots, V_{n_k}^{(k)}$ são autovetores LI associados a λ_k , com $\lambda_1, \dots, \lambda_k$ distintos, então $\{V_1^{(1)}, \dots, V_{n_1}^{(1)}, \dots, V_1^{(k)}, \dots, V_{n_k}^{(k)}\}$ é um conjunto LI*

Exemplo 4.5. Considere o sistema

$$\begin{cases} x_1'(t) &= x_1(t) - x_2(t) \\ x_2'(t) &= -4x_1(t) + x_2(t) \end{cases}$$

Este sistema pode ser escrito na forma matricial como

$$X'(t) = AX(t),$$

em que $X'(t) = \begin{bmatrix} x_1'(t) \\ x_2'(t) \end{bmatrix}$, $A = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -4 & 1 \end{bmatrix}$ e $X(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix}$.

Vamos determinar os autovalores e autovetores da matriz

$$A = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -4 & 1 \end{bmatrix}$$

Para esta matriz o polinômio característico é

$$p(t) = \det(A - tI_2) = \det \begin{bmatrix} 1-t & -1 \\ -4 & 1-t \end{bmatrix} = (1-t)^2 - 4 = t^2 - 2t - 3.$$

Como os autovalores de A são as raízes de $p(t)$, temos que os autovalores de A são $\lambda_1 = 3$ e $\lambda_2 = -1$.

Agora, vamos determinar os autovetores associados aos autovalores $\lambda_1 = 3$ e $\lambda_2 = -1$. Para isto vamos resolver os sistemas $(A - \lambda_1 I_2)Z = \vec{0}$ e $(A - \lambda_2 I_2)Z = \vec{0}$. Como

$$A - \lambda_1 I_2 = \begin{bmatrix} -2 & -1 \\ -4 & -2 \end{bmatrix},$$

então

$$(A - \lambda_1 I_2)Z = \vec{0} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} -2 & -1 \\ -4 & -2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \Leftrightarrow \begin{cases} -2x - y = 0 \\ -4x - 2y = 0 \end{cases}$$

cujas soluções gerais são

$$\mathbb{W}_1 = \{(\alpha, -2\alpha) \mid \alpha \in \mathbb{R}\} = \{\alpha(1, -2) \mid \alpha \in \mathbb{R}\}.$$

que é o conjunto de todos os autovetores associados a $\lambda_1 = 3$ acrescentado o vetor nulo. Vamos tomar o autovetor $V = (1, -2)$. Agora,

$$(A - \lambda_2 I_2)Z = \vec{0} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} 2 & -1 \\ -4 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

cujas soluções gerais são

$$\mathbb{W}_2 = \{(\alpha, 2\alpha) \mid \alpha \in \mathbb{R}\} = \{\alpha(1, 2) \mid \alpha \in \mathbb{R}\},$$

que é o conjunto de todos os autovetores associados a $\lambda_2 = -1$ acrescentado o vetor nulo. Vamos tomar o autovetor $W = (1, 2)$.

Assim, a matriz

$$A = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -4 & 1 \end{bmatrix}$$

é diagonalizável e as matrizes

$$P = [V \ W] = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -2 & 2 \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad D = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$$

são tais que

$$A = PDP^{-1}.$$

Portanto, a solução geral do sistema é

$$\begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} = c_1 e^{3t} \begin{bmatrix} 1 \\ -2 \end{bmatrix} + c_2 e^{-t} \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \end{bmatrix}.$$

Um gráfico mostrando diversas soluções aparecem na [Figura 4.1](#). Este tipo de gráfico, em que desenhamos no plano cartesiano várias curvas $(x_1(t), x_2(t))$, soluções do sistema, é chamado **retrato de fase**. As curvas $(x_1(t), x_2(t))$, soluções do sistema, são chamadas **trajetórias**.

Para $c_2 = 0$ as trajetórias estão contidas na reta que passa pela origem e tem direção do vetor $V = (1, -2)$, como pode ser visto mais facilmente fazendo a mudança de variáveis $t' = e^{3t}$ em

$$X(t) = c_1 e^{3t} \begin{bmatrix} 1 \\ -2 \end{bmatrix} = c_1 t' \begin{bmatrix} 1 \\ -2 \end{bmatrix}.$$

Estas trajetórias se afastam da origem, quando t cresce. Para $c_1 = 0$ as trajetórias estão contidas na reta que passa pela origem e tem direção do vetor $W = (1, 2)$, como pode ser visto mais facilmente fazendo a mudança de variáveis $t' = e^{-t}$ em

$$X(t) = c_2 e^{-t} \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \end{bmatrix} = c_2 t' \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \end{bmatrix}.$$

Estas trajetórias se aproximam da origem, quando t cresce. Para $c_1 \neq 0$ e $c_2 \neq 0$, temos curvas semelhantes a hipérbolas, como pode ser visto mais facilmente fazendo

a mudança de variáveis $t' = e^{3t}$ em

$$X(t) = c_1 e^{3t} \begin{bmatrix} 1 \\ -2 \end{bmatrix} + c_2 e^{-t} \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \end{bmatrix} = c_1 t' \begin{bmatrix} 1 \\ -2 \end{bmatrix} + c_2 \frac{1}{\sqrt[3]{t'}} \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \end{bmatrix}.$$

Estas trajetórias se aproximam da reta que passa pela origem, e tem direção do vetor $V = (1, -2)$, quando t cresce.

A disposição das trajetórias é típica de um sistema linear $X' = AX$, em que os autovalores de A são reais não nulos com sinais contrários. Neste caso, dizemos que a origem é um **ponto de sela**.

Exemplo 4.6. Considere o sistema

$$\begin{cases} x_1'(t) = 3x_1(t) - x_2(t) \\ x_2'(t) = -2x_1(t) + 2x_2(t) \end{cases}$$

Vamos determinar os autovalores e autovetores da matriz do sistema

$$A = \begin{bmatrix} 3 & -1 \\ -2 & 2 \end{bmatrix}$$

Para esta matriz o polinômio característico é

$$p(t) = \det(A - tI_2) = \det \begin{bmatrix} 3-t & -1 \\ -2 & 2-t \end{bmatrix} = (3-t)(2-t) - 2 = t^2 - 5t + 4.$$

Como os autovalores de A são as raízes de $p(t)$, temos que os autovalores de A são $\lambda_1 = 1$ e $\lambda_2 = 4$.

Agora, vamos determinar os autovetores associados aos autovalores $\lambda_1 = 1$ e $\lambda_2 = 4$. Para isto vamos resolver os sistemas $(A - \lambda_1 I_2)Z = \vec{0}$ e $(A - \lambda_2 I_2)Z = \vec{0}$.

$$(A - \lambda_1 I_2)Z = \vec{0} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} 2 & -1 \\ -2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \Leftrightarrow \begin{cases} 2x - y = 0 \\ -2x + y = 0 \end{cases}$$

cuja solução geral é

$$\mathbb{W}_1 = \{(\alpha, 2\alpha) \mid \alpha \in \mathbb{R}\} = \{\alpha(1, 2) \mid \alpha \in \mathbb{R}\}.$$

Este é o conjunto de todos os autovetores associados a $\lambda_1 = 1$ acrescentado o vetor nulo. Podemos tomar o autovetor $V = (1, 2)$.

Agora,

$$(A - \lambda_2 I_2)Z = \vec{0}$$

é

$$\begin{bmatrix} -1 & -1 \\ -2 & -2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

cuja solução geral é

$$\mathbb{W}_2 = \{(-\alpha, \alpha) \mid \alpha \in \mathbb{R}\} = \{\alpha(-1, 1) \mid \alpha \in \mathbb{R}\}.$$

Este é o conjunto de todos os autovetores associados a $\lambda_2 = 4$ acrescentado o vetor nulo. Podemos tomar o autovetor $W = (-1, 1)$.

Assim, a matriz A é diagonalizável e as matrizes

$$P = [V \ W] = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 2 & 1 \end{bmatrix} \text{ e } D = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 4 \end{bmatrix}$$

são tais que

$$A = PDP^{-1}.$$

Portanto, a solução geral do sistema de equações diferenciais é dada por

$$\begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} = c_1 e^t \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \end{bmatrix} + c_2 e^{4t} \begin{bmatrix} -1 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

O plano de fase com várias trajetórias é mostrado na [Figura 4.2](#). Para $c_2 = 0$ as trajetórias estão contidas na reta que passa pela origem e tem direção do vetor $V = (1, 2)$,

como pode ser visto mais facilmente fazendo a mudança de variáveis $t' = e^t$ em

$$X(t) = c_1 e^t \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \end{bmatrix} = c_1 t' \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \end{bmatrix}.$$

Para $c_1 = 0$ as trajetórias estão contidas na reta que passa pela origem e tem direção do vetor $W = (-1, 1)$, como pode ser visto mais facilmente fazendo a mudança de variáveis $t' = e^{4t}$ em

$$X(t) = c_2 e^{4t} \begin{bmatrix} -1 \\ 1 \end{bmatrix} = c_2 t' \begin{bmatrix} -1 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

Para $c_1 \neq 0$ e $c_2 \neq 0$, temos curvas semelhantes a parábolas, como pode ser visto mais facilmente fazendo a mudança de variáveis $t' = e^t$ em

$$X(t) = c_1 e^t \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \end{bmatrix} + c_2 e^{4t} \begin{bmatrix} -1 \\ 1 \end{bmatrix} = c_1 t' \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \end{bmatrix} + c_2 t'^4 \begin{bmatrix} -1 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

Todas as trajetórias se afastam da origem quando t cresce.

A disposição das trajetórias é típica de um sistema linear $X' = AX$, em que os autovalores de A são reais e positivos. Neste caso, dizemos que a origem é um **nó instável** ou **fonte**. No caso em que os autovalores de A reais e negativos as trajetórias são semelhantes, mas percorridas no sentido contrário às da [Figura 4.2](#). Neste caso, dizemos que a origem é um **nó atrator** ou **sumidouro**.

Exemplo 4.7. Considere o seguinte problema de valor inicial

$$X' = \begin{bmatrix} -3 & 0 & 2 \\ -2 & -1 & 2 \\ -4 & 0 & 3 \end{bmatrix} X, \quad X(0) = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Este sistema pode ser escrito como $X' = AX$, em que $A = \begin{bmatrix} -3 & 0 & 2 \\ -2 & -1 & 2 \\ -4 & 0 & 3 \end{bmatrix}$. O

polinômio característico de A é

$$p(t) = \det(A - tI_3) = \det \begin{bmatrix} -3-t & 0 & 2 \\ -2 & -1-t & 2 \\ -4 & 0 & 3-t \end{bmatrix}.$$

Desenvolvendo o determinante em termos da 2ª coluna obtemos que

$$p(t) = (-1)^{(2+2)}(-1-t) \det \begin{bmatrix} -3-t & 2 \\ -4 & 3-t \end{bmatrix} = (-1-t)[(-3-t)(3-t)+8] = -(1+t)(t^2-1)$$

cujas raízes são $\lambda_1 = -1$ e $\lambda_2 = 1$ que são os autovalores de A .

Os autovetores associados ao autovalor $\lambda_1 = -1$ são os vetores $Z \neq \vec{0}$ que satisfazem $AZ = \lambda_1 Z$, ou seja,

$$(A - \lambda_1 I_3)Z = \vec{0} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} -2 & 0 & 2 \\ -2 & 0 & 2 \\ -4 & 0 & 4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \Leftrightarrow \begin{cases} -2x & + & 2z & = & 0 \\ -2x & + & 2z & = & 0 \\ -4x & + & 4z & = & 0 \end{cases}$$

cuja matriz aumentada é

$$\left[\begin{array}{ccc|c} -2 & 0 & 2 & 0 \\ -2 & 0 & 2 & 0 \\ -4 & 0 & 4 & 0 \end{array} \right]$$

$$\begin{aligned} -1 \times 1^{\text{a}} \text{ linha} + 2^{\text{a}} \text{ linha} &\rightarrow 2^{\text{a}} \text{ linha} \\ -2 \times 1^{\text{a}} \text{ linha} + 3^{\text{a}} \text{ linha} &\rightarrow 3^{\text{a}} \text{ linha} \end{aligned}$$

$$\left[\begin{array}{ccc|c} -2 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right]$$

Assim, a solução geral do sistema que é o conjunto dos autovetores associados a $\lambda_1 = -1$ acrescentado o vetor nulo é

$$\mathbb{W}_1 = \{(\beta, \alpha, \beta) = \alpha(0, 1, 0) + \beta(1, 0, 1) \mid \alpha, \beta \in \mathbb{R}\}.$$

Portanto, $V_1 = (1, 0, 1)$ e $V_2 = (0, 1, 0)$ são autovetores linearmente independentes associados a $\lambda_1 = -1$.

Os autovetores associados ao autovalor $\lambda_2 = 1$ são os vetores $Z \neq \vec{0}$ que satisfazem $AZ = \lambda_2 Z$, ou seja,

$$(A - \lambda_2 I_3)Z = \vec{0} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} -4 & 0 & 2 \\ -2 & -2 & 2 \\ -4 & 0 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \Leftrightarrow \begin{cases} -4x & + & 2z & = & 0 \\ -2x & - & 2y & + & 2z & = & 0 \\ -4x & & & + & 2z & = & 0 \end{cases}$$

cujas matriz aumentada é

$$\left[\begin{array}{ccc|c} -4 & 0 & 2 & 0 \\ -2 & -2 & 2 & 0 \\ -4 & 0 & 2 & 0 \end{array} \right]$$

$$\begin{aligned} -\frac{1}{2} \times 1^{\text{a}} \text{ linha} + 2^{\text{a}} \text{ linha} &\longrightarrow 2^{\text{a}} \text{ linha} \\ -1 \times 1^{\text{a}} \text{ linha} + 3^{\text{a}} \text{ linha} &\longrightarrow 3^{\text{a}} \text{ linha} \end{aligned}$$

$$\left[\begin{array}{ccc|c} -4 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & -2 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right]$$

Assim, a solução geral do sistema que é o conjunto dos autovetores associados a $\lambda_2 = 1$ acrescentado o vetor nulo é

$$\mathbb{W}_2 = \{(\alpha, \alpha, 2\alpha) = \alpha(1, 1, 2) \mid \alpha \in \mathbb{R}\}$$

Assim, $W = (1, 1, 2)$ é um autovetor associado a $\lambda_2 = 1$.

Assim, a matriz A é diagonalizável em \mathbb{R} e as matrizes

$$P = [V_1 \ V_2 \ W] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 2 \end{bmatrix}$$

e

$$D = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_1 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

são tais que

$$A = PDP^{-1}.$$

Portanto, a solução geral do sistema de equações diferenciais é dada por

$$X(t) = c_1 e^{-t} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} + c_2 e^{-t} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} + c_3 e^t \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 2 \end{bmatrix}$$

Substituindo-se $t = 0$ na solução geral e usando a condição inicial obtemos

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} = X(0) = c_1 \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} + c_2 \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} + c_3 \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 2 \end{bmatrix}.$$

que é equivalente ao sistema linear

$$\begin{cases} c_1 + c_3 = 0 \\ c_2 + c_3 = 1 \\ c_1 + 2c_3 = 0 \end{cases}$$

Resolvendo obtemos $c_1 = 0$, $c_2 = 1$ e $c_3 = 0$. Assim, a solução do problema de valor inicial é

$$X(t) = e^{-t} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Exercícios (respostas na página 691)

1.1. Ache a solução geral do sistema de equações e desenhe o retrato de fase:

$$(a) \begin{cases} x_1'(t) = x_1(t) + x_2(t) \\ x_2'(t) = x_1(t) + x_2(t) \end{cases}$$

$$(b) \begin{cases} x_1'(t) = x_1(t) - x_2(t) \\ x_2'(t) = 2x_1(t) + 4x_2(t) \end{cases}$$

$$(c) X' = \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 3 & 4 \end{bmatrix} X$$

$$(d) X' = \begin{bmatrix} -1 & 8 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} X$$

$$(e) X' = \begin{bmatrix} 2 & -3 \\ 1 & -2 \end{bmatrix} X$$

$$(f) X' = \begin{bmatrix} -1 & -2 \\ 0 & -2 \end{bmatrix} X$$

1.2. Encontre a solução geral do sistema

$$\begin{cases} x_1'(t) = 2ax_1(t) + x_2(t) \\ x_2'(t) = x_1(t) + 4ax_2(t) \end{cases}$$

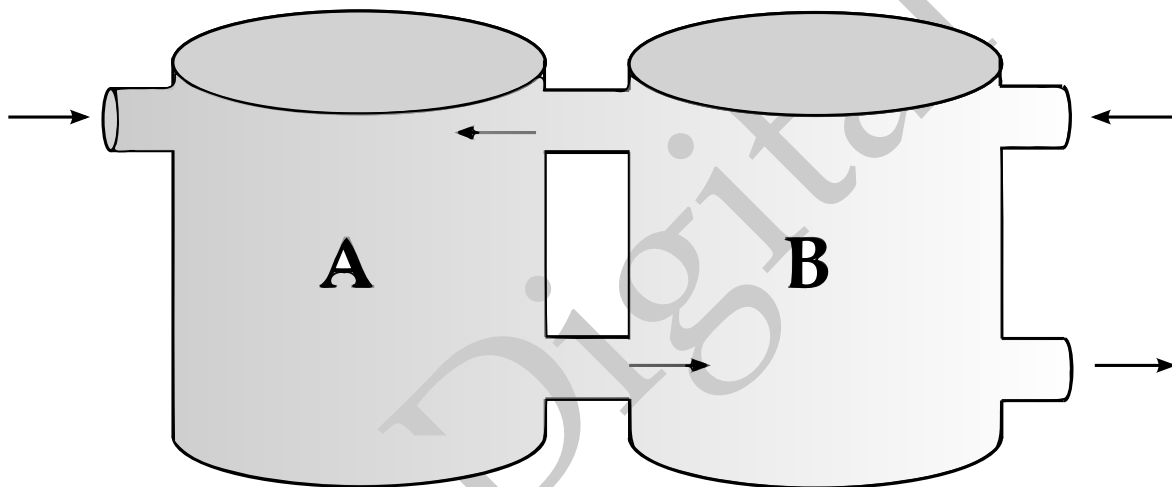
1.3. Considere o seguinte problema de valor inicial

$$\begin{bmatrix} \frac{dL}{dt} \\ \frac{dD}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -k & 0 \\ k & -k_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L \\ D \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} L(0) \\ D(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_0 \\ D_0 \end{bmatrix}$$

em que L é o teor de material orgânico que pode ser aproveitado pelas bactérias como alimento e D é o déficit de oxigênio.

(a) Encontre a solução do problema de valor inicial para $k = 2$ e $k_r = 3$.

(b) Encontre a solução do problema de valor inicial para $k \neq k_r$.



- 1.4. Considere dois tanques A e B contendo, inicialmente, no primeiro uma salmoura com 380 gramas de sal em 100 litros de água e no segundo 450 gramas em 100 litros de água. Uma salmoura é bombeada para o primeiro tanque a uma taxa de 2 litros/minuto com uma concentração de 3 gramas/litro de sal, enquanto outra mistura é bombeada para o segundo tanque a uma taxa de 2 litros/minuto com uma concentração de 6 gramas/litro de sal. Os tanques estão conectados de forma que o tanque B recebe salmoura do tanque A a uma taxa de 3 litros por minuto e o tanque A recebe salmoura do tanque B a uma taxa de 1 litro por minuto. O tanque B tem ainda uma saída que libera a mistura a uma taxa de 4 litros por minuto.

- (a) Modele o problema de encontrar a quantidade de sal no tanque A, $q_1(t)$, e a quantidade de sal no tanque B, $q_2(t)$, como função do tempo e encontre que satisfazem o sistema de equações diferenciais

$$\begin{cases} q_1'(t) = -3 \cdot 10^{-2} q_1(t) + 10^{-2} q_2(t) + 6, \\ q_2'(t) = 3 \cdot 10^{-2} q_1(t) - 5 \cdot 10^{-2} q_2(t) + 12. \end{cases}$$

- (b) Encontre os valores das quantidades de sal em cada tanque, q_1^E e q_2^E , para os quais o sistema está em equilíbrio, isto é, a função constante, $(q_1(t), q_2(t)) = (q_1^E, q_2^E)$ é solução do sistema.
- (c) Sejam $x_1(t) = q_1(t) - q_1^E$ e $x_2(t) = q_2(t) - q_2^E$, os desvios dos níveis de sal dos seus respectivos valores de equilíbrio. Encontre que satisfazem o sistema de equações diferenciais

$$\begin{cases} x_1'(t) &= -3 \cdot 10^{-2}x_1(t) + 10^{-2}x_2(t), \\ x_2'(t) &= 3 \cdot 10^{-2}x_1(t) - 5 \cdot 10^{-2}x_2(t). \end{cases}$$

- (d) Encontre a solução geral do sistema de equações diferenciais do item anterior.
- (e) Encontre a quantidade de sal no tanque A, $q_1(t)$, e a quantidade de sal no tanque B, $q_2(t)$, como função do tempo.

- 1.5. (a) Resolva o problema $X' = AX$ em que

$$A = \begin{bmatrix} -4 & 6 \\ -1 & 3 \end{bmatrix} \text{ e } X(0) = \begin{bmatrix} 1 \\ -2 \end{bmatrix}$$

- (b) No plano de fase, esboce a curva solução $X(t)$ encontrada no item (a).

- 1.6. Resolva o seguinte problema de valor inicial

$$X' = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} X \text{ e } X(0) = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ -1 \end{bmatrix}$$

- 1.7. Resolva o seguinte sistema

$$X' = \begin{bmatrix} 0 & -3 & 3 \\ -3 & 0 & 3 \\ -3 & -3 & 6 \end{bmatrix} X$$

Comando do pacote GAAL:

`fluxlin(A)` desenha uma amostra das trajetórias que são soluções do sistema de equações diferenciais

$$X'(t) = AX(t).$$

4.2 A Matriz A é Diagonalizável em \mathbb{C}

4.2.1 Sistema com 2 Equações e 2 Incógnitas

Considere, novamente, um sistema de equações diferenciais lineares

$$\begin{cases} x_1'(t) = ax_1(t) + bx_2(t) \\ x_2'(t) = cx_1(t) + dx_2(t) \end{cases}$$

em que $a, b, c, d \in \mathbb{R}$ com b ou c não nulos. Neste caso a solução de uma equação depende da outra. Podemos escrever este sistema na forma de uma equação diferencial matricial

$$X'(t) = AX(t), \quad (4.22)$$

em que

$$X'(t) = \begin{bmatrix} x_1'(t) \\ x_2'(t) \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad X(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix}.$$

• Vamos supor, agora, que existam matrizes

$$P = \begin{bmatrix} v_1 + iw_1 & v_1 - iw_1 \\ v_2 + iw_2 & v_2 - iw_2 \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad D = \begin{bmatrix} \alpha + i\beta & 0 \\ 0 & \alpha - i\beta \end{bmatrix},$$

tais que

$$A = PDP^{-1}. \quad (4.23)$$

Substituindo-se (4.23) em (4.22) obtemos

$$X'(t) = PDP^{-1}X(t).$$

Multiplicando-se à esquerda por P^{-1} , obtemos

$$P^{-1}X'(t) = DP^{-1}X(t).$$

Fazendo a mudança de variável $Y(t) = P^{-1}X(t)$, obtemos o sistema

$$Y'(t) = DY(t),$$

que pode ser escrito na forma

$$\begin{cases} y_1'(t) &= (\alpha + i\beta) y_1(t) \\ y_2'(t) &= (\alpha - i\beta) y_2(t) \end{cases}$$

Este sistema foi resolvido no [Exemplo 4.1 na página 610](#) e sua solução é

$$\begin{aligned} y_1(t) &= C_1 e^{(\alpha+i\beta)t} \\ y_2(t) &= C_2 e^{(\alpha-i\beta)t}. \end{aligned}$$

Assim, a solução complexa da equação (4.22) é

$$X(t) = PY(t) = P \begin{bmatrix} C_1 e^{(\alpha+i\beta)t} \\ C_2 e^{(\alpha-i\beta)t} \end{bmatrix}.$$

Como $P = \begin{bmatrix} v_1 + iw_1 & v_1 - iw_1 \\ v_2 + iw_2 & v_2 - iw_2 \end{bmatrix}$, então a solução geral complexa é dada por

$$\begin{aligned} X(t) &= \begin{bmatrix} v_1 + iw_1 & v_1 - iw_1 \\ v_2 + iw_2 & v_2 - iw_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_1 e^{(\alpha+i\beta)t} \\ C_2 e^{(\alpha-i\beta)t} \end{bmatrix} = \\ &= C_1 e^{(\alpha+i\beta)t} \begin{bmatrix} v_1 + iw_1 \\ v_2 + iw_2 \end{bmatrix} + C_2 e^{(\alpha-i\beta)t} \begin{bmatrix} v_1 - iw_1 \\ v_2 - iw_2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.24)$$

As constantes C_1 e C_2 são complexas. Estamos interessados em encontrar a solução geral real. Para isto vamos escrever a solução complexa em termos de soluções reais. Defina

$$X_1(t) = \operatorname{Re} \left\{ e^{(\alpha+i\beta)t} \begin{bmatrix} v_1 + iw_1 \\ v_2 + iw_2 \end{bmatrix} \right\} \quad \text{e} \quad X_2(t) = \operatorname{Im} \left\{ e^{(\alpha+i\beta)t} \begin{bmatrix} v_1 + iw_1 \\ v_2 + iw_2 \end{bmatrix} \right\}$$

então $X(t)$ pode ser escrita como

$$\begin{aligned} X(t) &= C_1(X_1(t) + iX_2(t)) + C_2(X_1(t) - iX_2(t)) \\ &= (C_1 + C_2)X_1(t) + i(C_1 - C_2)X_2(t) \end{aligned}$$

Logo, a solução geral complexa pode ser escrita em termos de soluções reais. Tomando $C_1 = C_2 = \frac{1}{2}$ obtemos a solução $X_1(t)$ e tomando $C_1 = -C_2 = \frac{1}{2i}$ obtemos a solução $X_2(t)$.

$$\det \begin{bmatrix} X_1(0) & X_2(0) \end{bmatrix} = \det \begin{bmatrix} v_1 & w_1 \\ v_2 & w_2 \end{bmatrix} = \frac{i}{2} \det(P) \neq 0,$$

pois

$$\begin{aligned} \det(P) &= \det \begin{bmatrix} v_1 + iw_1 & v_1 - iw_1 \\ v_2 + iw_2 & v_2 - iw_2 \end{bmatrix} = \det \begin{bmatrix} v_1 & v_1 - iw_1 \\ v_2 & v_2 - iw_2 \end{bmatrix} + i \begin{bmatrix} w_1 & v_1 - iw_1 \\ w_2 & v_2 - iw_2 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} v_1 & v_1 \\ v_2 & v_2 \end{bmatrix} - i \begin{bmatrix} v_1 & w_1 \\ v_2 & w_2 \end{bmatrix} + i \begin{bmatrix} w_1 & v_1 \\ w_2 & v_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_1 & w_1 \\ w_2 & w_2 \end{bmatrix} \\ &= -2i \det \begin{bmatrix} v_1 & w_1 \\ v_2 & w_2 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Logo, pelo [Teorema 4.3 na página 616](#) a solução geral (real) do sistema é

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} &= c_1 X_1(t) + c_2 X_2(t) \\ &= c_1 \operatorname{Re} \left\{ e^{(\alpha+i\beta)t} \begin{bmatrix} v_1 + iw_1 \\ v_2 + iw_2 \end{bmatrix} \right\} + c_2 \operatorname{Im} \left\{ e^{(\alpha+i\beta)t} \begin{bmatrix} v_1 + iw_1 \\ v_2 + iw_2 \end{bmatrix} \right\} \\ &= c_1 e^{\alpha t} \left(\cos \beta t \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} - \operatorname{sen} \beta t \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \end{bmatrix} \right) + c_2 e^{\alpha t} \left(\cos \beta t \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \end{bmatrix} + \operatorname{sen} \beta t \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \right) \end{aligned}$$

4.2.2 Sistema com n Equações e n Incógnitas

Supondo que existam matrizes

$$P = [Z_1 \quad \bar{Z}_1 \quad \dots \quad Z_k \quad \bar{Z}_k \quad V_{2k+1} \quad \dots \quad V_n] \text{ e}$$

$$D = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & & & & & 0 \\ 0 & \bar{\lambda}_1 & & & & & \\ & & \ddots & & & & \\ & & & \lambda_k & 0 & & \\ & & & 0 & \bar{\lambda}_k & & \\ & & & & & \lambda_{2k+1} & \\ & & & & & & \ddots & \\ 0 & & & & & & & 0 \\ & & & & & & & 0 & \lambda_n \end{bmatrix},$$

com $\lambda_1, \dots, \lambda_k \in \mathbb{C}$ e $\lambda_{2k+1}, \dots, \lambda_n \in \mathbb{R}$, tais que

$$A = PDP^{-1}. \quad (4.25)$$

A solução geral complexa é

$$\begin{aligned}
 X(t) &= \begin{bmatrix} Z_1 & \bar{Z}_1 & \dots & Z_k & \bar{Z}_k & V_{2k+1} & \dots & V_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_1 e^{\lambda_1 t} \\ \vdots \\ C_n e^{\lambda_n t} \end{bmatrix} \\
 &= C_1 e^{\lambda_1 t} Z_1 + C_2 e^{\bar{\lambda}_1 t} \bar{Z}_1 + \dots + C_{2k-1} e^{\lambda_k t} Z_k + C_{2k} e^{\bar{\lambda}_k t} \bar{Z}_k + \\
 &\quad + C_{2k+1} e^{\lambda_{2k+1} t} V_{2k+1} + \dots + C_n e^{\lambda_n t} V_n \\
 &= (C_1 + C_2) \operatorname{Re}\{e^{\lambda_1 t} Z_1\} + i(C_1 - C_2) \operatorname{Im}\{e^{\lambda_1 t} Z_1\} \\
 &\quad + \dots + (C_{2k-1} + C_{2k}) \operatorname{Re}\{e^{\lambda_k t} Z_k\} + i(C_{2k-1} - C_{2k}) \operatorname{Im}\{e^{\lambda_k t} Z_k\} + \\
 &\quad + c_{2k+1} e^{\lambda_{2k+1} t} V_{2k+1} + \dots + c_n e^{\lambda_n t} V_n
 \end{aligned}$$

A solução geral real é

$$\begin{aligned}
 X(t) &= c_1 \operatorname{Re}\{e^{\lambda_1 t} Z_1\} + c_2 \operatorname{Im}\{e^{\lambda_1 t} Z_1\} + \dots + c_{2k-1} \operatorname{Re}\{e^{\lambda_k t} Z_k\} + c_{2k} \operatorname{Im}\{e^{\lambda_k t} Z_k\} + \\
 &\quad + c_{2k+1} e^{\lambda_{2k+1} t} V_{2k+1} + \dots + c_n e^{\lambda_n t} V_n
 \end{aligned}$$

pois pelo [Teorema 4.3 na página 616](#), para

$$\begin{aligned}
 X_1(t) &= \operatorname{Re}\{e^{\lambda_1 t} Z_1\}, \quad X_2(t) = \operatorname{Im}\{e^{\lambda_1 t} Z_1\}, \dots, \\
 X_{2k-1} &= \operatorname{Re}\{e^{\lambda_k t} Z_k\}, \quad X_{2k} = \operatorname{Im}\{e^{\lambda_k t} Z_k\}, \quad X_{2k+1} = e^{\lambda_{2k+1} t} V_{2k+1}, \dots, \quad X_n(t) = e^{\lambda_n t} V_n, \\
 \det \begin{bmatrix} X_1(0) & \dots & X_n(0) \end{bmatrix} &= \det \begin{bmatrix} \operatorname{Re}\{Z_1\} & \operatorname{Im}\{Z_1\} & \dots & \operatorname{Re}\{Z_k\} & \operatorname{Im}\{Z_k\} & V_{2k+1} & \dots & V_n \end{bmatrix} \\
 &= \left(\frac{i}{2}\right)^k \det(P) \neq 0
 \end{aligned}$$

4.2.3 Como Encontrar as Matrizes P e D

Vamos, agora, mostrar como determinar matrizes

$$P = [Z_1 \quad \bar{Z}_1 \quad \dots \quad Z_k \quad \bar{Z}_k \quad V_{2k+1} \quad \dots \quad V_n] \text{ e}$$

$$D = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & \dots & & & 0 \\ 0 & \bar{\lambda}_1 & & & & \\ & & \ddots & & & \\ & & & \lambda_k & 0 & \\ & & & 0 & \bar{\lambda}_k & \\ & & & & & \lambda_{2k+1} & \ddots & \\ & & & & & & & 0 \\ 0 & \dots & & & & & & 0 & \lambda_n \end{bmatrix},$$

com $\lambda_1, \dots, \lambda_k \in \mathbb{C}$ e $\lambda_{2k+1}, \dots, \lambda_n \in \mathbb{R}$, tais que

$$A = PDP^{-1}. \quad (4.26)$$

Vamos fazer exatamente a mesma coisa que fizemos para o caso em que a matriz A é diagonalizável em \mathbb{R} . Multiplicando à direita por P ambos os membros da equação anterior, obtemos

$$AP = PD. \quad (4.27)$$

Por um lado

$$\begin{aligned} AP &= A [Z_1 \quad \bar{Z}_1 \quad \dots \quad Z_k \quad \bar{Z}_k \quad V_{2k+1} \quad \dots \quad V_n] \\ &= [AZ_1 \quad A\bar{Z}_1 \quad \dots \quad AZ_k \quad A\bar{Z}_k \quad AV_{2k+1} \quad \dots \quad AV_n] \end{aligned}$$

e por outro lado

$$PD = [\lambda_1 Z_1 \quad \bar{\lambda}_1 \bar{Z}_1 \quad \dots \quad \lambda_k Z_k \quad \bar{\lambda}_k \bar{Z}_k \quad \lambda_{2k+1} V_{2k+1} \quad \dots \quad \lambda_n V_n].$$

Assim, (4.27) pode ser reescrita como,

$$\begin{bmatrix} AZ_1 & A\bar{Z}_1 & \dots & AZ_k & A\bar{Z}_k & AV_{2k+1} & \dots & AV_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_1 Z_1 & \bar{\lambda}_1 \bar{Z}_1 & \dots & \lambda_k Z_k & \bar{\lambda}_k \bar{Z}_k & \lambda_{2k+1} V_{2k+1} & \dots & \lambda_n V_n \end{bmatrix}$$

Comparando coluna a coluna obtemos que

$$AZ_j = \lambda_j Z_j, \quad (4.28)$$

$$A\bar{Z}_j = \bar{\lambda}_j \bar{Z}_j, \quad (4.29)$$

para $j = 1, \dots, k$ e

$$AV_j = \lambda_j V_j,$$

para $j = 2k + 1, \dots, n$.

Ou seja, as colunas de P e os elementos da diagonal de D satisfazem a equação

$$AZ = \lambda Z. \quad (4.30)$$

em que o escalar complexo λ e o vetor complexo Z são incógnitas.

O escalar complexo λ é chamado **autovalor (complexo)** da matriz A e o vetor *não nulo* Z que satisfaça (4.30), é chamado de **autovetor (complexo)** de A .

Observe que a equação (4.30) pode ser escrita como

$$AZ = \lambda I_n Z$$

ou

$$(A - \lambda I_n)Z = \bar{0}. \quad (4.31)$$

Como os autovetores são vetores não nulos, os autovalores são os valores de λ , para os quais o sistema $(A - \lambda I_n)Z = \bar{0}$ tem solução não trivial. Mas, este sistema homogêneo tem solução não trivial se, e somente se, $\det(A - \lambda I_n) = 0$.

Observe que a equação (4.29) é o conjugado da equação (4.28). Assim, temos um método para encontrar os autovalores e os autovetores complexos de uma matriz A .

- (a) Os autovalores de A são as raízes do polinômio

$$p(t) = \det(A - tI_n) \quad (4.32)$$

- (b) Para cada autovalor λ , os autovetores associados a λ são os vetores não nulos da solução do sistema

$$(A - \lambda I_n)Z = \vec{0}. \quad (4.33)$$

- (c) Os autovetores associados ao autovalor conjugado $\bar{\lambda} = \alpha - i\beta$ são os conjugados dos autovetores associados a $\lambda = \alpha + i\beta$.

Exemplo 4.8. Considere o sistema

$$\begin{cases} x_1'(t) = -x_1(t) + 2x_2(t) \\ x_2'(t) = -x_1(t) + x_2(t) \end{cases}$$

Este sistema pode ser escrito na forma $X'(t) = AX(t)$, em que

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

O polinômio característico da matriz A é $p(t) = \det(A - tI_2) = (-1 - t)(1 - t)^2 + 2 = t^2 + 1$ cujas raízes são $\lambda_1 = i$ e $\lambda_2 = \bar{\lambda}_1 = -i$. Agora, vamos determinar os autovetores associados ao autovalor $\lambda_1 = i$. Para isto vamos resolver o sistema $(A - \lambda_1 I_2)Z = \vec{0}$.

$$(A - \lambda_1 I_2)Z = \vec{0} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} -1-i & 2 \\ -1 & 1-i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \Leftrightarrow \begin{cases} (-1-i)x + 2y = 0 \\ -x + (1-i)y = 0 \end{cases}$$

cuja solução geral é

$$\mathbb{W}_1 = \{((1-i)\alpha, \alpha) \mid \alpha \in \mathbb{C}\} = \{\alpha(1-i, 1) \mid \alpha \in \mathbb{C}\}.$$

Este é o conjunto de todos os autovetores associados a $\lambda_1 = i$ acrescentado o vetor nulo. Assim, $Z = (1-i, 1)$ é um autovetor associado a $\lambda_1 = i$. E $\bar{Z} = (1+i, 1)$ é um autovetor associado a $\lambda_2 = \bar{\lambda}_1 = -i$.

Assim, a matriz

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

é diagonalizável em \mathbb{C} e as matrizes

$$P = [Z \ \bar{Z}] = \begin{bmatrix} 1-i & 1+i \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad D = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \bar{\lambda}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i & 0 \\ 0 & -i \end{bmatrix}$$

são tais que

$$A = PDP^{-1}.$$

Portanto, a solução do sistema de equações diferenciais é dada por

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} &= c_1 \operatorname{Re} \left\{ e^{it} \begin{bmatrix} 1-i \\ 1 \end{bmatrix} \right\} + c_2 \operatorname{Im} \left\{ e^{it} \begin{bmatrix} 1-i \\ 1 \end{bmatrix} \right\} \\ &= c_1 \left(\cos t \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} - \sin t \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \end{bmatrix} \right) + c_2 \left(\cos t \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \end{bmatrix} + \sin t \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \right) \end{aligned}$$

Os gráficos de diversas soluções aparecem na [Figura 4.3](#). As trajetórias são elipses e o sentido é o de $V = (1, 1)$ para $-W = (1, 0)$ ou de $W = (-1, 0)$ para $V = (1, 1)$, como pode ser visto mais facilmente se reescrevemos a solução geral como

$$X(t) = \cos t \left(c_1 \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} + c_2 \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \end{bmatrix} \right) + \sin t \left(c_2 \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} - c_1 \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \end{bmatrix} \right).$$

A disposição das trajetórias é típica de um sistema linear $X' = AX$, em que os autovalores de A são complexos com a parte real igual a zero. Neste caso, dizemos que a origem é um **centro**.

Exemplo 4.9. Considere o sistema

$$\begin{cases} x_1'(t) = -3x_1(t) + 2x_2(t), \\ x_2'(t) = -4x_1(t) + x_2(t). \end{cases}$$

A matriz do sistema é

$$A = \begin{bmatrix} -3 & 2 \\ -4 & 1 \end{bmatrix}.$$

O polinômio característico de A é $p(t) = \det(A - tI_2) = (-3-t)(1-t) + 8 = t^2 + 2t + 5$ cujas raízes são $\lambda_1 = -1 + 2i$ e $\lambda_2 = \bar{\lambda}_1 = -1 - 2i$. Agora, vamos determinar os autovetores associados ao autovalor $\lambda_1 = -1 + 2i$. Para isto vamos resolver o sistema $(A - \lambda_1 I_2)Z = \bar{0}$.

$$(A - \lambda_1 I_2)Z = \bar{0} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} -2-2i & 2 \\ -4 & 2-2i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \Leftrightarrow \begin{cases} (-2-2i)x + 2y = 0 \\ -4x + (2-2i)y = 0 \end{cases}$$

cuja solução geral é

$$\mathbb{W}_1 = \{(\alpha, (1+i)\alpha) \mid \alpha \in \mathbb{C}\}.$$

que é o conjunto de todos os autovetores associados a $\lambda_1 = -1 + 2i$ acrescentado o vetor nulo. Assim, $Z = (1, 1+i)$ é um autovetor associado a $\lambda_1 = -1 + 2i$. Temos também que $\bar{Z} = (1, 1-i)$ é um autovetor associado a $\lambda_2 = \bar{\lambda}_1 = -1 - 2i$.

Assim, a matriz A é diagonalizável em \mathbb{C} e as matrizes

$$P = [Z \bar{Z}] = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1+i & 1-i \end{bmatrix} \text{ e } D = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \bar{\lambda}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1+2i & 0 \\ 0 & -1-2i \end{bmatrix}$$

são tais que

$$A = PDP^{-1}.$$

Portanto, a solução do sistema de equações diferenciais é dada por

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} &= c_1 \operatorname{Re} \left\{ e^{(-1+2i)t} \begin{bmatrix} 1 \\ 1+i \end{bmatrix} \right\} + c_2 \operatorname{Im} \left\{ e^{(-1+2i)t} \begin{bmatrix} 1 \\ 1+i \end{bmatrix} \right\} \\ &= c_1 e^{-t} \left(\cos 2t \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} - \sin 2t \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \right) + c_2 e^{-t} \left(\cos 2t \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} + \sin 2t \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \right) \end{aligned}$$

Plano de fase contendo diversas trajetórias aparecem na [Figura 4.4](#). As trajetórias são espirais com sentido $V = (1, 1)$ para $-W = (0, -1)$ ou de $W = (0, 1)$ para $V = (1, 1)$, como pode ser visto mais facilmente se reescrevemos a solução geral como

$$X(t) = e^{-t} \left[\cos 2t \left(c_1 \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} + c_2 \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \right) + \sin 2t \left(c_2 \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} - c_1 \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \right) \right].$$

A disposição das trajetórias é típica de um sistema linear $X' = AX$, em que os autovalores de A são complexos com a parte real negativa. Neste caso, dizemos que a origem é um **foco atrator** ou **sumidouro espiral**. Se os autovalores de A fossem complexos com a parte real positiva as trajetórias seriam espirais crescentes percorridas no mesmo sentido que às da [Figura 4.4](#). As trajetórias para o caso em que P é a mesma matriz deste exemplo, mas com autovalores $1 \pm 2i$ está mostrado na [Figura 4.5](#). Neste caso, a origem é um **foco instável** ou **fonte espiral**.

Exemplo 4.10. Considere o seguinte problema de valor inicial

$$X' = \begin{bmatrix} 2 & 1 & 2 \\ 0 & -1 & 1 \\ 0 & -1 & -1 \end{bmatrix} X, \quad X(0) = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

O polinômio característico de $A = \begin{bmatrix} 2 & 1 & 2 \\ 0 & -1 & 1 \\ 0 & -1 & -1 \end{bmatrix}$ é

$$p(t) = \det(A - tI_3) = \det \begin{bmatrix} 2-t & 1 & 2 \\ 0 & -1-t & 1 \\ 0 & -1 & -1-t \end{bmatrix}.$$

Desenvolvendo o determinante em termos da 1ª coluna obtemos que

$$p(t) = (-1)^2(2-t) \det \begin{bmatrix} -1-t & 1 \\ -1 & -1-t \end{bmatrix} = (2-t)[(-1-t)^2 + 1] = (2-t)(t^2 + 2t + 2)$$

cujas raízes são $\lambda_1 = 2$, $\lambda_2 = -1 + i$ e $\lambda_3 = \bar{\lambda}_2 = -1 - i$ que são os autovalores de A .

Os autovetores associados ao autovalor $\lambda_1 = 2$ são os vetores $Z \neq \bar{0}$ que satisfazem $AZ = \lambda_1 Z$, ou seja,

$$(A - \lambda_1 I_3)Z = \bar{0} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} 0 & 1 & 2 \\ 0 & -3 & 1 \\ 0 & -1 & -3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \Leftrightarrow \begin{cases} y + 2z = 0 \\ -3y + z = 0 \\ -y - 3z = 0 \end{cases}$$

cujas matriz aumentada é

$$\left[\begin{array}{ccc|c} 0 & 1 & 2 & 0 \\ 0 & -3 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & -3 & 0 \end{array} \right]$$

$$-\frac{1}{3} \times 2^{\text{a}} \text{ linha} + 3^{\text{a}} \text{ linha} \rightarrow 3^{\text{a}} \text{ linha}$$

$$\left[\begin{array}{ccc|c} 0 & 1 & 2 & 0 \\ 0 & -3 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{10}{3} & 0 \end{array} \right]$$

Assim, a solução geral do sistema que é o conjunto dos autovetores associados a

$\lambda_1 = 2$ acrescentado o vetor nulo é

$$\mathbb{W}_1 = \{(\alpha, 0, 0) \mid \alpha \in \mathbb{C}\}.$$

Portanto, $V = (1, 0, 0)$ é um autovetor associado a $\lambda_1 = 2$.

Os autovetores associados ao autovalor $\lambda_2 = -1 + i$ são os vetores $Z \neq \vec{0}$ que satisfazem $AZ = \lambda_2 Z$, ou seja,

$$(A - \lambda_2 I_3)Z = \vec{0} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} 3-i & 1 & 2 \\ 0 & -i & 1 \\ 0 & -1 & -i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \Leftrightarrow \begin{cases} (3-i)x + y + 2z = 0 \\ -iy + z = 0 \\ -y - iz = 0 \end{cases}$$

cuja matriz aumentada é

$$\left[\begin{array}{ccc|c} 3-i & 1 & 2 & 0 \\ 0 & -i & 1 & 0 \\ 0 & -1 & -i & 0 \end{array} \right]$$

$$i \times 2^{\text{a}} \text{ linha} + 3^{\text{a}} \text{ linha} \longrightarrow 3^{\text{a}} \text{ linha}$$

$$\left[\begin{array}{ccc|c} 3-i & 1 & 2 & 0 \\ 0 & -i & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right]$$

Assim, a solução geral do sistema que é o conjunto dos autovetores associados a $\lambda_2 = -1 + i$ acrescentado o vetor nulo é

$$\mathbb{W}_2 = \left\{ \left(\alpha \frac{-1-2i}{3-i}, \alpha, i\alpha \right) \mid \alpha \in \mathbb{C} \right\} = \left\{ \left(\alpha \left(-\frac{1}{10} - i\frac{7}{10} \right), \alpha, i\alpha \right) \mid \alpha \in \mathbb{C} \right\}.$$

que é o conjunto de todos os autovetores associados a $\lambda_2 = -1 + i$ acrescentado o vetor nulo. Assim, $Z = (-1 - 7i, 10, 10i)$ é um autovetor associado a $\lambda_2 = -1 + i$. Temos também que $\bar{Z} = (-1 + 7i, 10, -10i)$ é um autovetor associado a $\lambda_3 = \bar{\lambda}_2 = -1 - i$.

Assim, a matriz A é diagonalizável em \mathbb{C} e as matrizes

$$P = [V \ Z \ \bar{Z}] = \begin{bmatrix} 1 & -1-7i & -1+7i \\ 0 & 10 & 10 \\ 0 & 10i & -10i \end{bmatrix}$$

e

$$D = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \bar{\lambda}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & -1+i & 0 \\ 0 & 0 & -1-i \end{bmatrix}$$

são tais que

$$A = PDP^{-1}.$$

Portanto, a solução geral real do sistema de equações diferenciais é dada por

$$\begin{aligned} X(t) &= c_1 e^{2t} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + c_2 \operatorname{Re} \left\{ e^{(-1+i)t} \begin{bmatrix} -1-7i \\ 10 \\ 10i \end{bmatrix} \right\} + c_3 \operatorname{Im} \left\{ e^{(-1+i)t} \begin{bmatrix} -1-7i \\ 10 \\ 10i \end{bmatrix} \right\} \\ &= c_1 e^{2t} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + c_2 e^{-t} \left(\cos t \begin{bmatrix} -1 \\ 10 \\ 0 \end{bmatrix} - \operatorname{sen} t \begin{bmatrix} -7 \\ 0 \\ 10 \end{bmatrix} \right) + \\ &\quad + c_3 e^{-t} \left(\cos t \begin{bmatrix} -7 \\ 0 \\ 10 \end{bmatrix} + \operatorname{sen} t \begin{bmatrix} -1 \\ 10 \\ 0 \end{bmatrix} \right) \end{aligned}$$

Substituindo $t = 0$ na solução, ou seja,

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} = X(0) = c_1 \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + c_2 \begin{bmatrix} -1 \\ 10 \\ 0 \end{bmatrix} + c_3 \begin{bmatrix} -7 \\ 0 \\ 10 \end{bmatrix}.$$

que é equivalente ao sistema linear

$$\begin{cases} c_1 - c_2 - 7c_3 = 0 \\ 10c_2 = 1 \\ 10c_3 = 0 \end{cases}$$

Obtemos $c_1 = 1/10$, $c_2 = 1/10$ e $c_3 = 0$. Assim, a solução do problema de valor inicial é

$$X(t) = \frac{1}{10}e^{2t} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{1}{10}e^{-t} \left(\cos t \begin{bmatrix} -1 \\ 10 \\ 0 \end{bmatrix} - \sin t \begin{bmatrix} -7 \\ 0 \\ 10 \end{bmatrix} \right)$$

Exercícios (respostas na página 708)

2.1. Ache a solução geral do sistema de equações dado e desenhe o retrato de fase correspondente:

$$(a) \begin{cases} x_1'(t) = -x_1(t) - 4x_2(t) \\ x_2'(t) = x_1(t) - x_2(t) \end{cases}$$

$$(c) X' = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -3 & -2 \end{bmatrix} X$$

$$(e) X' = \begin{bmatrix} 0 & 2 \\ -2 & 0 \end{bmatrix} X$$

$$(b) \begin{cases} x_1'(t) = x_1(t) - x_2(t) \\ x_2'(t) = 5x_1(t) + 3x_2(t) \end{cases}$$

$$(d) X' = \begin{bmatrix} 5 & 3 \\ -3 & 1 \end{bmatrix} X$$

2.2. Ache a solução geral do sistema de equações dado:

$$(a) \begin{cases} x_1'(t) = ax_1(t) + 2x_2(t) \\ x_2'(t) = -2x_1(t) \end{cases}$$

para $a \neq \pm 4$

$$(c) \begin{cases} x_1'(t) = x_1(t) + x_2(t) \\ x_2'(t) = ax_1(t) + x_2(t) \end{cases} \text{ para } a \neq 0$$

$$(b) \begin{cases} x_1'(t) = ax_2(t) \\ x_2'(t) = -2x_1(t) - 2x_2(t) \end{cases}$$

para $a \neq 1/2$

2.3. Considere o seguinte sistema de equações diferenciais $X' = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} X$.

(a) Encontre a solução geral real do sistema.

(b) Encontre a solução tal que $X(0) = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$.

2.4. Um sistema massa-mola livre sem amortecimento é descrito pela equação diferencial

$$mu'' + ku = 0.$$

(a) Transforme a equação acima em um sistema de equações diferenciais equivalente fazendo

$$x_1(t) = u(t) \quad \text{e} \quad x_2(t) = u'(t).$$

- (b) Resolva o sistema homogêneo do item anterior e obtenha $u(t)$ a solução da equação diferencial $mu'' + ku = 0$.

Comando do pacote GAAL:

`fluxlin(A)` desenha uma amostra das trajetórias que são soluções do sistema de equações diferenciais

$$X'(t) = AX(t).$$

4.3 A Matriz A não é Diagonalizável

4.3.1 Sistema com 2 Equações e 2 Incógnitas

Considere, novamente, um sistema de equações diferenciais lineares

$$\begin{cases} x_1'(t) = ax_1(t) + bx_2(t) \\ x_2'(t) = cx_1(t) + dx_2(t) \end{cases}$$

em que $a, b, c, d \in \mathbb{R}$ com b ou c não nulos. Neste caso a solução de uma equação depende da outra. Podemos escrever este sistema na forma de uma equação diferencial matricial

$$X'(t) = AX(t), \quad (4.34)$$

em que

$$X'(t) = \begin{bmatrix} x_1'(t) \\ x_2'(t) \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad X(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix}.$$

Pode-se mostrar (ver por exemplo [10]) que se uma matriz A , 2×2 , não é diagonalizável, então existem matrizes

$$P = \begin{bmatrix} v_1 & w_1 \\ v_2 & w_2 \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad J = \begin{bmatrix} \lambda & 1 \\ 0 & \lambda \end{bmatrix}$$

tais que

$$A = PJP^{-1}. \quad (4.35)$$

Substituindo-se (4.35) em (4.34) obtemos

$$X'(t) = PJP^{-1}X(t).$$

Multiplicando-se à esquerda por P^{-1} , obtemos

$$P^{-1}X'(t) = JP^{-1}X(t).$$

Fazendo a mudança de variável $Y(t) = P^{-1}X(t)$, obtemos

$$Y'(t) = JY(t),$$

que pode ser escrito na forma

$$\begin{cases} y_1'(t) &= \lambda y_1(t) + y_2(t) \\ y_2'(t) &= \lambda y_2(t) \end{cases}$$

Este sistema foi resolvido no [Exemplo 4.2 na página 611](#) e sua solução é

$$\begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1 e^{\lambda t} + c_2 t e^{\lambda t} \\ c_2 e^{\lambda t} \end{bmatrix}$$

Assim, a solução geral do sistema (4.34) é

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} &= PY(t) = \begin{bmatrix} v_1 & w_1 \\ v_2 & w_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_1 e^{\lambda t} + c_2 t e^{\lambda t} \\ c_2 e^{\lambda t} \end{bmatrix} \\ &= (c_1 e^{\lambda t} + c_2 t e^{\lambda t}) \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} + c_2 e^{\lambda t} \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \end{bmatrix} \\ &= c_1 e^{\lambda t} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} + c_2 e^{\lambda t} \left(\begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \end{bmatrix} + t \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \right), \end{aligned}$$

pois pelo [Teorema 4.3 na página 616](#), para

$$X_1(t) = e^{\lambda t} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix}, \quad X_2(t) = e^{\lambda t} \left(\begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \end{bmatrix} + t \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \right),$$

$$\det \begin{bmatrix} X_1(0) & X_2(0) \end{bmatrix} = \det \begin{bmatrix} v_1 & w_1 \\ v_2 & w_2 \end{bmatrix} = \det(P) \neq 0.$$

4.3.2 Sistema com n Equações e n Incógnitas

Pode-se mostrar (ver por exemplo [10]) que se uma matriz A , $n \times n$, não é diagonalizável, então existem matrizes

$$P = [V_1 \ V_2 \ \dots \ V_n] \text{ e } J = \begin{bmatrix} J_{\lambda_1} & \bar{0} & \dots & \bar{0} \\ \bar{0} & J_{\lambda_2} & \dots & \bar{0} \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ \bar{0} & \dots & \bar{0} & J_{\lambda_k} \end{bmatrix}$$

em que

$$J_{\lambda_j} = \begin{bmatrix} \lambda_j & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \lambda_j & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \lambda_j \end{bmatrix}_{n_j \times n_j},$$

tais que

$$A = PJP^{-1}.$$

Vamos considerar aqui (para o caso geral ver por exemplo [6]) somente o caso em que os blocos J_{λ_j} têm tamanho no máximo 2×2 , com $\lambda_j \in \mathbb{R}$. Ou seja, vamos supor que existam matrizes

$$P = [V_1 \ W_1 \ \dots \ V_k \ W_k \ V_{2k+1} \ \dots \ V_n] \text{ e}$$

$$J = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 1 & & \cdots & & 0 \\ 0 & \lambda_1 & & & & \\ & & \ddots & & & \\ & & & \lambda_k & 1 & \\ \vdots & & & 0 & \lambda_k & \\ & & & & \lambda_{2k+1} & \\ & & & & & \ddots & \\ 0 & \cdots & & & & & 0 & \lambda_n \end{bmatrix},$$

com $\lambda_1, \dots, \lambda_k \in \mathbb{R}$, tais que

$$A = PJP^{-1}. \quad (4.36)$$

A solução geral do sistema $X' = AX$ é

$$\begin{aligned} X(t) &= \begin{bmatrix} V_1 & W_1 & \cdots & V_k & W_k & V_{2k+1} & \cdots & V_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_1 e^{\lambda_1 t} + c_2 t e^{\lambda_1 t} \\ c_2 e^{\lambda_2 t} \\ \vdots \\ c_{2k-1} e^{\lambda_k t} + c_{2k} t e^{\lambda_k t} \\ c_{2k} e^{\lambda_k t} \\ c_{2k+1} e^{\lambda_{2k+1} t} \\ \vdots \\ c_n e^{\lambda_n t} \end{bmatrix} \\ &= c_1 e^{\lambda_1 t} V_1 + c_2 e^{\lambda_1 t} (t V_1 + W_1) + \cdots + c_{2k-1} e^{\lambda_k t} V_k + c_{2k} e^{\lambda_k t} (t V_k + W_k) + \\ &\quad + c_{2k+1} e^{\lambda_{2k+1} t} V_{2k+1} + \cdots + c_n e^{\lambda_n t} V_n \end{aligned}$$

pois pelo [Teorema 4.3 na página 616](#), para

$$X_1(t) = e^{\lambda_1 t} V_1, \quad X_2(t) = e^{\lambda_1 t} (t V_1 + W_1), \quad \dots, \quad X_{2k-1}(t) = e^{\lambda_k t} V_k, \quad X_{2k}(t) = e^{\lambda_k t} (t V_k + W_k),$$

$$X_{2k+1}(t) = e^{\lambda_{2k+1}t} V_{2k+1}, \dots, X_n(t) = e^{\lambda_n t} V_n$$

$$\det [X_1(0) \ \dots \ X_n(0)] = \det(P) \neq 0.$$

4.3.3 Como Encontrar as Matrizes P e J

Vamos, agora, mostrar como determinar matrizes

$$P = [V_1 \ V_2 \ \dots \ V_n] \text{ e } J = \begin{bmatrix} J_{\lambda_1} & \bar{0} & \dots & \bar{0} \\ \bar{0} & J_{\lambda_2} & \dots & \bar{0} \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ \bar{0} & \dots & \bar{0} & J_{\lambda_k} \end{bmatrix}$$

em que

$$J_{\lambda_j} = \begin{bmatrix} \lambda_j & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \lambda_j & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \lambda_j \end{bmatrix}_{n_j \times n_j},$$

tais que

$$A = PJP^{-1}.$$

Vamos considerar aqui (para o caso geral ver por exemplo [10]) somente o caso em que os blocos J_{λ_j} têm tamanho no máximo 2×2 , com $\lambda_j \in \mathbb{R}$. Ou seja, vamos supor que existam matrizes

$$P = [V_1 \ W_1 \ \dots \ V_k \ W_k \ V_{2k+1} \ \dots \ V_n] \text{ e}$$

$$J = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 1 & & \cdots & & 0 \\ 0 & \lambda_1 & & & & \\ & & \ddots & & & \\ & & & \lambda_k & 1 & \\ \vdots & & & 0 & \lambda_k & \vdots \\ & & & & \lambda_{2k+1} & \\ & & & & & \ddots \\ 0 & \cdots & & & & 0 & \lambda_n \end{bmatrix},$$

com $\lambda_1, \dots, \lambda_k \in \mathbb{R}$, tais que

$$A = PJP^{-1}. \quad (4.37)$$

Multiplicando à direita por P ambos os membros da equação anterior, obtemos

$$AP = PJ. \quad (4.38)$$

Por um lado

$$\begin{aligned} AP &= A \begin{bmatrix} V_1 & W_1 & \cdots & V_k & W_k & V_{2k+1} & \cdots & V_n \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} AV_1 & AW_1 & \cdots & AV_k & AW_k & AV_{2k+1} & \cdots & AV_n \end{bmatrix} \end{aligned}$$

e por outro lado

$$PJ = \begin{bmatrix} \lambda_1 V_1 & V_1 + \lambda_1 W_1 & \cdots & \lambda_k V_k & V_k + \lambda_k W_k & \lambda_{2k+1} V_{2k+1} & \cdots & \lambda_n V_n \end{bmatrix}.$$

Assim, (4.38) pode ser reescrita como,

$$\begin{bmatrix} AV_1 & AW_1 & \cdots & AV_k & AW_k & AV_{2k+1} & \cdots & AV_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_1 V_1 & V_1 + \lambda_1 W_1 & \cdots & \lambda_k V_k & V_k + \lambda_k W_k & \lambda_{2k+1} V_{2k+1} & \cdots & \lambda_n V_n \end{bmatrix}$$

Comparando-se coluna a coluna obtemos que

$$AV_j = \lambda_j V_j \quad \text{ou} \quad (A - \lambda_j I_n)V_j = \vec{0} \quad (4.39)$$

$$AW_j = V_j + \lambda_j W_j \quad \text{ou} \quad (A - \lambda_j I_n)W_j = V_j \quad (4.40)$$

para $j = 1, 3, \dots, 2k - 1$.

Portanto,

(a) De (4.39) segue-se que o vetor V_j é um autovetor de A associado ao autovalor λ_j .

(b) De (4.40) segue-se que o vetor W_j é uma solução do sistema linear

$$(A - \lambda_j I_n)X = V_j. \quad (4.41)$$

Exemplo 4.11. Considere o sistema

$$\begin{cases} x_1'(t) = -x_1(t) + x_2(t), \\ x_2'(t) = -x_1(t) - 3x_2(t). \end{cases}$$

A matriz do sistema é

$$A = \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ -1 & -3 \end{bmatrix}.$$

O seu polinômio característico é

$$p(t) = \det(A - tI_2) = (-1 - t)(-3 - t) + 1 = t^2 + 4t + 4$$

que só tem uma raiz $\lambda = -2$.

Os autovetores associados a $\lambda = -2$ são obtidos da solução do sistema linear

$$(A - \lambda I_2)Z = \vec{0},$$

ou seja,

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

ou

$$\begin{cases} x + y = 0 \\ -x - y = 0 \end{cases}$$

cujas soluções gerais são

$$\mathbb{W}_1 = \{(\alpha, -\alpha) \mid \alpha \in \mathbb{R}\} = \{\alpha(1, -1) \mid \alpha \in \mathbb{R}\}.$$

Este é o conjunto de todos os autovetores associados a $\lambda = -2$ acrescentado o vetor nulo. Assim, $V = (1, -1)$ é um autovetor associado a $\lambda = -2$. Precisamos encontrar o vetor W tal que

$$(A - \lambda I_2)W = V.$$

Para isso vamos resolver o sistema linear

$$(A - \lambda I_2)W = V = \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix}$$

ou seja,

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix}$$

ou

$$\begin{cases} x + y = 1 \\ -x - y = -1 \end{cases}$$

cujas soluções gerais são

$$\{(\alpha, 1 - \alpha) \mid \alpha \in \mathbb{R}\}.$$

Tomando $\alpha = 0$, obtemos o vetor $W = (0, 1)$ que é tal que $(A - \lambda I_2)W = V$. Assim, as matrizes

$$P = [V \ W] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad J = \begin{bmatrix} \lambda & 1 \\ 0 & \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2 & 1 \\ 0 & -2 \end{bmatrix}$$

são tais que

$$A = PJP^{-1}.$$

Portanto, a solução geral do sistema é dada por

$$\begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} = c_1 e^{-2t} \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} + c_2 e^{-2t} \left(\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} + t \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} \right).$$

A Figura 4.6 é o plano de fase contendo diversas trajetórias. Para $c_2 = 0$ as trajetórias estão contidas na reta que passa pela origem e tem direção do vetor $V = (1, -1)$, como pode ser visto mais facilmente fazendo a mudança de variáveis $t' = e^{-2t}$ em

$$X(t) = c_1 e^{-2t} \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} = c_1 t' \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix}.$$

As trajetórias se aproximam da origem quando t cresce. Para $c_2 \neq 0$, vamos reescrever a solução geral como

$$X(t) = e^{-2t} \left(c_1 \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} + c_2 \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} + c_2 t \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} \right).$$

Observamos inicialmente que o ponto inicial da trajetória é $c_1 \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} + c_2 \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$ e que a parte que está entre parênteses, $c_1 \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} + c_2 \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} + c_2 t \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix}$, representa uma reta que passa por $c_1 \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} + c_2 \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$ e tem direção de $V = (1, -1)$.

A reta que passa pela origem e tem direção de $V = (1, -1)$ divide o plano em dois semiplanos. Se o ponto inicial está do mesmo lado de $W = (0, 1)$, então $c_2 > 0$ e o ponto $X(t)$ se move com o seu comprimento sendo reduzido do fator e^{-2t} , sendo

puxado no sentido de $V = (1, -1)$, quando t cresce. Se o ponto inicial está do lado oposto ao de $W = (0, 1)$, então $c_2 < 0$ e o ponto $X(t)$ se move com o seu comprimento sendo reduzido do fator e^{-2t} , sendo puxado no sentido de $-V = (-1, 1)$, quando t cresce.

A disposição das trajetórias é típica de um sistema linear $X' = AX$, em que a matriz A não é diagonalizável e o único autovalor é negativo. Neste caso, dizemos que a origem é um **nó impróprio assintoticamente estável**.

Se neste exemplo, o único autovalor de A , λ , fosse positivo as trajetórias seriam desenhadas da seguinte forma. Se o ponto inicial está do mesmo lado de $W = (0, 1)$, então $c_2 > 0$ e o ponto $X(t)$ se move com o seu comprimento sendo aumentado do fator $e^{\lambda t}$, sendo puxado no sentido de $V = (1, -1)$, quando t cresce. Se o ponto inicial está do lado oposto ao de $W = (0, 1)$, então $c_2 < 0$ e o ponto $X(t)$ se move com o seu comprimento sendo aumentado do fator $e^{\lambda t}$, sendo puxado no sentido de $-V = (-1, 1)$, quando t cresce. As trajetórias para o caso em que P é a mesma matriz deste exemplo, mas $\lambda = 2$ está mostrado na [Figura 4.7](#). Neste caso, dizemos que a origem é um **nó impróprio instável**.

Exemplo 4.12. Considere o seguinte sistema de equações diferenciais

$$X' = \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 0 & 3 & 1 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} X.$$

Este sistema pode ser escrito como $X' = AX$, em que $A = \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 0 & 3 & 1 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}$. O polinômio característico de A é

$$p(t) = \det(A - tI_3) = \det \begin{bmatrix} 2-t & 1 & 1 \\ 0 & 3-t & 1 \\ 0 & -1 & 1-t \end{bmatrix}.$$

Desenvolvendo o determinante em termos da 1ª coluna obtemos que

$$p(t) = (-1)^{(1+1)}(2-t) \det \begin{bmatrix} 3-t & 1 \\ -1 & 1-t \end{bmatrix} = (2-t)[(3-t)(1-t)+1] = (2-t)(t^2-4t+4) = -(t-2)^3$$

cujas únicas raízes são $\lambda_1 = 2$ que é o autovalor de A .

Os autovetores associados ao autovalor $\lambda_1 = 2$ são os vetores $Z \neq \vec{0}$ que satisfazem $AZ = \lambda_1 Z$, ou seja,

$$(A - \lambda_1 I_3)Z = \vec{0} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \Leftrightarrow \begin{cases} y + z = 0 \\ y + z = 0 \\ -y - z = 0 \end{cases}$$

Assim, a solução geral do sistema que é o conjunto dos autovetores associados a $\lambda_1 = 2$ acrescentado o vetor nulo é

$$\mathbb{W}_1 = \{(\beta, \alpha, -\alpha) = \alpha(0, 1, -1) + \beta(1, 0, 0) \mid \alpha, \beta \in \mathbb{R}\}.$$

Portanto, $V_1 = (0, 1, -1)$ e $V_2 = (1, 0, 0)$ são autovetores linearmente independentes associados a $\lambda_1 = 2$.

Precisamos encontrar o vetor W tal que

$$(A - \lambda_1 I_3)W = V,$$

em que V é um autovetor de A associado a $\lambda_1 = 2$, ou seja, $V = (\beta, \alpha, -\alpha)$. Assim,

$$(A - \lambda_1 I_3)X = \begin{bmatrix} \beta \\ \alpha \\ -\alpha \end{bmatrix} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \beta \\ \alpha \\ -\alpha \end{bmatrix} \Leftrightarrow \begin{cases} y + z = \beta \\ y + z = \alpha \\ -y - z = -\alpha \end{cases}$$

Este sistema tem solução somente se $\alpha = \beta$. Tomando $\alpha = \beta = 1$ obtemos $V_3 = (1, 1, -1)$ e vamos resolver o sistema

$$(A - \lambda_1 I_3)W = V_3 = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ -1 \end{bmatrix}$$

ou

$$\begin{cases} y + z = 1 \\ y + z = 1 \\ -y - z = -1 \end{cases}$$

cuja solução geral é

$$\{(\gamma, 1 - \delta, \delta) \mid \delta, \gamma \in \mathbb{R}\}$$

Tomando $\delta = \gamma = 0$ obtemos $W = (0, 1, 0)$.

Como V_3, W e V_2 são LI, a matriz $P = [V_3 \ W \ V_2] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ tem inversa e

é tal que

$$A = PJP^{-1},$$

em que $J = \begin{bmatrix} 2 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix}$. Aqui poderíamos ter escolhido no lugar de $V_2 = (1, 0, 0)$

qualquer combinação linear de $V_1 = (0, 1, -1)$ e $V_2 = (1, 0, 0)$ desde que não seja um múltiplo escalar de $V_3 = (1, 1, 0)$ (Veja por que no Exercício 3.4).

Portanto, a solução geral do sistema é

$$\begin{aligned} X(t) &= c_1 e^{2t} V_3 + c_2 e^{2t} (W + t V_3) + c_3 e^{2t} V_2 \\ &= c_1 e^{2t} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ -1 \end{bmatrix} + c_2 e^{2t} \left(\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} + t \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ -1 \end{bmatrix} \right) + c_3 e^{2t} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Exercícios (respostas na página 718)

3.1. Ache a solução geral do sistema de equações dado e desenhe o seu retrato de fase:

$$(a) \begin{cases} x_1'(t) = 3x_1(t) - 4x_2(t) \\ x_2'(t) = x_1(t) - x_2(t) \end{cases}$$

$$(b) \begin{cases} x_1'(t) = 4x_1(t) - 2x_2(t) \\ x_2'(t) = 8x_1(t) - 4x_2(t) \end{cases}$$

3.2. Ache a solução geral do sistema de equações dado:

$$(a) \begin{cases} x_1'(t) = ax_1(t) + 2x_2(t) \\ x_2'(t) = -2x_1(t) \end{cases}$$

$$(b) \begin{cases} x_1'(t) = & ax_2(t) \\ x_2'(t) = -2x_1(t) - 2x_2(t) \end{cases}$$

3.3. Considere o seguinte sistema de equações diferenciais $X' = \begin{bmatrix} 3 & 1 & 2 \\ -1 & 3 & 0 \\ 1 & -1 & 2 \end{bmatrix} X$.

(a) Encontre a solução geral do sistema.

(b) Encontre a solução tal que $X(0) = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$.

3.4. Mostre que se V e V_3 são autovetores linearmente independentes de uma matriz A , $n \times n$ e $W \in \mathbb{R}^n$ é tal que $(A - \lambda I_n)W = V_3$, então $\{V, V_3, W\}$ é um conjunto linearmente independente.

Comando do pacote GAAL:

`fluxlin(A)` desenha uma amostra das trajetórias que são soluções do sistema de equações diferenciais

$$X'(t) = AX(t).$$

4.4 Sistemas Não-Homogêneos (opcional)

Considere, agora, o sistema de equações diferenciais lineares

$$\begin{cases} x_1'(t) = a_{11}x_1(t) + \cdots + a_{1n}x_n(t) + f_1(t) \\ \vdots \\ x_n'(t) = a_{n1}x_1(t) + \cdots + a_{nn}x_n(t) + f_n(t) \end{cases}$$

que pode ser escrito na forma de uma equação diferencial matricial

$$\begin{bmatrix} x_1'(t) \\ \vdots \\ x_n'(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ \vdots \\ x_n(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f_1(t) \\ \vdots \\ f_n(t) \end{bmatrix}$$

ou

$$X'(t) = AX(t) + F(t), \quad (4.42)$$

em que

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix}, \quad X(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ \vdots \\ x_n(t) \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad F(t) = \begin{bmatrix} f_1(t) \\ \vdots \\ f_n(t) \end{bmatrix}.$$

Teorema 4.7. *Seja $X_p(t)$ uma solução particular do sistema não homogêneo (4.42). Sejam $X_1(t), \dots, X_n(t)$ soluções do sistema homogêneo correspondente tais que $X_1(0), \dots, X_n(0)$ são LI. Então, a solução geral do sistema não homogêneo (4.42) é*

$$X(t) = X_p(t) + c_1X_1(t) + \cdots + c_nX_n(t)$$

Demonstração. Sejam $X(t)$ uma solução qualquer e $X_p(t)$ uma solução particular de (4.42), então $Y(t) = X(t) - X_p(t)$ é solução do sistema homogêneo associado $X' = AX$, pois

$$Y'(t) = X'(t) - X_p'(t) = (AX(t) + F(t)) - (AX_p(t) + F(t)) = A(X(t) - X_p(t)) = AY(t).$$

Assim, se $X_1(t), \dots, X_n(t)$ soluções do sistema homogêneo correspondente tais que $X_1(0), \dots, X_n(0)$ são LI, pelo Teorema 4.3 na página 616, existem constantes c_1, \dots, c_n tais que

$$Y(t) = X(t) - X_p(t) = c_1 X_1(t) + \dots + c_n X_n(t),$$

ou seja,

$$X(t) = X_p(t) + c_1 X_1(t) + \dots + c_n X_n(t).$$

■

Portanto, para encontrar a solução geral de um sistema de equações lineares não homogêneo precisamos encontrar uma solução particular e a solução geral do sistema homogêneo correspondente.

4.4.1 A Matriz A é Diagonalizável em \mathbb{R}

Como no caso do sistema homogêneo em que a matriz A é diagonalizável em \mathbb{R} , existem matrizes

$$P = \begin{bmatrix} V_1 & V_2 & \dots & V_n \end{bmatrix} \text{ e } D = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & \dots & 0 \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & \lambda_n \end{bmatrix},$$

em que V_j é a coluna j de P , com $\lambda_1, \dots, \lambda_n \in \mathbb{R}$, tais que

$$A = PDP^{-1}. \quad (4.43)$$

Substituindo-se (4.43) em (4.42) obtemos

$$X'(t) = PDP^{-1}X(t) + F(t).$$

Multiplicando-se à esquerda por P^{-1} , obtemos

$$P^{-1}X'(t) = DP^{-1}X(t) + P^{-1}F(t).$$

Fazendo a mudança de variável $Y(t) = P^{-1}X(t)$, obtemos

$$Y'(t) = DY(t) + P^{-1}F(t),$$

que pode ser escrita na forma de um sistema de equações desacopladas

$$\begin{cases} y_1'(t) &= \lambda_1 y_1(t) + g_1(t) \\ \vdots & \vdots \\ y_n'(t) &= \lambda_n y_n(t) + g_n(t) \end{cases}$$

em que

$$\begin{bmatrix} g_1(t) \\ \vdots \\ g_n(t) \end{bmatrix} = G(t) = P^{-1}F(t).$$

As equações podem ser resolvidas independentemente, encontramos soluções particulares de cada uma delas $y_{1p}(t), \dots, y_{np}(t)$ e formamos o vetor

$$Y_p(t) = \begin{bmatrix} y_{1p}(t) \\ \vdots \\ y_{np}(t) \end{bmatrix}$$

Uma solução particular do sistema inicial é então

$$X_p(t) = PY_p(t)$$

e pelo [Teorema 4.7](#) a solução geral é a soma da solução geral do sistema homogêneo com $X_p(t)$, ou seja,

$$X(t) = X_p(t) + c_1 e^{\lambda_1 t} V_1 + \cdots + c_n e^{\lambda_n t} V_n.$$

Exemplo 4.13. Considere o sistema

$$\begin{cases} x_1'(t) &= x_1(t) - x_2(t) + 2e^{-t} \\ x_2'(t) &= -4x_1(t) + x_2(t) + 4e^t \end{cases}$$

Este sistema pode ser escrito na forma matricial como

$$X'(t) = AX(t) + F(t),$$

em que

$$X'(t) = \begin{bmatrix} x_1'(t) \\ x_2'(t) \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -4 & 1 \end{bmatrix}, \quad X(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad F(t) = \begin{bmatrix} 2e^{-t} \\ 4e^t \end{bmatrix}.$$

A matriz A é a mesma do [Exemplo 4.5 na página 629](#), é diagonalizável e as matrizes

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -2 & 2 \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad D = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$$

são tais que

$$A = PDP^{-1}.$$

Fazendo a mudança de variável $Y(t) = P^{-1}X(t)$, a equação $X'(t) = AX(t) + F(t)$ se transforma em

$$Y'(t) = DY(t) + P^{-1}F(t),$$

que pode ser escrita na forma do sistema desacoplado

$$\begin{cases} y_1'(t) = 3y_1(t) + g_1(t) \end{cases} \quad (4.44)$$

$$\begin{cases} y_2'(t) = -y_2(t) + g_2(t) \end{cases} \quad (4.45)$$

em que

$$\begin{bmatrix} g_1(t) \\ g_2(t) \end{bmatrix} = P^{-1}F(t) = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -2 & 2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 2e^{-t} \\ 4e^t \end{bmatrix} = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 2 & -1 \\ 2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 2e^{-t} \\ 4e^t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{-t} - e^t \\ e^{-t} + e^t \end{bmatrix}$$

Para resolver a equação (4.44), ou seja,

$$y_1' - 3y_1 = e^{-t} - e^t$$

multiplicamos a equação pelo fator integrante $\mu(t) = e^{-3t}$ obtendo

$$\frac{d}{dt} (e^{-3t} y_1) = e^{-4t} - e^{-2t}.$$

Integrando-se:

$$e^{-3t} y_1(t) = -\frac{1}{4} e^{-4t} + \frac{1}{2} e^{-2t} + c_1.$$

Explicitando-se $y_1(t)$:

$$y_1(t) = -\frac{1}{4} e^{-t} + \frac{1}{2} e^t + c_1 e^{3t}$$

Uma solução particular da equação $y_1' - 3y_1 = e^{-t} - e^t$ é então

$$y_{1p}(t) = -\frac{1}{4} e^{-t} + \frac{1}{2} e^t.$$

Para resolver a equação (4.45), ou seja,

$$y_2' + y_2 = e^{-t} + e^t$$

multiplicamos a equação pelo fator integrante $\mu(t) = e^t$ obtendo

$$\frac{d}{dt} (e^t y_2) = 1 + e^{2t}.$$

Integrando-se:

$$e^t y_2(t) = t + \frac{1}{2} e^{2t} + c_2.$$

Explicitando-se $y_2(t)$:

$$y_2(t) = te^{-t} + \frac{1}{2} e^t + c_2 e^{-t}.$$

Uma solução particular da equação $y_2' + y_2 = e^{-t} + e^t$ é então

$$y_{2p}(t) = te^{-t} + \frac{1}{2} e^t.$$

Uma solução particular do sistema não homogêneo é então

$$X_p(t) = P Y_p(t) = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -2 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\frac{1}{4} e^{-t} + \frac{1}{2} e^t \\ te^{-t} + \frac{1}{2} e^t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{4} e^{-t} + e^t + te^{-t} \\ \frac{1}{2} e^{-t} + 2te^{-t} \end{bmatrix}.$$

Assim, pelo Teorema 4.7 na página 672 a solução geral do sistema é

$$\begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{4} e^{-t} + e^t + te^{-t} \\ \frac{1}{2} e^{-t} + 2te^{-t} \end{bmatrix} + c_1 e^{3t} \begin{bmatrix} 1 \\ -2 \end{bmatrix} + c_2 e^{-t} \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \end{bmatrix}$$

4.4.2 A Matriz A é Diagonalizável em \mathbb{C}

Vamos considerar o caso 2×2 , por que a notação fica mais simples. Entretanto a ideia se estende facilmente para o caso geral. Como no caso dos sistemas homogêneos, em que a matriz A é diagonalizável em \mathbb{C} , existem matrizes

$$P = \begin{bmatrix} v_1 + iw_1 & v_1 - iw_1 \\ v_2 + iw_2 & v_2 - iw_2 \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad D = \begin{bmatrix} \alpha + i\beta & 0 \\ 0 & \alpha - i\beta \end{bmatrix},$$

tais que

$$A = PDP^{-1}. \quad (4.46)$$

Substituindo-se (4.46) em (4.42) obtemos

$$X'(t) = PDP^{-1}X(t) + F(t).$$

Multiplicando-se à esquerda por P^{-1} , obtemos

$$P^{-1}X'(t) = DP^{-1}X(t) + P^{-1}F(t).$$

Fazendo a mudança de variável $Y(t) = P^{-1}X(t)$, obtemos a equação matricial

$$Y'(t) = DY(t) + P^{-1}F(t),$$

que pode ser escrita na forma do sistema

$$\begin{cases} y_1'(t) &= (\alpha + i\beta) y_1(t) &+ \frac{g_1(t)}{g_1(t)} \\ y_2'(t) &= (\alpha - i\beta) y_2(t) &+ \frac{g_2(t)}{g_2(t)} \end{cases}$$

A segunda equação é conjugada da primeira, logo a solução da segunda equação é o conjugado da solução da primeira equação. Assim, se $y_{1p}(t)$ é uma solução particular da primeira equação, então $y_{2p}(t) = \overline{y_{1p}(t)}$ é uma solução particular da segunda equação. Logo, uma solução particular complexa do sistema é

$$X_p(t) = PY_p(t) = P \begin{bmatrix} y_{1p}(t) \\ y_{1p}(t) \end{bmatrix}.$$

Como $P = \begin{bmatrix} V + iW & V - iW \end{bmatrix}$, então uma solução particular do sistema é dada por

$$\begin{aligned} X_p(t) &= \begin{bmatrix} V + iW & V - iW \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{y_{1p}(t)}{y_{1p}(t)} \end{bmatrix} = \\ &= y_{1p}(t)(V + iW) + \overline{y_{1p}(t)}(V - iW) \\ &= 2\operatorname{Re}\{y_{1p}(t)(V + iW)\} \end{aligned}$$

que é real. Assim, pelo [Teorema 4.7 na página 672](#) a solução geral (real) é a soma da solução geral (real) do sistema homogêneo com $X_p(t)$, ou seja,

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} &= c_1 \operatorname{Re}\{e^{(\alpha+i\beta)t}(V + iW)\} + c_2 \operatorname{Im}\{e^{(\alpha+i\beta)t}(V + iW)\} + 2\operatorname{Re}\{y_{1p}(t)(V + iW)\} \\ &= c_1 e^{\alpha t} \left(\cos \beta t \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} - \operatorname{sen} \beta t \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \end{bmatrix} \right) + c_2 e^{\alpha t} \left(\cos \beta t \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \end{bmatrix} + \operatorname{sen} \beta t \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \right) \\ &\quad + 2\operatorname{Re}\{y_{1p}(t)(V + iW)\}. \end{aligned}$$

Exemplo 4.14. Considere o sistema

$$\begin{cases} x_1'(t) = -3x_1(t) + 2x_2(t) \\ x_2'(t) = -4x_1(t) + x_2(t) + 2\operatorname{sen} t \end{cases}$$

Este sistema pode ser escrito na forma matricial como

$$X'(t) = AX(t) + F(t),$$

em que

$$X'(t) = \begin{bmatrix} x_1'(t) \\ x_2'(t) \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} -3 & 2 \\ -4 & 1 \end{bmatrix}, \quad X(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad F(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ 2\operatorname{sen} t \end{bmatrix}.$$

A matriz A é a mesma do [Exemplo 4.9 na página 651](#), é diagonalizável em \mathbb{C} e as matrizes

$$P = [Z \bar{Z}] = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1+i & 1-i \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad D = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \bar{\lambda}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1+2i & 0 \\ 0 & -1-2i \end{bmatrix}$$

são tais que

$$A = PDP^{-1}.$$

Fazendo a mudança de variável $Y(t) = P^{-1}X(t)$, a equação $X'(t) = AX(t) + F(t)$ se transforma em

$$Y'(t) = DY(t) + P^{-1}F(t),$$

que pode ser escrita na forma do sistema

$$\begin{cases} y_1'(t) = (-1+2i)y_1(t) + g_1(t) \end{cases} \quad (4.47)$$

$$\begin{cases} y_2'(t) = (-1-2i)y_2(t) + g_2(t) \end{cases} \quad (4.48)$$

em que

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} g_1(t) \\ g_2(t) \end{bmatrix} &= P^{-1}F(t) = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1+i & 1-i \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 2\sin t \end{bmatrix} \\ &= -\frac{1}{2i} \begin{bmatrix} 1-i & -1 \\ -1-i & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 2\sin t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -i\sin t \\ i\sin t \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Para resolver a equação (4.47), ou seja, $y_1'(t) + (1-2i)y_1(t) = -i\sin t$, multiplicamos a equação pelo fator integrante $\mu(t) = e^{(1-2i)t}$ obtendo

$$\frac{d}{dt}(e^{(1-2i)t}y_1) = -i\sin te^{(1-2i)t}.$$

Observe que $-i\sin t = -\frac{1}{2}(e^{it} - e^{-it})$, pois pela fórmula de Euler

$$\begin{aligned} e^{it} &= \cos t + i\sin t \\ e^{-it} &= \cos t - i\sin t. \end{aligned}$$

Logo, a equação diferencial anterior pode ser reescrita como

$$\frac{d}{dt}(e^{(1-2i)t}y_1) = -\frac{1}{2}(e^{(1-i)t} - e^{(1-3i)t})$$

Integrando-se obtemos

$$e^{(1-2i)t}y_1(t) = -\frac{1}{2-2i}e^{(1-i)t} + \frac{1}{2-6i}e^{(1-3i)t} + C_1.$$

Explicitando-se $y_1(t)$:

$$y_1(t) = y_{1p}(t) + C_1 e^{(-1+2i)t},$$

em que

$$y_{1p}(t) = -\frac{1}{2-2i}e^{it} + \frac{1}{2-6i}e^{-it}.$$

Logo,

$$X_p(t) = 2\operatorname{Re}\{y_{1p}(t) \begin{bmatrix} 1 \\ (1+i) \end{bmatrix}\} = \begin{bmatrix} 2\operatorname{Re}\{y_{1p}(t)\} \\ 2\operatorname{Re}\{(1+i)y_{1p}(t)\} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{2}{5}\cos t + \frac{4}{5}\operatorname{sen} t \\ -\frac{1}{5}\cos t + \frac{7}{5}\operatorname{sen} t \end{bmatrix}$$

é uma solução particular real do sistema não homogêneo. Então, pelo [Teorema 4.7 na página 672](#), a solução geral real do sistema é a soma da solução geral real do sistema homogêneo com uma solução particular, ou seja,

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} &= X_p(t) + c_1 \operatorname{Re} \left\{ e^{(-1+2i)t} \begin{bmatrix} 1 \\ 1+i \end{bmatrix} \right\} + c_2 \operatorname{Im} \left\{ e^{(-1+2i)t} \begin{bmatrix} 1 \\ 1+i \end{bmatrix} \right\} \\ &= \begin{bmatrix} -\frac{2}{5}\cos t + \frac{4}{5}\operatorname{sen} t \\ -\frac{1}{5}\cos t + \frac{7}{5}\operatorname{sen} t \end{bmatrix} + \\ &\quad c_1 e^{-t} \left(\cos 2t \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} - \operatorname{sen} 2t \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \right) + c_2 e^{-t} \left(\cos 2t \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} + \operatorname{sen} 2t \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \right) \end{aligned}$$

4.4.3 A Matriz A não é Diagonalizável

Vamos considerar o caso 2×2 , mas a ideia se estende facilmente para o caso geral. Como no caso dos sistemas homogêneos, em que a matriz A não é diagonalizável, existem matrizes

$$P = \begin{bmatrix} v_1 & w_1 \\ v_2 & w_2 \end{bmatrix} \text{ e } J = \begin{bmatrix} \lambda & 1 \\ 0 & \lambda \end{bmatrix}$$

tais que

$$A = PJP^{-1}. \quad (4.49)$$

Substituindo-se (4.49) em (4.42) obtemos

$$X'(t) = PJP^{-1}X(t) + F(t).$$

Multiplicando-se à esquerda por P^{-1} , obtemos

$$P^{-1}X'(t) = JP^{-1}X(t) + P^{-1}F(t).$$

Fazendo a mudança de variável $Y(t) = P^{-1}X(t)$, obtemos

$$Y'(t) = JY(t) + P^{-1}F(t),$$

que pode ser escrito na forma

$$\begin{cases} y_1'(t) &= \lambda y_1(t) + y_2(t) + g_1(t) \\ y_2'(t) &= \lambda y_2(t) + g_2(t) \end{cases}$$

A segunda equação pode ser resolvida independentemente da primeira, obtendo-se uma solução particular $y_{2p}(t)$. Substituindo-se $y_{2p}(t)$ na primeira equação ela pode ser resolvida encontrando-se uma solução particular $y_{1p}(t)$. Uma solução particular do sistema inicial é então

$$X_p(t) = PY_p(t) = P \begin{bmatrix} y_{1p}(t) \\ y_{2p}(t) \end{bmatrix}.$$

pelo Teorema 4.7 na página 672 a solução geral é a soma da solução geral do sistema homogêneo com $X_p(t)$, ou seja,

$$X(t) = X_p(t) + c_1 e^{\lambda t} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} + c_2 e^{\lambda t} \left(\begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \end{bmatrix} + t \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \right).$$

Exemplo 4.15. Considere o sistema

$$\begin{cases} x_1'(t) &= -x_1(t) + x_2(t) + t \\ x_2'(t) &= -x_1(t) - 3x_2(t) \end{cases}$$

Este sistema pode ser escrito na forma matricial como

$$X'(t) = AX(t) + F(t),$$

em que

$$X'(t) = \begin{bmatrix} x_1'(t) \\ x_2'(t) \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ -1 & -3 \end{bmatrix}, \quad X(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad F(t) = \begin{bmatrix} t \\ 0 \end{bmatrix}.$$

A matriz A é a mesma do Exemplo 4.11 na página 665, não é diagonalizável e as matrizes

$$P = [V \ W] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad J = \begin{bmatrix} \lambda & 1 \\ 0 & \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2 & 1 \\ 0 & -2 \end{bmatrix}$$

são tais que

$$A = PJP^{-1}.$$

Fazendo a mudança de variável $Y(t) = P^{-1}X(t)$, a equação $X'(t) = AX(t) + F(t)$ se transforma em

$$Y'(t) = DY(t) + P^{-1}F(t),$$

que pode ser escrita na forma do sistema

$$\begin{cases} y_1'(t) = -2y_1(t) + y_2(t) + g_1(t) \end{cases} \quad (4.50)$$

$$\begin{cases} y_2'(t) = -2y_2(t) + g_2(t) \end{cases} \quad (4.51)$$

em que

$$\begin{bmatrix} g_1(t) \\ g_2(t) \end{bmatrix} = P^{-1}F(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} t \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t \\ t \end{bmatrix}$$

Temos que resolver em primeiro lugar a equação (4.51), ou seja,

$$y_2' + 2y_2 = t.$$

Para isso multiplicamos a equação pelo fator integrante $\mu(t) = e^{2t}$ obtendo

$$\frac{d}{dt} (e^{2t}y_2) = te^{2t}.$$

Integrando-se:

$$e^{2t}y_2(t) = \frac{t}{2}e^{2t} - \frac{1}{4}e^{2t} + c_2.$$

Explicitando-se $y_2(t)$:

$$y_2(t) = \frac{t}{2} - \frac{1}{4} + c_2e^{-2t}.$$

Logo,

$$y_{2p}(t) = \frac{t}{2} - \frac{1}{4}$$

é uma solução particular da segunda equação.

Para resolver a equação (4.50), ou seja,

$$y_1' + 2y_1 = \frac{3t}{2} - \frac{1}{4}$$

multiplicamos a equação pelo fator integrante $\mu(t) = e^{2t}$ obtendo

$$\frac{d}{dt} (e^{2t} y_1) = \frac{3t}{2} e^{2t} - \frac{1}{4} e^{2t}.$$

Integrando-se:

$$e^{2t} y_1(t) = \frac{3t}{4} e^{2t} - \frac{1}{2} e^{2t} + c_1.$$

Explicitando-se $y_1(t)$:

$$y_1(t) = \frac{3t}{4} - \frac{1}{2} + c_1 e^{-2t}.$$

Logo,

$$y_{1p}(t) = \frac{3t}{4} - \frac{1}{2}$$

é uma solução particular da primeira equação. Assim,

$$X_p(t) = P Y_p(t) = P \begin{bmatrix} y_{1p}(t) \\ y_{2p}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{3t}{4} - \frac{1}{2} \\ \frac{t}{2} - \frac{1}{4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{3t}{4} - \frac{1}{2} \\ \frac{t}{2} - \frac{1}{4} \end{bmatrix}$$

Portanto, pelo [Teorema 4.7 na página 672](#), a solução geral do sistema é a soma da solução geral do sistema homogêneo com uma solução particular, ou seja,

$$\begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{3t}{4} - \frac{1}{2} \\ \frac{t}{2} - \frac{1}{4} \end{bmatrix} + c_1 e^{-2t} \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} + c_2 e^{-2t} \left(\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} + t \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} \right).$$

4.4.4 Demonstração do Teorema de Existência e Unicidade

Demonstração do Teorema 4.1 na página 613.

(a) Existência:

Defina a sequência $X^{(k)}(t)$ por

$$X^{(0)}(t) = X^{(0)}, \quad X^{(k)}(t) = X^{(0)} + \int_{t_0}^t (A(s)X^{(k-1)}(s) + F(s))ds, \quad \text{para } k = 1, 2, \dots$$

Assim, cada componente $X^{(k)}(t)$ é dada por

$$x_i^{(k)} = x_i^{(0)} + \int_{t_0}^t \left(\sum_{j=1}^n a_{ij}(s)x_j^{(k-1)}(s) + f_i(s) \right) ds.$$

Sejam $M, N > 0$ tais que

$$|a_{ij}(t)| \leq M, \quad \text{para } i, j = 1, \dots, n \text{ e } t \in I \quad (4.52)$$

$$|x_i^{(1)}(t) - x_i^{(0)}| \leq N, \quad \text{para } i = 1, \dots, n \text{ e } t \in I$$

Então,

$$\begin{aligned} |x_i^{(2)}(t) - x_i^{(1)}(t)| &\leq \int_{t_0}^t \sum_{j=1}^n |a_{ij}(s)| |x_j^{(1)}(s) - x_j^{(0)}| ds \\ &\leq M \int_{t_0}^t \sum_{j=1}^n |x_j^{(1)}(s) - x_j^{(0)}| ds \leq nMN(t - t_0) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
|x_i^{(3)}(t) - x_i^{(2)}(t)| &\leq \int_{t_0}^t \sum_{j=1}^n |a_{ij}(s)| |x_j^{(2)}(s) - x_j^{(1)}(s)| ds \\
&\leq M \int_{t_0}^t \sum_{j=1}^n |x_j^{(2)}(s) - x_j^{(1)}(s)| ds \leq nM^2N \sum_{j=1}^n \int_{t_0}^t |s - t_0| ds \\
&\leq n^2M^2N \frac{|t - t_0|^2}{2}
\end{aligned}$$

Por indução

$$\begin{aligned}
|x_i^{(k+1)}(t) - x_i^{(k)}(t)| &\leq \int_{t_0}^t \sum_{j=1}^n |a_{ij}(s)| |x_j^{(k)}(s) - x_j^{(k-1)}(s)| ds \\
&\leq M \int_{t_0}^t \sum_{j=1}^n |x_j^{(k)}(s) - x_j^{(k-1)}(s)| ds \leq M \sum_{j=1}^n \int_{t_0}^t n^{k-1} M^{k-1} N \frac{|s - t_0|^{k-1}}{(k-1)!} ds \\
&\leq n^k M^k N \frac{|t - t_0|^k}{k!}
\end{aligned}$$

Usando o mesmo argumento usado na demonstração do [Teorema 1.1 na página 154](#) temos que $x_i^{(k)}(t)$ é uma sequência convergente. Seja

$$x_i(t) = \lim_{k \rightarrow \infty} x_i^{(k)}(t).$$

Também pelo mesmo argumento usado na demonstração do [Teorema 1.1 na página 154](#) temos que $x_i(t)$ é contínua e vale

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \int_{t_0}^t \left(\sum_{j=1}^n a_{ij}(s) x_j^{(k-1)}(s) + f_i(s) \right) ds = \int_{t_0}^t \left(\sum_{j=1}^n a_{ij}(s) x_j(s) + f_i(s) \right) ds.$$

Assim,

$$\begin{aligned}
 x_i(t) &= \lim_{k \rightarrow \infty} x_i^{(k)}(t) = x_i^{(0)} + \lim_{k \rightarrow \infty} \int_{t_0}^t \left(\sum_{j=1}^n a_{ij}(s) x_j^{(k-1)}(s) + f_i(s) \right) ds = \\
 &= x_i^{(0)} + \int_{t_0}^t \left(\sum_{j=1}^n a_{ij}(s) \lim_{k \rightarrow \infty} x_j^{(k-1)}(s) + f_i(s) \right) ds = \\
 &= x_i^{(0)} + \int_{t_0}^t \left(\sum_{j=1}^n a_{ij}(s) x_j(s) + f_i(s) \right) ds
 \end{aligned}$$

Derivando em relação a t esta equação vemos que $x_i(t)$ é solução do problema de valor inicial.

(b) Unicidade:

Sejam $X(t)$ e $Y(t)$ duas soluções do problema de valor inicial (4.2). Então,

$$Z(t) = X(t) - Y(t)$$

é solução do problema de valor inicial (4.2) com $X^{(0)} = 0$ e $F(t) = 0$. Assim, temos que mostrar que $Z(t) = 0$, para todo t .

Seja $u(t) = \int_{t_0}^t (|z_1(s)| + \cdots + |z_n(s)|) ds$. Como

$$z_1(t) = \int_{t_0}^t z_1'(s) ds, \dots, z_n(t) = \int_{t_0}^t z_n'(s) ds,$$

então por (4.52) temos

$$\begin{aligned} |z_1(t)| + \cdots + |z_n(t)| &\leq \int_0^t (|z'_1(s)| + \cdots + |z'_n(s)|) ds \\ &\leq \int_0^t \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n |a_{ij}(s)| |z_j(s)| ds \\ &\leq nM \int_0^t (|z_1(s)| + \cdots + |z_n(s)|) ds = nMu(t), \end{aligned}$$

para $t \in I$, ou seja,

$$u'(t) \leq nMu(t).$$

Multiplicando a inequação acima por e^{-nMt} obtemos

$$\frac{d}{dt}(e^{-nMt}u(t)) \leq 0, \quad \text{com } u(t_0) = 0.$$

Isto implica que $u(t) = 0$, para todo t (verifique!) e portanto $Z(t) = 0$, para $t \in I$. ■

Como consequência do resultado que acabamos de provar temos o resultado abaixo para existência e unicidade de soluções de equações lineares de 2ª ordem.

Demonstração do Teorema 2.1 na página 274. Sejam $x_1(t) = y(t)$ e $x_2(t) = y'(t)$. O problema de valor inicial é equivalente ao problema

$$\begin{cases} X'(t) &= A(t)X(t) + F(t) \\ X(t_0) &= X^{(0)} \end{cases}$$

em que

$$A(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -q(t) & -p(t) \end{bmatrix}, \quad X(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix}, \quad F(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ f(t) \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad X^{(0)} = \begin{bmatrix} y_0 \\ y'_0 \end{bmatrix}$$

A conclusão segue-se da aplicação do Teorema 4.1. ■

Exercícios (respostas na página 725)

4.1. Determine a solução geral dos sistemas de equações:

$$(a) \begin{cases} x_1'(t) = x_1(t) + x_2(t) + 2 \\ x_2'(t) = x_1(t) + x_2(t) + 2t \end{cases}$$

$$(b) \begin{cases} x_1'(t) = x_1(t) - x_2(t) + e^t \\ x_2'(t) = 2x_1(t) + 4x_2(t) + e^{2t} \end{cases}$$

$$(c) \begin{cases} x_1'(t) = -x_1(t) - 4x_2(t) + 4 \cos t \\ x_2'(t) = x_1(t) - x_2(t) + 2 \sin t \end{cases}$$

$$(d) \begin{cases} x_1'(t) = x_1(t) - x_2(t) \\ x_2'(t) = 5x_1(t) + 3x_2(t) + 4 \cos t \end{cases}$$

$$(e) \begin{cases} x_1'(t) = 3x_1(t) - 4x_2(t) \\ x_2'(t) = x_1(t) - x_2(t) + te^t \end{cases}$$

$$(f) \begin{cases} x_1'(t) = 4x_1(t) + 2x_2(t) + 6te^{2t} \\ x_2'(t) = -2x_1(t) \end{cases}$$

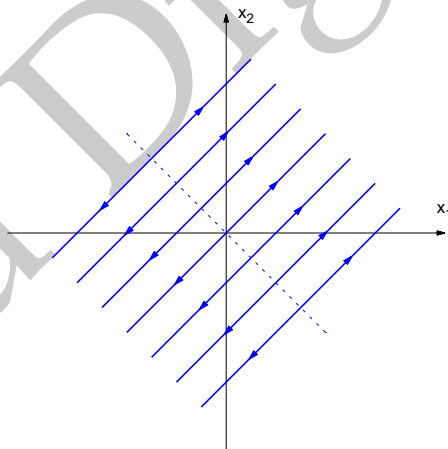
4.5 Respostas dos Exercícios

1. A Matriz A é diagonalizável em \mathbb{R} (página 638)

1.1. (a) As matrizes $P = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$ e $D = \begin{bmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ são tais que $A = PDP^{-1}$.

A solução geral é

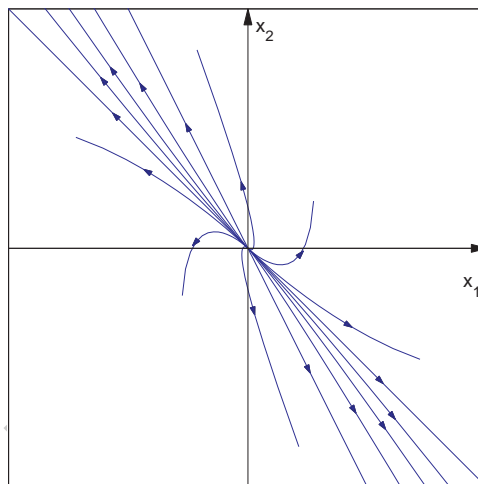
$$\begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} = c_1 e^{2t} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} + c_2 \begin{bmatrix} -1 \\ 1 \end{bmatrix}.$$



(b) As matrizes $P = \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ 1 & -2 \end{bmatrix}$ e $D = \begin{bmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 3 \end{bmatrix}$ são tais que $A = PDP^{-1}$.

A solução geral é

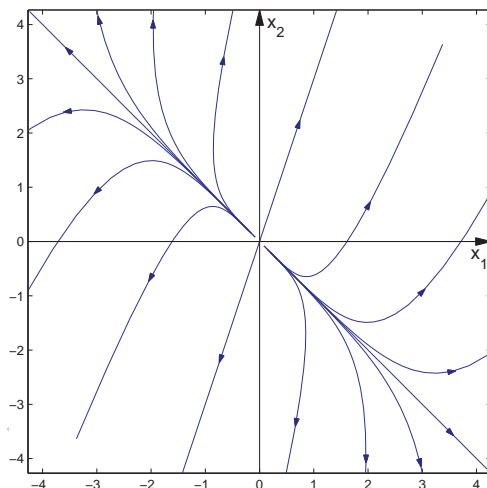
$$\begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} = c_1 e^{2t} \begin{bmatrix} -1 \\ 1 \end{bmatrix} + c_2 e^{3t} \begin{bmatrix} 1 \\ -2 \end{bmatrix}.$$



(c) As matrizes $P = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 3 \end{bmatrix}$ e $D = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 5 \end{bmatrix}$ são tais que $A = PDP^{-1}$.

A solução geral é

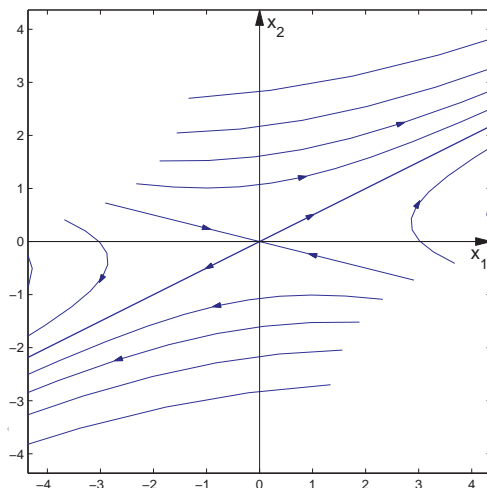
$$\begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} = c_1 e^t \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} + c_2 e^{5t} \begin{bmatrix} 1 \\ 3 \end{bmatrix}.$$



(d) As matrizes $P = \begin{bmatrix} 4 & 2 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}$ e $D = \begin{bmatrix} -3 & 0 \\ 0 & 3 \end{bmatrix}$ são tais que $A = PDP^{-1}$.

A solução geral é

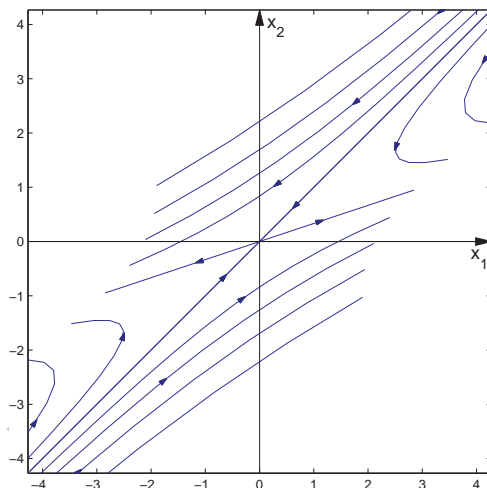
$$\begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} = c_1 e^{-3t} \begin{bmatrix} 4 \\ -1 \end{bmatrix} + c_2 e^{3t} \begin{bmatrix} 2 \\ 1 \end{bmatrix}.$$



(e) As matrizes $P = \begin{bmatrix} 1 & 3 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$ e $D = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ são tais que $A = PDP^{-1}$.

A solução geral é

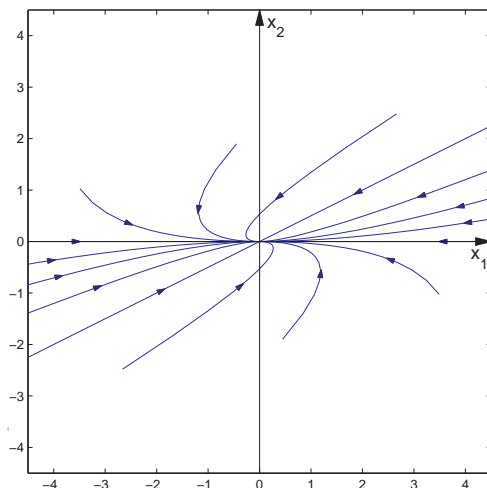
$$\begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} = c_1 e^{-t} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} + c_2 e^t \begin{bmatrix} 3 \\ 1 \end{bmatrix}.$$



(f) As matrizes $P = \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$ e $D = \begin{bmatrix} -2 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$ são tais que $A = PDP^{-1}$.

A solução geral é

$$\begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} = c_1 e^{-2t} \begin{bmatrix} 2 \\ 1 \end{bmatrix} + c_2 e^{-t} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}.$$



$$\begin{aligned}
 \mathbf{1.2.} \quad P &= \begin{bmatrix} -a + \sqrt{a^2 + 1} & -a - \sqrt{a^2 + 1} \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \\
 D &= \begin{bmatrix} 3a + \sqrt{a^2 + 1} & 0 \\ 0 & 3a - \sqrt{a^2 + 1} \end{bmatrix} \\
 \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} &= \\
 &c_1 e^{(3a + \sqrt{a^2 + 1})t} \begin{bmatrix} -a + \sqrt{a^2 + 1} \\ 1 \end{bmatrix} \\
 &+ c_2 e^{(3a - \sqrt{a^2 + 1})t} \begin{bmatrix} -a - \sqrt{a^2 + 1} \\ 1 \end{bmatrix}.
 \end{aligned}$$

1.3. (a) Os autovalores são as raízes de $p(t) = (t+2)(t+3) = 0$, ou seja, $\lambda = -2$ ou $\lambda = -3$.

Os autovetores associados a $\lambda_1 = -2$ são calculados pelo sistema:

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 2 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

e logo um autovetor é $W_1 = (1, 2)$.

Os autovetores associados a $\lambda_2 = -3$ são calculados pelo sistema:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

e logo um autovetor é $W_2 = (0, 1)$.

A solução geral é

$$X(t) = \begin{bmatrix} L(t) \\ D(t) \end{bmatrix} = c_1 e^{-2t} \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \end{bmatrix} + c_2 e^{-3t} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

Substituindo $t = 0$ na solução, ou seja,

$$\begin{bmatrix} L(0) \\ D(0) \end{bmatrix} = c_1 \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \end{bmatrix} + c_2 \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_0 \\ D_0 \end{bmatrix}.$$

que é equivalente ao sistema linear

$$\begin{cases} c_1 & = L_0 \\ 2c_1 + c_2 & = D_0 \end{cases}$$

Obtemos $c_1 = L_0$ e $c_2 = D_0 - 2L_0$. Assim, a solução do problema de valor inicial é

$$\begin{bmatrix} L(t) \\ D(t) \end{bmatrix} = L_0 e^{-2t} \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \end{bmatrix} + (D_0 - 2L_0) e^{-3t} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

(b) Os autovalores são as raízes de $p(t) = (t+k)(t+k_r) = 0$, ou seja, $\lambda = -k$ ou $\lambda = -k_r$.

Os autovetores associados a $\lambda_1 = -k$ são calculados pelo sistema:

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ k & k_r - k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

e logo um autovetor é $W_1 = (k_r - k, k)$.

Os autovetores associados a $\lambda_2 = -k_r$ são calculados pela sistema:

$$\begin{bmatrix} -k + k_r & 0 \\ k & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

e logo um autovetor é $W_2 = (0, 1)$.

A solução geral é

$$\begin{bmatrix} L(t) \\ D(t) \end{bmatrix} = c_1 e^{-kt} \begin{bmatrix} k_r - k \\ k \end{bmatrix} + c_2 e^{-k_r t} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

Substituindo $t = 0$ na solução, ou seja,

$$\begin{bmatrix} L(0) \\ D(0) \end{bmatrix} = c_1 \begin{bmatrix} k_r - k \\ k \end{bmatrix} + c_2 \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_0 \\ D_0 \end{bmatrix}.$$

que é equivalente ao sistema linear

$$\begin{cases} (k_r - k)c_1 & = L_0 \\ kc_1 + c_2 & = D_0 \end{cases}$$

Obtemos $c_1 = \frac{L_0}{k_r - k}$ e $c_2 = D_0 - \frac{kL_0}{k_r - k}$. Assim, a solução do problema de valor inicial é

$$\begin{bmatrix} L(t) \\ D(t) \end{bmatrix} = \frac{L_0}{k_r - k} e^{-kt} \begin{bmatrix} k_r - k \\ k \end{bmatrix} + \left(D_0 - \frac{kL_0}{k_r - k}\right) e^{-k_r t} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

- 1.4.** (a) Sejam T_{AB} a taxa com que mistura passa do tanque A para o tanque B, V_A o volume de mistura no tanque A, c_A a concentração de mistura no tanque A, T_{BA} a taxa com que mistura passa do tanque

A para o tanque B, V_B o volume de mistura no tanque B, c_B a concentração de mistura no tanque B, T_{eA} taxa de entrada de mistura no tanque A, T_{eB} taxa de entrada de mistura no tanque A, c_{eA} a concentração de sal na mistura que entra no tanque A, c_{eB} a concentração de sal na mistura que entra no tanque B e T_s a taxa de saída de mistura do tanque B. Como as taxas T_{AB} , T_{BA} , T_{eA} , T_{eB} e T_s são constantes e dadas por

$$T_{eA} = 2 \text{ l/min}, \quad T_{eB} = 2 \text{ l/min}, \quad T_{AB} = 3 \text{ l/min},$$

$$T_{BA} = 1 \text{ l/min}, \quad T_s = 4 \text{ l/min},$$

então

$$V_A(t) = V_A(0) + T_{eA} \cdot t - T_{AB} \cdot t + T_{BA} \cdot t = V_A(0) = 100,$$

$$V_B(t) = V_B(0) + T_{eB} \cdot t + T_{AB} \cdot t - T_{BA} \cdot t - T_s \cdot t = V_B(0) = 100,$$

$$\begin{aligned} \frac{dq_1}{dt} &= T_{eA} \cdot c_{eA} - T_{AB} \cdot c_A + T_{BA} \cdot c_B \\ &= T_{eA} \cdot c_{eA} - T_{AB} \cdot \frac{q_1(t)}{V_A(t)} + T_{BA} \cdot \frac{q_2(t)}{V_B(t)} \\ &= 6 - 3 \cdot 10^{-2} q_1(t) + 10^{-2} q_2(t), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{dq_2}{dt} &= T_{eB} \cdot c_{eB} + T_{AB} \cdot c_A - T_{BA} \cdot c_B - T_s \cdot c_B \\ &= T_{AB} \cdot \frac{q_1(t)}{V_A(t)} - (T_{BA} + T_s) \cdot \frac{q_2(t)}{V_B(t)} \\ &= 12 + 3 \cdot 10^{-2} q_1(t) - 5 \cdot 10^{-2} q_2(t). \end{aligned}$$

(b) O sistema pode ser escrito na forma matricial como $Q' = AQ + B$, em que

$$A = 10^{-2} \begin{bmatrix} -3 & 1 \\ 3 & -5 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 6 \\ 12 \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad Q(t) = \begin{bmatrix} q_1(t) \\ q_2(t) \end{bmatrix}.$$

Mas,

$$Q' = 0 \Leftrightarrow AQ = -B.$$

Logo, a solução de equilíbrio é

$$Q(t) = Q^E = -A^{-1}B = -10^2 \begin{bmatrix} -\frac{5}{12} & -\frac{1}{12} \\ -\frac{1}{4} & -\frac{1}{4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 6 \\ 12 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 350 \\ 450 \end{bmatrix}.$$

Logo, $q_1^E = 350$ gramas e $q_2^E = 450$ gramas de sal.

(c) Seja $X(t) = Q(t) - Q^E$. Então, $X'(t) = Q'(t)$, e como $AQ^E = -B$, então

$$X' = Q' = A(X + Q^E) + B = AX + AQ^E + B = AX.$$

Ou seja, $(x_1(t), x_2(t))$ satisfaz o sistema linear homogêneo

$$\begin{cases} x_1'(t) = -3 \cdot 10^{-2}x_1(t) + 10^{-2}x_2(t), \\ x_2'(t) = 3 \cdot 10^{-2}x_1(t) - 5 \cdot 10^{-2}x_2(t). \end{cases}$$

(d) Vamos determinar os autovalores e autovetores da matriz

$$A = 10^{-2} \begin{bmatrix} -3 & 1 \\ 3 & -5 \end{bmatrix}$$

Seja

$$B = \begin{bmatrix} -3 & 1 \\ 3 & -5 \end{bmatrix}$$

Como

$$BV = \lambda V \Leftrightarrow 10^{-2}BV = 10^{-2}\lambda V \Leftrightarrow AV = 10^{-2}\lambda V,$$

então as matrizes A e B possuem os mesmos autovetores e os autovalores da matriz A são os autovalores da matriz B multiplicados por 10^{-2} . Para a matriz B o polinômio característico é

$$p(t) = \det(B - tI_2) = \det \begin{bmatrix} -3-t & 1 \\ 3 & -5-t \end{bmatrix}$$

$$= (-3-t)(-5-t) - 3 = t^2 + 8t + 12.$$

Como os autovalores de B são as raízes de $p(t)$, temos que os autovalores de B são $\lambda_1 = -2$ e $\lambda_2 = -6$.

Agora, vamos determinar os autovetores associados aos autovalores $\lambda_1 = -2$ e $\lambda_2 = -6$.

$$(B - \lambda_1 I_2)Z = \vec{0} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ 3 & -3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} -x + y = 0 \\ 3x - 3y = 0 \end{cases}$$

cujas soluções gerais são

$$\mathbb{W}_1 = \{(\alpha, \alpha) \mid \alpha \in \mathbb{R}\} = \{\alpha(1, 1) \mid \alpha \in \mathbb{R}\}.$$

Este é o conjunto de todos os autovetores associados a $\lambda_1 = -2$ acrescentado o vetor nulo. Podemos tomar o autovetor $V = (1, 1)$.

Agora,

$$(B - \lambda_2 I_2)Z = \vec{0} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} 3 & 1 \\ 3 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} 3x + y = 0 \\ 3x + y = 0 \end{cases}$$

cujas soluções gerais são

$$\mathbb{W}_2 = \{(\alpha, -3\alpha) \mid \alpha \in \mathbb{R}\} = \{\alpha(1, -3) \mid \alpha \in \mathbb{R}\}.$$

Este é o conjunto de todos os autovetores associados a $\lambda_2 = -6$ acrescentado o vetor nulo. Podemos tomar o autovetor $W = (1, -3)$.

Assim, a matriz A é diagonalizável e as matrizes

$$P = [V \ W] = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -3 \end{bmatrix}$$

$$\text{e } D = 10^{-2} \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{50} & 0 \\ 0 & -\frac{3}{50} \end{bmatrix}$$

são tais que

$$A = PDP^{-1}.$$

Portanto, a solução geral do sistema de equações diferenciais é dada por

$$\begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} = c_1 e^{-\frac{1}{50}t} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} + c_2 e^{-\frac{3}{50}t} \begin{bmatrix} 1 \\ -3 \end{bmatrix}.$$

(e) A solução geral do sistema

$$\begin{cases} q_1'(t) = -3 \cdot 10^{-2} q_1(t) + 10^{-2} q_2(t) + 6, \\ q_2'(t) = 3 \cdot 10^{-2} q_1(t) - 5 \cdot 10^{-2} q_2(t) + 12. \end{cases}$$

é

$$\begin{bmatrix} q_1(t) \\ q_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_1^E \\ q_2^E \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} \\ = \begin{bmatrix} 350 \\ 450 \end{bmatrix} + c_1 e^{-\frac{1}{50}t} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} + c_2 e^{-\frac{3}{50}t} \begin{bmatrix} 1 \\ -3 \end{bmatrix}.$$

Substituindo-se $t = 0$ na solução geral e usando a condição inicial de que $q_1(0) = 380$ gramas e $q_2(0) = 450$ gramas, obtemos

$$\begin{bmatrix} 30 \\ 0 \end{bmatrix} = c_1 \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} + c_2 \begin{bmatrix} 1 \\ -3 \end{bmatrix}.$$

Logo, $c_1 = \frac{45}{2}$ e $c_2 = \frac{15}{2}$. Portanto,

$$\begin{bmatrix} q_1(t) \\ q_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 350 \\ 450 \end{bmatrix} + \frac{45}{2} e^{-\frac{1}{50}t} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} + \frac{15}{2} e^{-\frac{3}{50}t} \begin{bmatrix} 1 \\ -3 \end{bmatrix}.$$

Assim, a quantidade de sal nos tanques A e B como função do tempo são dados por

$$q_1(t) = 350 + \frac{45}{2} e^{-\frac{1}{50}t} + \frac{15}{2} e^{-\frac{3}{50}t},$$

$$q_2(t) = 450 - \frac{45}{2} e^{-\frac{1}{50}t} - \frac{45}{2} e^{-\frac{3}{50}t},$$

respectivamente.

1.5. (a)

$$A = \begin{bmatrix} -4 & 6 \\ -1 & 3 \end{bmatrix}$$

O polinômio característico de A é $p(t) = \det(A - tI_2) = (-4-t)(3-t) = t^2 + t - 6$ cujas raízes são $\lambda_1 = -3, \lambda_2 = 2$.

$$(A - \lambda_1 I_2)X = \vec{0}$$

é

$$\begin{bmatrix} -1 & 6 \\ -1 & 6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

cuja solução geral é

$$\mathbb{W}_1 = \{\alpha(6, 1) \mid \alpha \in \mathbb{R}\}.$$

que é o conjunto de todos os autovetores associados a $\lambda_1 = -3$ acrescentado o vetor nulo. Assim, $V = (6, 1)$ é um autovetor associado a $\lambda_1 = -3$.

$$(A - \lambda_2 I_2)X = \vec{0}$$

é

$$\begin{bmatrix} -6 & 6 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

cuja solução geral é

$$\mathbb{W}_2 = \{\alpha(1, 1) \mid \alpha \in \mathbb{R}\}.$$

que é o conjunto de todos os autovetores associados a $\lambda_2 = 2$ acrescentado o vetor nulo. Assim, $W = (1, 1)$ é um autovetor associado a $\lambda_2 = 2$.

Assim, a solução do sistema é dada por

$$X(t) = c_1 e^{-3t} \begin{bmatrix} 6 \\ 1 \end{bmatrix} + c_2 e^{2t} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Substituindo-se $t = 0$:

$$X(0) = \begin{bmatrix} 1 \\ -2 \end{bmatrix} = c_1 \begin{bmatrix} 6 \\ 1 \end{bmatrix} + c_2 \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

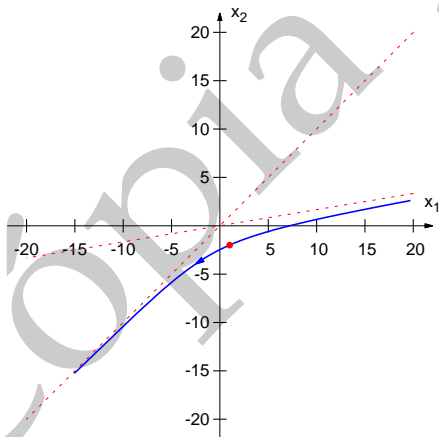
De onde obtemos que $c_1 = 3/5$ e $c_2 = -13/5$ e portanto a solução do problema de valor inicial é

$$X(t) = \frac{3}{5}e^{-3t} \begin{bmatrix} 6 \\ 1 \end{bmatrix} - \frac{13}{5}e^{2t} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

(b) Fazendo a mudança de variáveis $t' = e^{2t}$ podemos escrever a solução do PVI como

$$X(t) = \frac{3}{5} \frac{1}{t'^{1/3}} \begin{bmatrix} 6 \\ 1 \end{bmatrix} - \frac{13}{5} t' \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

que é semelhante a uma hipérbole.



1.6.

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

O polinômio característico de A é $p(t) = \det(A - tI_3) = (-1 - t)[(1 - t)^2 - 1] = -t(t + 1)(t - 2)$ cujas raízes são $\lambda_1 = 0$, $\lambda_2 = -1$ e $\lambda_3 = 2$.

$$(A - \lambda_1 I_3)X = \vec{0}$$

é

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

cuja solução geral é

$$\mathbb{W}_1 = \{\alpha(1, -1, 0) \mid \alpha \in \mathbb{R}\}.$$

que é o conjunto de todos os autovetores associados a $\lambda_1 = 0$ acrescentado o vetor nulo. Assim, $V = (1, -1, 0)$ é um autovetor associado a $\lambda_1 = 0$.

$$(A - \lambda_2 I_3)X = \vec{0}$$

é

$$\begin{bmatrix} 2 & 1 & 0 \\ 1 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

cuja solução geral é

$$\mathbb{W}_2 = \{\alpha(0, 0, 1) \mid \alpha \in \mathbb{C}\}.$$

que é o conjunto de todos os autovetores associados a $\lambda_2 = -1$ acrescentado o vetor nulo. Assim, $W = (0, 0, 1)$ é um autovetor associado a $\lambda_2 = -1$.

$$(A - \lambda_3 I_3)X = \vec{0}$$

é

$$\begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 \\ 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

cuja solução geral é

$$\mathbb{W}_3 = \{\alpha(1, 1, 0) \mid \alpha \in \mathbb{C}\}.$$

que é o conjunto de todos os autovetores associados a $\lambda_3 = 2$ acrescentado o vetor nulo. Assim, $U = (1, 1, 0)$ é um autovetor associado a $\lambda_3 = -1$.

Assim, a solução do sistema é dada por

$$X(t) = c_1 \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix} + c_2 e^{-t} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} + c_3 e^{2t} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Substituindo-se $t = 0$:

$$X(0) = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ -1 \end{bmatrix} = c_1 \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix} + c_2 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} + c_3 \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

de onde obtemos $c_1 = 0$, $c_2 = -1$ e $c_3 = 1$. Assim, a solução do problema de valor inicial é

$$X(t) = -e^{-t} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} + e^{2t} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

1.7.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & -3 & 3 \\ -3 & 0 & 3 \\ -3 & -3 & 6 \end{bmatrix}$$

O polinômio característico de A é $p(t) = \det(A - tI_3) = t(t^2 - 6t + 9)$ cujas raízes são $\lambda_1 = 0$ e $\lambda_2 = 3$.

$$(A - \lambda_1 I_3)X = \vec{0}$$

é

$$\begin{bmatrix} 0 & -3 & 3 \\ -3 & 0 & 3 \\ -3 & -3 & 6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

cujas solução geral é

$$\mathbb{W}_1 = \{\alpha(1, 1, 1) \mid \alpha \in \mathbb{R}\}.$$

que é o conjunto de todos os autovetores associados a $\lambda_1 = 0$ acrescentado o vetor nulo. Assim, $V = (1, 1, 1)$ é um autovetor associado a $\lambda_1 = 0$.

$$(A - \lambda_2 I_3)X = \vec{0}$$

é

$$\begin{bmatrix} -3 & -3 & 3 \\ -3 & -3 & 3 \\ -3 & -3 & 3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

cujas solução geral é

$$\mathbb{W}_2 = \{\alpha(1, 0, 1) + \beta(0, 1, 1) \mid \alpha, \beta \in \mathbb{R}\}.$$

que é o conjunto de todos os autovetores associados a $\lambda_2 = 3$ acrescentado o vetor nulo. Assim, $W_1 = (1, 0, 1)$ e $W_2 = (0, 1, 1)$ são autovetores linearmente independentes associados a $\lambda_2 = 3$.

Assim, a solução do sistema é dada por

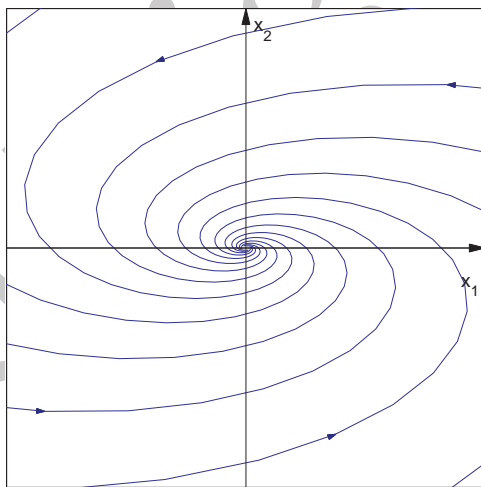
$$X(t) = c_1 \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} + c_2 e^{3t} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} + c_3 e^{3t} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

2. A Matriz A é diagonalizável em \mathbb{C} (página 657)

2.1. (a) As matrizes $P = \begin{bmatrix} 2i & -2i \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$ e $D = \begin{bmatrix} -1+2i & 0 \\ 0 & -1-2i \end{bmatrix}$ são tais que $A = PDP^{-1}$.

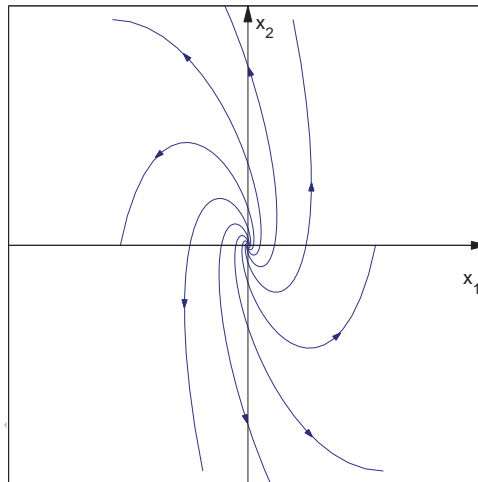
A solução geral é

$$\begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} = c_1 e^{-t} \left(\cos 2t \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} - \sin 2t \begin{bmatrix} 2 \\ 0 \end{bmatrix} \right) + c_2 e^{-t} \left(\cos 2t \begin{bmatrix} 2 \\ 0 \end{bmatrix} + \sin 2t \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \right)$$



(b) $P = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -2i-1 & 2i-1 \end{bmatrix}$ e $D = \begin{bmatrix} 2i+2 & 0 \\ 0 & 2-2i \end{bmatrix}$ são tais que $A = PDP^{-1}$.

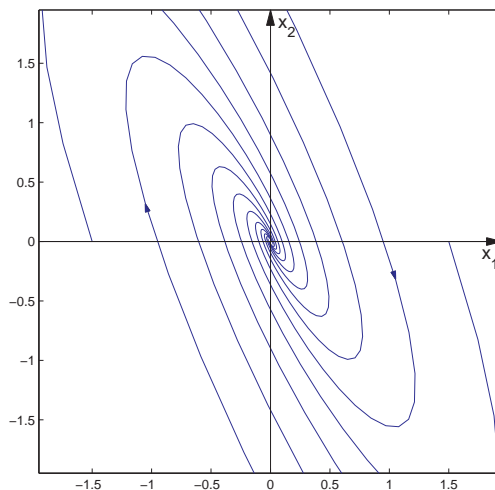
$$\begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} = c_1 e^{2t} \left(\cos 2t \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} - \sin 2t \begin{bmatrix} 0 \\ -2 \end{bmatrix} \right) + c_2 e^{2t} \left(\cos 2t \begin{bmatrix} 0 \\ -2 \end{bmatrix} + \sin 2t \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} \right)$$



(c) As matrizes $P = \begin{bmatrix} 2 & 2 \\ -3 - \sqrt{3}i & -3 + \sqrt{3}i \end{bmatrix}$ e $D = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2} - \frac{\sqrt{3}i}{2} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}i}{2} \end{bmatrix}$ são tais que $A = PDP^{-1}$.

A solução geral é

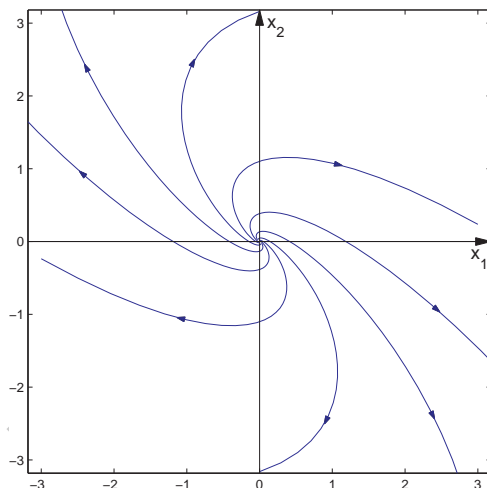
$$\begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} = c_1 e^{-\frac{t}{2}} \left(\cos \frac{\sqrt{3}}{2} t \begin{bmatrix} 2 \\ -3 \end{bmatrix} - \operatorname{sen} \frac{\sqrt{3}}{2} t \begin{bmatrix} 0 \\ \sqrt{3} \end{bmatrix} \right) + c_2 e^{-\frac{t}{2}} \left(\cos \frac{\sqrt{3}}{2} t \begin{bmatrix} 0 \\ \sqrt{3} \end{bmatrix} + \operatorname{sen} \frac{\sqrt{3}}{2} t \begin{bmatrix} 2 \\ -3 \end{bmatrix} \right)$$



(d) As matrizes $P = \begin{bmatrix} 3 & 3 \\ -2 - \sqrt{5}i & -2 + \sqrt{5}i \end{bmatrix}$ e $D = \begin{bmatrix} 3 - \sqrt{5}i & 0 \\ 0 & 3 + \sqrt{5}i \end{bmatrix}$ são tais que $A = PDP^{-1}$.

A solução geral é

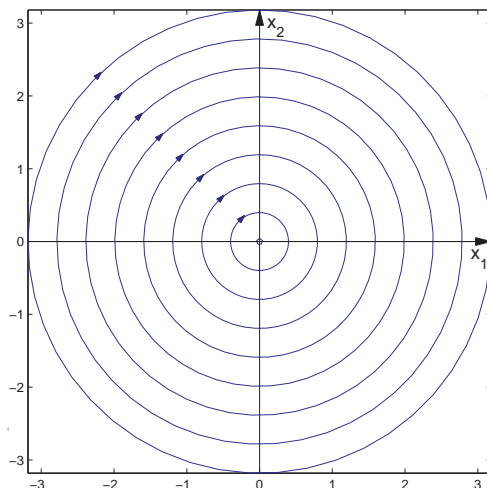
$$\begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} = c_1 e^{3t} \left(\cos \sqrt{5}t \begin{bmatrix} 3 \\ -2 \end{bmatrix} - \sin \sqrt{5}t \begin{bmatrix} 0 \\ \sqrt{5} \end{bmatrix} \right) + c_2 e^{3t} \left(\cos \sqrt{5}t \begin{bmatrix} 0 \\ \sqrt{5} \end{bmatrix} + \sin \sqrt{5}t \begin{bmatrix} 3 \\ -2 \end{bmatrix} \right)$$



(e) As matrizes $P = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -i & i \end{bmatrix}$ e $D = \begin{bmatrix} -2i & 0 \\ 0 & 2i \end{bmatrix}$ são tais que $A = PDP^{-1}$.

A solução geral é

$$\begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} = c_1 \left(\cos 2t \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} - \sin 2t \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \right) + c_2 \left(\cos 2t \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} + \sin 2t \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \right)$$



2.2. (a) Se $|a| > 4$:

$$P = \begin{bmatrix} 4 & 4 \\ -a + \sqrt{a^2 - 16} & -a - \sqrt{a^2 - 16} \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} \frac{a + \sqrt{a^2 - 16}}{2} & 0 \\ 0 & \frac{a - \sqrt{a^2 - 16}}{2} \end{bmatrix}$$

Se $|a| < 4$:

$$P = \begin{bmatrix} 4 & 4 \\ -a + i\sqrt{16 - a^2} & -a - i\sqrt{16 - a^2} \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} \frac{a + i\sqrt{16 - a^2}}{2} & 0 \\ 0 & \frac{a - i\sqrt{16 - a^2}}{2} \end{bmatrix}$$

Se $|a| > 4$:

$$\begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} = c_1 e^{\left(\frac{a + \sqrt{a^2 - 16}}{2}\right)t} \begin{bmatrix} 4 \\ -a + \sqrt{a^2 - 16} \end{bmatrix} +$$

$$c_2 e^{\left(\frac{a-\sqrt{a^2-16}}{2}\right)t} \begin{bmatrix} 4 \\ -a - \sqrt{a^2-16} \end{bmatrix}.$$

Se $|a| < 4$:

$$\begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} = c_1 e^{\frac{at}{2}} \left(\cos\left(\frac{\sqrt{16-a^2}}{2}t\right) \begin{bmatrix} 4 \\ -a \end{bmatrix} - e^{\frac{at}{2}} \sin\left(\frac{\sqrt{16-a^2}}{2}t\right) \begin{bmatrix} 0 \\ \sqrt{16-a^2} \end{bmatrix} \right) + c_2 e^{\frac{at}{2}} \left(\cos(\sqrt{16-a^2}t) \begin{bmatrix} 0 \\ \sqrt{16-a^2} \end{bmatrix} + e^{\frac{at}{2}} \sin(\sqrt{16-a^2}t) \begin{bmatrix} 4 \\ -a \end{bmatrix} \right)$$

Se $a = \pm 4$:

$$\begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} = (c_1 + c_2 t) e^{\pm 2t} \begin{bmatrix} \pm 2 \\ -2 \end{bmatrix} + c_2 e^{\pm 2t} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

(b) Se $a < 1/2$:

$$P = \begin{bmatrix} -1 + \sqrt{1-2a} & -1 - \sqrt{1-2a} \\ 2 & 2 \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} -1 + \sqrt{1-2a} & 0 \\ 0 & -1 - \sqrt{1-2a} \end{bmatrix}$$

Se $a > 1/2$:

$$P = \begin{bmatrix} -1 + i\sqrt{2a-1} & -1 - i\sqrt{2a-1} \\ 2 & 2 \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} -1 + i\sqrt{2a-1} & 0 \\ 0 & -1 - i\sqrt{2a-1} \end{bmatrix}$$

Se $a < 1/2$:

$$\begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} = c_1 e^{(-1+\sqrt{1-2a})t} \begin{bmatrix} -1 + \sqrt{1-2a} \\ 2 \end{bmatrix} + c_2 e^{(-1-\sqrt{1-2a})t} \begin{bmatrix} -1 - \sqrt{1-2a} \\ 2 \end{bmatrix}.$$

Se $a > 1/2$:

$$\begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} = c_1 e^{-t} (\cos(\sqrt{2a-1}t) \begin{bmatrix} -1 \\ 2 \end{bmatrix} - e^{-t} \operatorname{sen}(\sqrt{2a-1}t) \begin{bmatrix} \sqrt{2a-1} \\ 0 \end{bmatrix}) + c_2 e^{-t} (\cos(\sqrt{2a-1}t) \begin{bmatrix} \sqrt{2a-1} \\ 0 \end{bmatrix} + e^{-t} \operatorname{sen}(\sqrt{2a-1}t) \begin{bmatrix} -1 \\ 2 \end{bmatrix})$$

(c) Se $a > 0$:

$$P = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{a}} & -\frac{1}{\sqrt{a}} \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} 1 + \sqrt{a} & 0 \\ 0 & 1 - \sqrt{a} \end{bmatrix}$$

Se $a < 0$:

$$P = \begin{bmatrix} -\frac{i}{\sqrt{-a}} & \frac{i}{\sqrt{-a}} \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} 1 + i\sqrt{-a} & 0 \\ 0 & 1 - i\sqrt{-a} \end{bmatrix}$$

Se $a > 0$:

$$\begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} = c_1 e^{(1+\sqrt{a})t} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{a}} \\ 1 \end{bmatrix} + c_2 e^{(1-\sqrt{a})t} \begin{bmatrix} -\frac{1}{\sqrt{a}} \\ 1 \end{bmatrix}.$$

Se $a < 0$:

$$\begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} = c_1 (e^t \cos(\sqrt{-a}t) \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} - e^t \operatorname{sen}(\sqrt{-a}t) \begin{bmatrix} -\frac{1}{\sqrt{-a}} \\ 0 \end{bmatrix}) +$$

$$c_2(e^t \cos(\sqrt{-a}t) \begin{bmatrix} -\frac{1}{\sqrt{-a}} \\ 0 \end{bmatrix} + e^t \sin(\sqrt{-a}t) \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}).$$

2.3. (a)

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

O polinômio característico de A é

$p(t) = \det(A - tI_3) = (1-t)[(1-t)^2 + 1] = (1-t)(t^2 - 2t + 2)$ cujas raízes são $\lambda_1 = 1$, $\lambda_2 = 1 + i$ e $\lambda_3 = \bar{\lambda}_2 = 1 - i$.

$$(A - \lambda_1 I_3)X = \vec{0}$$

é

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

ou

$$\begin{cases} y & = 0 \\ -x & = 0 \\ 0 & = 0 \end{cases}$$

cujas solução geral é

$$\mathbb{W}_1 = \{(0, 0, \alpha) \mid \alpha \in \mathbb{R}\}.$$

que é o conjunto de todos os autovetores associados a $\lambda_1 = 1$ acrescentado o vetor nulo. Assim, $V = (0, 0, 1)$ é um autovetor associado a $\lambda_1 = 1$.

$$(A - \lambda_2 I_3)X = \vec{0}$$

é

$$\begin{bmatrix} -i & 1 & 0 \\ -1 & -i & 0 \\ 0 & 0 & -i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

ou

$$\begin{cases} -ix + y = 0 \\ -x - iy = 0 \\ iz = 0 \end{cases}$$

cuja solução geral é

$$\mathbb{W}_2 = \{(\alpha, i\alpha, 0) \mid \alpha \in \mathbb{C}\}.$$

que é o conjunto de todos os autovetores associados a $\lambda_2 = 1 + i$ acrescentado o vetor nulo. Assim, $Z = (1, i, 0)$ é um autovetor associado a $\lambda_2 = 1 + i$.

Temos também que $\bar{Z} = (1, -i, 0)$ é um autovetor associado a $\lambda_3 = \bar{\lambda}_2 = 1 - i$. Assim, a matriz A é diagonalizável em \mathbb{C} e as matrizes

$$P = [V \ Z \ \bar{Z}] = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 0 & i & -i \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

e

$$D = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \bar{\lambda}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1+i & 0 \\ 0 & 0 & 1-i \end{bmatrix}$$

são tais que

$$A = PDP^{-1}.$$

Assim, a solução do sistema é dada por

$$\begin{aligned} X(t) &= c_1 e^t \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} + c_2 \operatorname{Re} \left\{ e^{(1+i)t} \begin{bmatrix} 1 \\ i \\ 0 \end{bmatrix} \right\} + \\ &\quad + c_3 \operatorname{Im} \left\{ e^{(1+i)t} \begin{bmatrix} 1 \\ i \\ 0 \end{bmatrix} \right\} \\ &= c_1 e^t \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} + \\ &\quad + c_2 e^t \left(\cos t \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \sin t \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \right) + \\ &\quad + c_3 e^t \left(\cos t \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} + \sin t \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \right) \end{aligned}$$

(b) Substituindo $t = 0$ na solução, ou seja,

$$\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} = X(0) = c_1 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} + c_2 \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + c_3 \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

que é equivalente ao sistema linear

$$\begin{cases} c_2 &= 1 \\ c_3 &= 1 \\ c_1 &= 1 \end{cases}$$

Obtemos $c_1 = 1$, $c_2 = 1$ e $c_3 = 1$. Assim, a solução do problema de valor inicial é

$$X(t) = e^t \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} + e^t \left(\cos t \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \operatorname{sen} t \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \right) + e^t \left(\cos t \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} + \operatorname{sen} t \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \right)$$

2.4. (a) $\begin{cases} x_1'(t) = & x_2(t) \\ x_2'(t) = -\frac{k}{m}x_1(t) \end{cases}$ ou em termos de matrizes, $X'(t) = AX(t)$, em que $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k}{m} & 0 \end{bmatrix}$.

(b) As matrizes

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ \sqrt{\frac{k}{m}}i & -\sqrt{\frac{k}{m}}i \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{k}{m}}i & 0 \\ 0 & -\sqrt{\frac{k}{m}}i \end{bmatrix}$$

são tais que $A = PDP^{-1}$. A solução geral do sistema é

$$\begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} = c_1 \left(\cos \sqrt{\frac{k}{m}}t \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} - \operatorname{sen} \sqrt{\frac{k}{m}}t \begin{bmatrix} 0 \\ \sqrt{\frac{k}{m}} \end{bmatrix} \right) +$$

$$c_2 \left(\cos \sqrt{\frac{k}{m}}t \begin{bmatrix} 0 \\ \sqrt{\frac{k}{m}} \end{bmatrix} + \operatorname{sen} \sqrt{\frac{k}{m}}t \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \right)$$

$$u(t) = x_1(t) = c_1 \cos \sqrt{\frac{k}{m}}t + c_2 \operatorname{sen} \sqrt{\frac{k}{m}}t$$

3. A Matriz A não é diagonalizável (página 671)

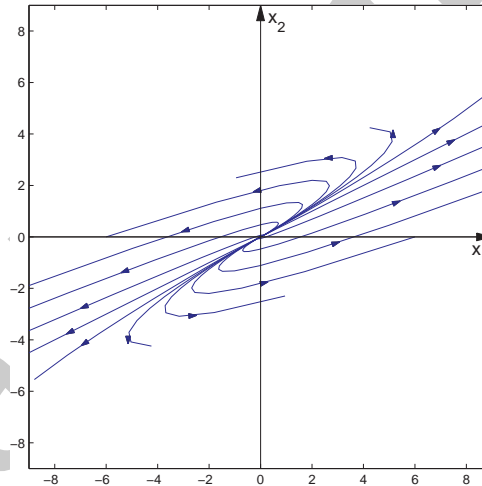
3.1. (a) As matrizes

$$P = \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad J = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

são tais que $A = PJP^{-1}$.

Assim, a solução geral é

$$\begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} = c_1 e^t \begin{bmatrix} 2 \\ 1 \end{bmatrix} + c_2 e^t \left(\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + t \begin{bmatrix} 2 \\ 1 \end{bmatrix} \right)$$



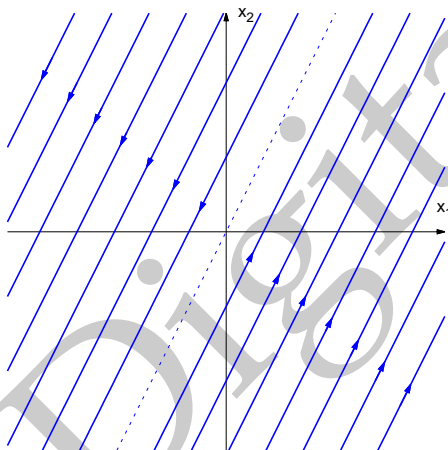
(b) As matrizes

$$P = \begin{bmatrix} 4 & 1 \\ 8 & 0 \end{bmatrix}, \quad J = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

são tais que $A = PJP^{-1}$.

Assim, a solução geral é

$$\begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} = c_1 \begin{bmatrix} 4 \\ 8 \end{bmatrix} + c_2 \left(\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + t \begin{bmatrix} 4 \\ 8 \end{bmatrix} \right)$$



3.2. (a) Se $|a| > 4$:

$$P = \begin{bmatrix} 4 & 4 \\ -a + \sqrt{a^2 - 16} & -a - \sqrt{a^2 - 16} \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} \frac{a + \sqrt{a^2 - 16}}{2} & 0 \\ 0 & \frac{a - \sqrt{a^2 - 16}}{2} \end{bmatrix}$$

Se $|a| < 4$:

$$P = \begin{bmatrix} 4 & 4 \\ -a + i\sqrt{16 - a^2} & -a - i\sqrt{16 - a^2} \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} \frac{a + i\sqrt{16 - a^2}}{2} & 0 \\ 0 & \frac{a - i\sqrt{16 - a^2}}{2} \end{bmatrix}$$

são tais que $A = PDP^{-1}$.

Se $a = 4$:

$$P = \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ -2 & 0 \end{bmatrix} \text{ e } J = \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 0 & 2 \end{bmatrix}$$

Se $a = -4$:

$$P = \begin{bmatrix} -2 & 1 \\ -2 & 0 \end{bmatrix} \text{ e } J = \begin{bmatrix} -2 & 1 \\ 0 & -2 \end{bmatrix}$$

são tais que $A = PJP^{-1}$.

Se $|a| > 4$:

$$\begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} =$$

$$c_1 e^{\left(\frac{a+\sqrt{a^2-16}}{2}\right)t} \begin{bmatrix} 4 \\ -a + \sqrt{a^2-16} \end{bmatrix} +$$

$$c_2 e^{\left(\frac{a-\sqrt{a^2-16}}{2}\right)t} \begin{bmatrix} 4 \\ -a - \sqrt{a^2-16} \end{bmatrix}.$$

Se $|a| < 4$:

$$\begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} =$$

$$c_1 e^{\frac{at}{2}} \left(\cos\left(\frac{\sqrt{16-a^2}}{2}t\right) \begin{bmatrix} 4 \\ -a \end{bmatrix} \right.$$

$$\left. - \operatorname{sen}\left(\frac{\sqrt{16-a^2}}{2}t\right) \begin{bmatrix} 0 \\ \sqrt{16-a^2} \end{bmatrix} \right) +$$

$$c_2 e^{\frac{at}{2}} \left(\cos(\sqrt{16-a^2}t) \begin{bmatrix} 0 \\ \sqrt{16-a^2} \end{bmatrix} \right.$$

$$\left. + \operatorname{sen}(\sqrt{16-a^2}t) \begin{bmatrix} 4 \\ -a \end{bmatrix} \right)$$

Se $a = \pm 4$:

$$\begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} = (c_1 + c_2 t)e^{\pm 2t} \begin{bmatrix} \pm 2 \\ -2 \end{bmatrix} + c_2 e^{\pm 2t} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

(b) Se $a < 1/2$:

$$P = \begin{bmatrix} -1 + \sqrt{1-2a} & -1 - \sqrt{1-2a} \\ 2 & 2 \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} -1 + \sqrt{1-2a} & 0 \\ 0 & -1 - \sqrt{1-2a} \end{bmatrix}$$

Se $a > 1/2$:

$$P = \begin{bmatrix} -1 + i\sqrt{2a-1} & -1 - i\sqrt{2a-1} \\ 2 & 2 \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} -1 + i\sqrt{2a-1} & 0 \\ 0 & -1 - i\sqrt{2a-1} \end{bmatrix}$$

são tais que $A = PDP^{-1}$.

Se $a = 1/2$:

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -2 & 0 \end{bmatrix} \text{ e } J = \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$$

são tais que $A = PJP^{-1}$.

Se $a < 1/2$:

$$\begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} = c_1 e^{(-1+\sqrt{1-2a})t} \begin{bmatrix} -1 + \sqrt{1-2a} \\ 2 \end{bmatrix} + c_2 e^{(-1-\sqrt{1-2a})t} \begin{bmatrix} -1 - \sqrt{1-2a} \\ 2 \end{bmatrix}.$$

Se $a > 1/2$:

$$\begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} = c_1 e^{-t} (\cos(\sqrt{2a-1}t) \begin{bmatrix} -1 \\ 2 \end{bmatrix} - e^{-t} \sin(\sqrt{2a-1}t) \begin{bmatrix} \sqrt{2a-1} \\ 0 \end{bmatrix}) + c_2 e^{-t} (\cos(\sqrt{2a-1}t) \begin{bmatrix} \sqrt{2a-1} \\ 0 \end{bmatrix} + e^{-t} \sin(\sqrt{2a-1}t) \begin{bmatrix} -1 \\ 2 \end{bmatrix})$$

$$+ e^{-t} \operatorname{sen}(\sqrt{2a-1}t) \begin{bmatrix} -1 \\ 2 \end{bmatrix})$$

Se $a = 1/2$:

$$\begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} = c_1 e^{-t} \begin{bmatrix} 1 \\ -2 \end{bmatrix} + c_2 e^{-t} \left(\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + t \begin{bmatrix} 1 \\ -2 \end{bmatrix} \right)$$

- 3.3. (a) $\det(A - tI_3) = -(t-4)(t-2)^2 = 0 \Leftrightarrow t = 2$ ou $t = 4$. Logo, os autovalores de A são $\lambda_1 = 2$ e $\lambda_2 = 4$.

Para $\lambda_1 = 2$:

$$(A - \lambda_1 I_3)X = \vec{0} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} 1 & 1 & 2 \\ -1 & 1 & 0 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} 1 & 1 & 2 \\ 0 & 2 & 2 \\ 0 & -2 & -2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ Assim, os autoveto-}$$

res associados a $\lambda_1 = 2$ são $(-\alpha, -\alpha, \alpha)$, para $\alpha \in \mathbb{R}$. Assim, $V_1 = (1, 1, -1)$ é um autovetor de A associado a $\lambda_1 = 2$.

Para $\lambda_2 = 4$:

$$(A - \lambda_2 I_3)X = \vec{0} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} -1 & 1 & 2 \\ -1 & -1 & 0 \\ 1 & -1 & -2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} 1 & -1 & -2 \\ 0 & -2 & -2 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ Assim, os autove-}$$

tores associados a $\lambda_1 = 2$ são $(\alpha, -\alpha, \alpha)$, para $\alpha \in \mathbb{R}$. Assim, $V_2 = (1, -1, 1)$ é um autovetor de A associado a $\lambda_2 = 4$.

Vamos resolver o sistema

$$(A - \lambda_1 I_3)X = V_1 \Leftrightarrow \begin{bmatrix} 1 & 1 & 2 \\ -1 & 1 & 0 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ -1 \end{bmatrix} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} 1 & 1 & 2 \\ 0 & 2 & 2 \\ 0 & -2 & -2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ -2 \end{bmatrix}$$

Assim, os vetores da forma $X = (-\alpha, 1 - \alpha, \alpha)$, para $\alpha \in \mathbb{R}$ são tais que $(A - \lambda_1 I_3)X = V_1$. Tomando $\alpha = 0$, temos que o vetor $W_1 = (0, 1, 0)$ é tal que $(A - 2I_3)W_1 = V_1 \Leftrightarrow AW_1 = 2W_1 + V_1$. Logo:

$$[AV_1 \quad AW_1 \quad AV_2] = [2V_1 \quad 2W_1 + V_1 \quad 4V_2] \Leftrightarrow A[V_1 \quad W_1 \quad V_2] = [V_1 \quad W_1 \quad V_2] \begin{bmatrix} 2 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 4 \end{bmatrix}. \text{ Multiplicando}$$

à direita pela inversa de $P = [V_1 \ W_1 \ V_2] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ obtemos que $A = PJP^{-1}$, em que

$$J = \begin{bmatrix} 2 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 4 \end{bmatrix}.$$

A solução geral do sistema é

$$\begin{aligned} X(t) &= c_1 e^{\lambda_1 t} V_1 + c_2 e^{\lambda_1 t} (W_1 + t V_1) + c_3 e^{\lambda_2 t} V_2 \\ &= c_1 e^{2t} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ -1 \end{bmatrix} + c_3 e^{4t} \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 1 \end{bmatrix} + \\ &\quad + c_2 e^{2t} \left(\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} + t \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ -1 \end{bmatrix} \right) \end{aligned}$$

(b) Substituindo-se $t = 0$ e $X = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$ na solução geral obtemos

$$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = c_1 \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ -1 \end{bmatrix} + c_2 \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} + c_3 \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Resolvendo o sistema algébrico obtemos $c_1 = 0$, $c_2 = 1$ e $c_3 = 1$. A solução do PVI é

$$X(t) = e^{4t} \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 1 \end{bmatrix} + e^{2t} \left(\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} + t \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ -1 \end{bmatrix} \right)$$

3.4. Consideremos a equação $xV + yV_3 + zW = \vec{0}$ para x, y, z escalares. Vamos mostrar $x = y = z = 0$. Multiplicando-se $(A - \lambda I_n)$ por $xV + yV_3 + zW = \vec{0}$ obtemos

$$x(A - \lambda I_n)V + y(A - \lambda I_n)V_3 + z(A - \lambda I_n)W = \vec{0}.$$

Como V e V_3 são autovetores de A associados a λ , então $(A - \lambda I_n)V = (A - \lambda I_n)V_3 = \vec{0}$ logo

$$z(A - \lambda I_n)W = zV_3 = \vec{0}$$

o que implica que $z = 0$. Substituindo-se $z = 0$ na equação inicial temos

$$xV + yV_3 = \vec{0}.$$

Como V e V_3 são linearmente independentes, então

$$x = y = 0.$$

4. Sistemas Não-Homogêneos (página 690)

4.1. (a) As matrizes

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \text{ e } D = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 2 \end{bmatrix}$$

são tais que

$$A = PDP^{-1}.$$

$$P^{-1}F(t) = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 2 \\ 2t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1-t \\ 1+t \end{bmatrix}$$

Fazendo a mudança de variável $Y(t) = P^{-1}X(t)$, a equação $X'(t) = AX(t) + F(t)$ se transforma em

$$Y'(t) = DY(t) + P^{-1}F(t),$$

que pode ser escrita na forma do sistema

$$\begin{aligned} y_1'(t) &= 1 - t \\ y_2'(t) &= 2y_2(t) + 1 + t \end{aligned}$$

Resolvendo estas equações obtemos como soluções particulares

$$\begin{aligned} y_{1p}(t) &= t - \frac{1}{2}t^2 \\ y_{2p}(t) &= -\frac{1}{2}t - \frac{3}{4} \end{aligned}$$

Assim, uma solução particular do sistema não homogêneo é

$$\begin{aligned} X_p(t) &= PY_p(t) = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t - \frac{1}{2}t^2 \\ -\frac{1}{2}t - \frac{3}{4} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} t/2 - 3/4 - t^2/2 \\ -3t/2 - 3/4 + t^2/2 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Assim, a solução geral do sistema não homogêneo é $\begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} = c_1 e^{2t} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} + c_2 \begin{bmatrix} -1 \\ 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t/2 - 3/4 - t^2/2 \\ -3t/2 - 3/4 + t^2/2 \end{bmatrix}$.

(b) As matrizes

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -2 & -1 \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad D = \begin{bmatrix} 3 & 0 \\ 0 & 2 \end{bmatrix}$$

são tais que

$$A = PDP^{-1}.$$

$$P^{-1}F(t) = \begin{bmatrix} -1 & -1 \\ 2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^t \\ e^{2t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -e^{2t} - e^t \\ e^{2t} + 2e^t \end{bmatrix}$$

Fazendo a mudança de variável $Y(t) = P^{-1}X(t)$, a equação $X'(t) = AX(t) + F(t)$ se transforma em

$$Y'(t) = DY(t) + P^{-1}F(t),$$

que pode ser escrita na forma do sistema

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} y_1 &= 3y_1 - e^{2t} - e^t \\ \frac{d}{dt} y_2 &= 2y_2 + e^{2t} + 2e^t \end{aligned}$$

Resolvendo estas equações obtemos como soluções particulares

$$\begin{aligned}y_{1p}(t) &= \frac{2e^{2t} + e^t}{2} \\y_{2p}(t) &= te^{2t} - 2e^t\end{aligned}$$

Assim, uma solução particular do sistema não homogêneo é

$$X_p(t) = PY_p(t) = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -2 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{2e^{2t} + e^t}{2} \\ te^{2t} - 2e^t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} te^{2t} - 3/2e^t + e^{2t} \\ -te^{2t} + e^t - 2e^{2t} \end{bmatrix}$$

Assim, a solução geral do sistema não homogêneo é $\begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} = c_1 e^{2t} \begin{bmatrix} -1 \\ 1 \end{bmatrix} + c_2 e^{3t} \begin{bmatrix} 1 \\ -2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} te^{2t} - 3/2e^t + e^{2t} \\ -te^{2t} + e^t - 2e^{2t} \end{bmatrix}$.

(c) As matrizes

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ i/2 & -i/2 \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad D = \begin{bmatrix} -2i - 1 & 0 \\ 0 & 2i - 1 \end{bmatrix}$$

são tais que

$$A = PDP^{-1}.$$

$$P^{-1}F(t) = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & -i \\ \frac{1}{2} & i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 4 \cos t \\ 2 \sin t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 \cos t - 2i \sin t \\ 2i \sin t + 2 \cos t \end{bmatrix}$$

Fazendo a mudança de variável $Y(t) = P^{-1}X(t)$, a equação $X'(t) = AX(t) + F(t)$ se transforma em

$$Y'(t) = DY(t) + P^{-1}F(t),$$

que pode ser escrita na forma do sistema

$$\begin{aligned}\frac{d}{dt} y_1 &= (-2i - 1) y_1 + 2e^{-it} \\ \frac{d}{dt} y_2 &= (2i - 1) y_2 + 2e^{it}\end{aligned}$$

Resolvendo a primeira equação obtemos como solução particular

$$y_{1p}(t) = \frac{2e^{-it}}{i+1}$$

Assim, uma solução particular do sistema não homogêneo é

$$X_p(t) = 2 \operatorname{Re}\{y_{1p}(t) \begin{bmatrix} 1 \\ \frac{i}{2} \end{bmatrix}\} = \begin{bmatrix} 2 \cos t - 2 \operatorname{sen} t \\ \cos t + \operatorname{sen} t \end{bmatrix}$$

Assim, a solução geral real do sistema não homogêneo é

$$\begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 \cos t - 2 \operatorname{sen} t \\ \cos t + \operatorname{sen} t \end{bmatrix} + c_1 e^{-t} \left(\cos 2t \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} - \operatorname{sen} 2t \begin{bmatrix} 2 \\ 0 \end{bmatrix} \right) + c_2 e^{-t} \left(\cos 2t \begin{bmatrix} 2 \\ 0 \end{bmatrix} + \operatorname{sen} 2t \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \right)$$

(d) As matrizes

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 2i-1 & -2i-1 \end{bmatrix}$$

e

$$D = \begin{bmatrix} 2-2i & 0 \\ 0 & 2i+2 \end{bmatrix}$$

são tais que

$$A = PDP^{-1}.$$

$$P^{-1}F(t) = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} - \frac{i}{4} & -\frac{i}{4} \\ \frac{i}{4} + \frac{1}{2} & \frac{i}{4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 4 \cos t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -i \cos t \\ i \cos t \end{bmatrix}$$

Fazendo a mudança de variável $Y(t) = P^{-1}X(t)$, a equação $X'(t) = AX(t) + F(t)$ se transforma em

$$Y'(t) = DY(t) + P^{-1}F(t),$$

que pode ser escrita na forma do sistema

$$\begin{aligned}\frac{d}{dt} y_1 &= (2 - 2i) y_1 - i \frac{e^{it} + e^{-it}}{2} \\ \frac{d}{dt} y_2 &= (2i + 2) y_2 + i \frac{e^{it} + e^{-it}}{2}\end{aligned}$$

Resolvendo a primeira equação obtemos como solução particular

$$y_{1p}(t) = \frac{(2i + 1)e^{it} + (2i + 3)e^{-it}}{2 - 16i}$$

Assim, uma solução particular do sistema não homogêneo é

$$X_p(t) = 2 \operatorname{Re}\{y_{1p}(t) \begin{bmatrix} 1 \\ 2i - 1 \end{bmatrix}\} = \begin{bmatrix} -\frac{28}{65} \cos t + \frac{16}{65} \operatorname{sen} t \\ -\frac{44}{65} \cos t - \frac{12}{65} \operatorname{sen} t \end{bmatrix}$$

Assim, a solução geral real do sistema não homogêneo é

$$\begin{aligned}\begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -\frac{28}{65} \cos t + \frac{16}{65} \operatorname{sen} t \\ -\frac{44}{65} \cos t - \frac{12}{65} \operatorname{sen} t \end{bmatrix} \\ &+ c_1 e^{2t} \left(\cos 2t \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} - \operatorname{sen} 2t \begin{bmatrix} 0 \\ -2 \end{bmatrix} \right) \\ &+ c_2 e^{2t} \left(\cos 2t \begin{bmatrix} 0 \\ -2 \end{bmatrix} + \operatorname{sen} 2t \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} \right)\end{aligned}$$

(e) As matrizes

$$P = \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad J = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

são tais que

$$A = PJP^{-1}.$$

$$P^{-1}F(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & -2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ t e^t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t e^t \\ -2t e^t \end{bmatrix}$$

Fazendo a mudança de variável $Y(t) = P^{-1}X(t)$, a equação $X'(t) = AX(t) + F(t)$ se transforma em

$$Y'(t) = JY(t) + P^{-1}F(t),$$

que pode ser escrita na forma do sistema

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} y_1 &= y_1 + y_2 + t e^t \\ \frac{d}{dt} y_2 &= y_2 - 2t e^t \end{aligned}$$

Resolvendo a segunda equação e substituindo o resultado na primeira obtemos como soluções particulares

$$\begin{aligned} y_{1p}(t) &= \left(\frac{t^2}{2} - \frac{t^3}{3} \right) e^t \\ y_{2p}(t) &= -t^2 e^t \end{aligned}$$

Assim, uma solução particular do sistema não homogêneo é

$$X_p(t) = P Y_p(t) = \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \left(\frac{t^2}{2} - \frac{t^3}{3} \right) e^t \\ -t^2 e^t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{2t^3}{3} e^t \\ \left(\frac{t^2}{2} - \frac{t^3}{3} \right) e^t \end{bmatrix}$$

Assim, a solução geral do sistema não homogêneo é $\begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} = c_1 e^t \begin{bmatrix} 2 \\ 1 \end{bmatrix} + c_2 e^t \left(\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + t \begin{bmatrix} 2 \\ 1 \end{bmatrix} \right) +$

$$\begin{bmatrix} -\frac{2t^3}{3} e^t \\ \left(\frac{t^2}{2} - \frac{t^3}{3} \right) e^t \end{bmatrix}.$$

(f) As matrizes

$$P = \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ -2 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad J = \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 0 & 2 \end{bmatrix}$$

são tais que

$$A = PJ P^{-1}.$$

$$P^{-1}F(t) = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{2} \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 6t e^{2t} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 6t e^{2t} \end{bmatrix}$$

Fazendo a mudança de variável $Y(t) = P^{-1}X(t)$, a equação $X'(t) = AX(t) + F(t)$ se transforma em

$$Y'(t) = JY(t) + P^{-1}F(t),$$

que pode ser escrita na forma do sistema

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} y_1 &= 2y_1 + y_2 \\ \frac{d}{dt} y_2 &= 2y_2 + 6t e^{2t} \end{aligned}$$

Resolvendo a segunda equação e substituindo o resultado na primeira obtemos como soluções particulares

$$\begin{aligned} y_{1p}(t) &= t^3 e^{2t} \\ y_{2p}(t) &= 3t^2 e^{2t} \end{aligned}$$

Assim, uma solução particular do sistema não homogêneo é

$$\begin{aligned} X_p(t) &= P Y_p(t) = \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ -2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t^3 e^{2t} \\ 3t^2 e^{2t} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} (2t^3 + 3t^2) e^{2t} \\ -2t^3 e^{2t} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Assim, a solução geral do sistema não homogêneo é $\begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} =$

$$c_1 e^{2t} \begin{bmatrix} 2 \\ -2 \end{bmatrix} + c_2 e^{2t} \left(\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + t \begin{bmatrix} 2 \\ -2 \end{bmatrix} \right) + \begin{bmatrix} (2t^3 + 3t^2) e^{2t} \\ -2t^3 e^{2t} \end{bmatrix}.$$

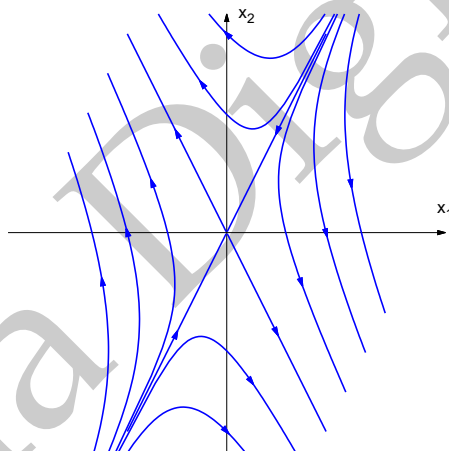


Figura 4.1. Trajetórias do sistema do Exemplo 4.5

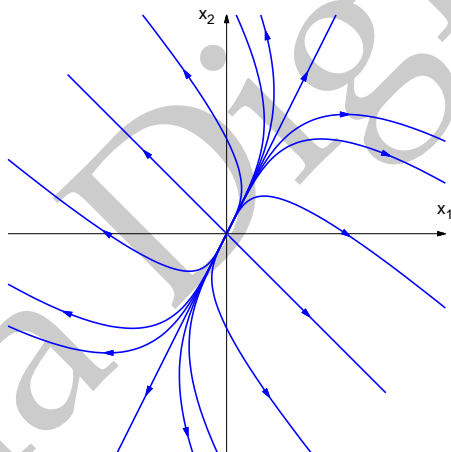


Figura 4.2. Trajetórias do sistema do Exemplo 4.6

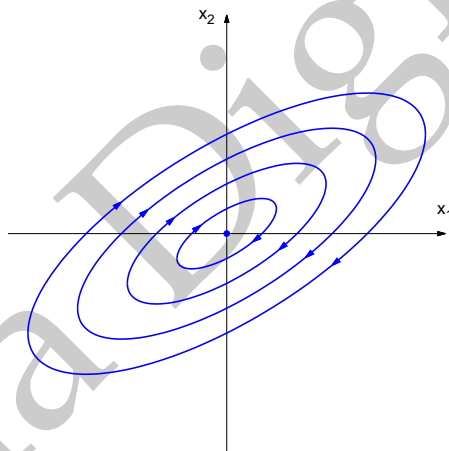


Figura 4.3. Trajetórias do sistema do Exemplo 4.8

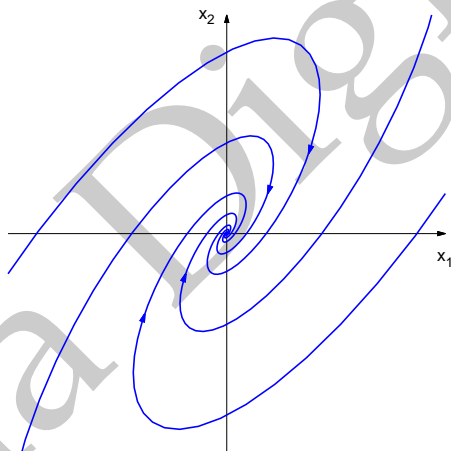


Figura 4.4. Trajetórias do sistema do Exemplo 4.9

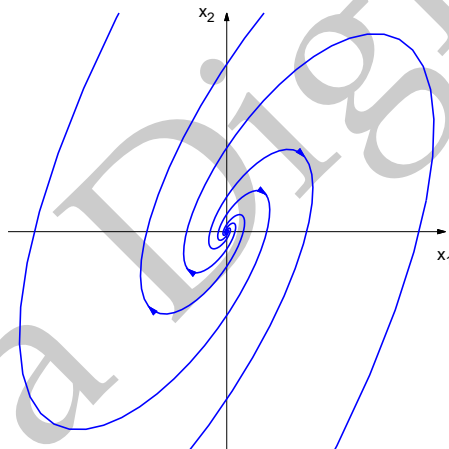


Figura 4.5. Trajetórias de um sistema cujos autovetores são os mesmos da matriz do Exemplo 4.9, mas com autovalores iguais a $1 \pm 2i$.

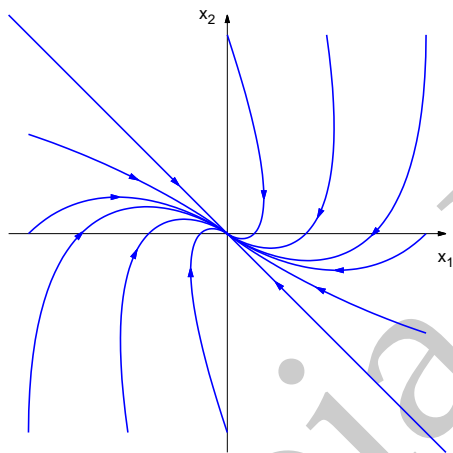


Figura 4.6. Trajetórias do sistema do Exemplo 4.11

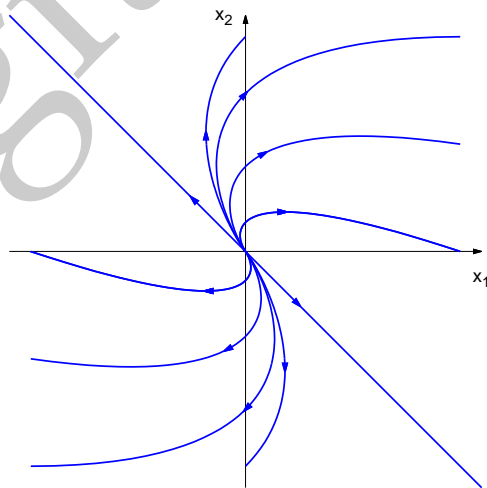


Figura 4.7. Trajetórias de um sistema cuja matriz P é a mesma do Exemplo 4.11, mas com o autovalor $\lambda = 2$.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Rodney Josué Biezuner: *Notas de Aula de Equações Diferenciais Ordinárias Básicas*. Website. http://www.mat.ufmg.br/~rodney/notas_de_aula/eda.pdf.
- [2] William E. Boyce e Richard C. DiPrima: *Equações Diferenciais Elementares e Problemas de Valores de Contorno*. Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro, 9a. edição, 2010.
- [3] F. Brauer e J. A. Nohel: *Ordinary Differential Equations: A First Course*. W. A. Benjamin, Inc., New York, 1967.
- [4] Ricardo Motta Pinto Coelho: *Fundamentos em Ecologia*. Editora Artes Médicas, Porto Alegre, 2000.
- [5] Djairo G. de Figueiredo e Aloisio F. Neves: *Equações Diferenciais Aplicadas*. SBM, Rio de Janeiro, 2a. edição, 2005.
- [6] Morris W. Hirsch e Stephen Smale: *Differential Equations, Dynamical Systems and Linear Algebra*. Academic Press, Inc., New York, 1974.
- [7] Erwin Kreyszig: *Matemática Superior*. Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro, 2a. edição, 1985.
- [8] Paulo Cupertino de Lima: *Equações Diferenciais A*. Website. <http://www.mat.ufmg.br/~lima/apostilas/apo>
- [9] E. C. de Oliveira e M. Tygel: *Métodos Matemáticos para Engenharia*. SBM, Rio de Janeiro, 2005.

- [10] Reginaldo J. Santos: *Álgebra Linear e Aplicações*. Imprensa Universitária da UFMG, Belo Horizonte, 2013.
- [11] Reginaldo J. Santos: *Um Curso de Geometria Analítica e Álgebra Linear*. Imprensa Universitária da UFMG, Belo Horizonte, 2014.
- [12] Jorge Sotomayor: *Lições de Equações Diferenciais Ordinárias*. IMPA, Rio de Janeiro, 1979.
- [13] Mária Svec, Maria C. Menezes, Márcia B. de Menezes e Sirlane Barreto: *Tópicos: Séries e Equações Diferenciais*. EDUFBA, Salvador, 2002.
- [14] Jaime E. Villate: *Introdução aos Sistemas Dinâmicos: uma abordagem prática com Maxima*. Website. http://villate.org/doc/sistemasdinamicos/sistdinam-1_2.pdf.
- [15] Stephen A. Wirkus e Randall J. Swift: *A Course in Ordinary Differential Equations*. Chapman and Hall/CRC, 2006.
- [16] Dennis G. Zill: *Equações Diferenciais com Aplicações em Modelagem*. Thomson, São Paulo, 2a. edição, 2011.
- [17] Dennis G. Zill e Michael R. Cullen: *Equações Diferenciais*. Makron Books, São Paulo, 3a. edição, 2001.

ÍNDICE ALFABÉTICO

Amortecimento crítico, 344

Amplitude, 337

Autovalor

complexo, 648

Autovetor

complexo, 648

Batimento, 357

Campo de direções, 148

Centro, 651

Coefficientes da série, 371

Combinação linear, 613

Constante

cinética, 110

da mola, 333

de amortecimento, 333

Convolução de duas funções, 553

Crescimento exponencial, 66

Crescimento logístico, 69

Crescimento logístico com limiar, 151

Crescimento populacional, 66

Curva integral, 8

Decaimento Radioativo, 74

Delta de Dirac, 543

Derivada da transformada de Laplace, 520

Dilatação, 520

Dinâmica populacional, 66

Equação

autônoma, 129

característica, 296

de n -ésima ordem, 7

de 1ª ordem, 7

de 2ª ordem, 7

de Airy, 397

de Bernoulli, 57

de Chebyshev, 400

de Euler, 287, 307, 407

de Hermite, 398

de Laplace, 5

- de Legendre, 398
 - de Ricatti, 59
 - diferencial, 1
 - exata, 39
 - homogênea de 1ª ordem, 54
 - homogênea com coeficientes constantes, 295
 - homogênea de 2ª ordem, 275
 - integral de Volterra, 562
 - linear, 8
 - linear de 1ª ordem, 15
 - linear não homogênea com coeficientes constantes, 320
 - não homogênea, 309
 - não linear, 8
 - ordinária, 7
 - parcial, 7
 - separável, 28
- Fase, 337
- Fator integrante
- da equação linear, 18
 - para equação exata, 46
- Foco atrator, 652
- Foco instável, 652
- Fonte, 634
- Fonte espiral, 652
- Frequência de ressonância, 354
- Frequência natural, 337
- Função
- admissível, 495
 - contínua por partes, 495
 - de Heaviside, 523
 - degrau (unitário), 523
 - seccionalmente contínua, 495
- Função Gama, 507
- Funções
- linearmente dependentes (LD), 281
 - linearmente independentes (LI), 281
- Fórmula de Euler, 286
- Fórmula de recorrência, 384
- Impulso unitário, 543
- Intervalo de validade da solução, 32
- Juros, 100
- Lei de resfriamento de Newton, 83
- Lei de Torricelli, 87, 125
- Linearidade da transformada de Laplace, 492
- Misturas, 79
- Movimento harmônico simples, 337
- Mudanças de variáveis, 404
- Método de variação dos parâmetros, 313
- Método dos coeficientes a determinar, 320
- Nó atrator, 634
- Nó impróprio, 668
- Nó instável, 634
- Oscilações, 333
- Oscilações forçadas, 352
- Oscilações livres, 336

Parte imaginária, 491

Parte real, 491

Período, 337

Polinômio característico, 626

Polinômio de Bernstein, 503

Polinômio de Chebyshev, 402

Polinômio de Hermite, 400

Polinômio de Legendre, 398

Ponto

crítico, 129

de equilíbrio, 129

estável, 130

instável, 133, 136, 139

Ponto de sela, 632

Princípio da Superposição

para equações não homogêneas, 311

Princípio da superposição, 275, 613

Problema de valor inicial, 12

PVI, 12

Quase frequência, 346

Raio de convergência, 371

Redução de ordem, 291

Resistência em fluidos, 92

Resposta ao impulso unitário, 564

Ressonância, 354

Retrato de fase, 631

Sistemas de equações diferenciais

lineares, 610

Sistemas de equações lineares homogêneas, 613

Solução

dada implicitamente, 29

de equação de 1ª ordem, 12

de equação diferencial ordinária de ordem n , 8

de equilíbrio, 129

em séries de potências, 371

estacionária, 129, 360

geral, 279, 617

geral de equação diferencial ordinária de ordem n , 9

particular de equação de 1ª ordem, 12

particular de equação diferencial ordinária de ordem n , 8

termo transiente da, 360

Soluções

fundamentais, 279, 616

Subamortecimento, 346

Sumidouro, 634

Sumidouro espiral, 652

Superamortecimento, 342

Série converge, 371

Série de potências, 371

Teorema

da convolução, 556

Abel, 289

de existência e unicidade

para equações de 1ª ordem, 152

para equações de 1ª ordem lineares, 155

para equações de 2ª ordem, 273

para sistemas de equações diferenciais, 612

Trajetórias, 631

Transformada de Laplace, 490

- 1º Teorema de deslocamento, 497
- 2º Teorema de deslocamento, 526
- da derivada, 514
- derivada da, 520
- dilatação, 520
- do cosseno hiperbólico, 494
- do seno hiperbólico, 495
- inversa, 496
- linearidade, 492
- tabela, 566

Wronskiano, 279, 616