4. Equações Diferenciais Ordinárias

baseado no texto de Alexandre Almeida, Cálculo II, fev. 2018, pp. 51–92, e nos slides de 2016/2017 do Cálculo II – Agrup. II

Isabel Brás

UA, 23/5/2018

Cálculo II – Agrup. IV 17/18

Resumo dos Conteúdos

Diferencial de uma função real de uma variável real

Reta Tangente/Linearização em torno de um ponto:

$f : D \subseteq \mathbb{R} \to \mathbb{R}$ diferenciável em $x_0 \in \text{int}(D)$. A reta tangente ao gráfico de f no ponto $P = (x_0, f(x_0))$ tem equação $y = f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0)$.
A função L definida por

$$L(x) = f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0) \ ,$$

cujo gráfico é a reta tangente, é a chamada linearização de f em x_0.

Diferencial: Como L é uma boa aproximação local de f, para x próximo de x_0, considerando $\Delta f := f(x_0 + \Delta x) - f(x_0)$, $\Delta x := x - x_0$,

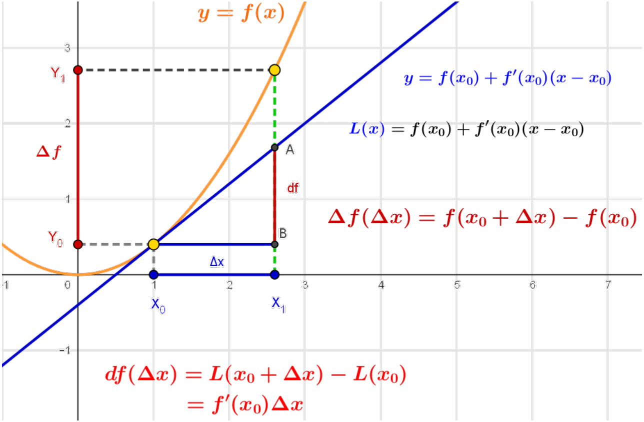
$$\Delta f \approx f'(x_0)\Delta x \ .$$

Representando Δx por dx, (para valores próximos de zero),
o diferencial de f em x_0 é

$$\boxed{df = f'(x_0)dx}.$$

(ver interpretação geométrica no slide seguinte e/ou em GeoGebra, agradecimentos a Ana Breda)

Diferencial de uma função real de uma variável real (interpretação geométrica)



Diferencial de uma função real de duas variáveis reais

Plano Tangente/Linearização em torno de um ponto:

$f : D \subseteq \mathbb{R}^2 \to \mathbb{R}$ diferenciável em $(x_0, y_0) \in \text{int}(D)$. O plano tangente ao gráfico de f no ponto $P = (x_0, y_0, f(x_0, y_0))$ tem equação

$$z = f(x_0, y_0) + \frac{\partial f}{\partial x}(x_0, y_0)(x - x_0) + \frac{\partial f}{\partial y}(x_0, y_0)(y - y_0).$$

A função L definida por

$$L(x, y) = f(x_0, y_0) + \frac{\partial f}{\partial x}(x_0, y_0)(x - x_0) + \frac{\partial f}{\partial y}(x_0, y_0)(y - y_0).$$

cujo gráfico é o plano tangente, é a chamada linearização de f em (x_0, y_0).

Diferencial Total: Analogamente ao caso $n=1$, para x próximo de x_0 e y próximo de y_0, considerando $\Delta f := f(x_0+\Delta x, y_0+\Delta y) - f(x_0,y_0)$, $\Delta x := x - x_0$ e $\Delta y := y - y_0$,

$$\Delta f \approx \frac{\partial f}{\partial x}(x_0,y_0)\Delta x + \frac{\partial f}{\partial y}(x_0,y_0)\Delta y \, .$$

Representando Δx por dx e Δy por dy (para valores próximos de zero), o diferencial total de f em (x_0,y_0) é

$$\boxed{df = \frac{\partial f}{\partial x}(x_0,y_0)dx + \frac{\partial f}{\partial y}(x_0,y_0)dy} \, .$$

Generalização para n variáveis (análogo):

$f : D \subseteq \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}$ diferenciável em $(x_1^0, x_2^0, \ldots, x_n^0) \in \mathrm{int}(D)$.
O diferencial total de f em $(x_1^0, x_2^0, \ldots, x_n^0)$ é

$$\boxed{df = \frac{\partial f}{\partial x_1}(x_1^0, x_2^0, \ldots, x_n^0)dx_1 + \cdots + \frac{\partial f}{\partial x_n}(x_1^0, x_2^0, \ldots, x_n^0)dx_n} \, .$$

Equações Diferenciais, o que são?

Equações que envolvem uma função e as suas derivadas e/ou a variável que é o argumento dessa função.
Estas equações aparecem frequentemente quando se pretende modelar matematicamente fenómenos reais, em especial, naqueles de evolução temporal.

Exemplos:

1. Taxa de variação de temperatura de um objeto:

$$\frac{dT}{dt} = -k(T - T_m),$$

$T(t) \to$ temperatura do objeto,
$T_m \to$ temperatura do meio ambiente, $k \to$ constante positiva.

Exemplos (cont.):

2. Movimento harmónico de uma mola:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = -kx$$

$m \rightarrow$ massa do objeto colocado na extremidade da mola vertical;
$x(t) \rightarrow$ deslocamento a partir da posição (inicial) de equilíbrio da mola;
$k > 0 \rightarrow$ constante de mola; Ver figura

3. Lei de Kirchhoff aplicada a uma malha constituída por uma bobine em série com uma resistência:

$$L\frac{dI}{dt} + RI = E(t),$$

onde L e R são constantes (indutância e resistência, respetivamente), $I(t)$ a intensidade de corrente e $E(t)$ a tensão da fonte de energia.

Equação diferencial ordinária

Definição:

Chama-se equação diferencial ordinária (EDO) de ordem n ($n \in \mathbb{N}$), a uma equação do tipo

$$F\left(x, y, y', y'', \ldots, y^{(n)}\right) = 0 \qquad \text{(EDO)}$$

onde y é função (real) de x.

Terminologia associada:

y é designada por variável dependente;
x é designada por variável independente;
Uma EDO diz-se estar na forma normal quando se apresenta na forma

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

Notação alternativa: No slide anterior $y^{(n)}$ denota a derivada de ordem n da função y. Em alternativa, podemos usar a notação $\frac{d^n y}{dx^n}$ e (re)escrever a EDO na forma

$$F\left(x, y, \frac{dy}{dx}, \frac{d^2y}{dx^2}, \ldots, \frac{d^ny}{dx^n}\right) = 0.$$

Exemplos :

1. $$-y' + x^3 - 1 = 0$$

   é uma equação diferencial de ordem 1, onde x é a variável independente e y a variável dependente;

2. $$3t\,\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{dx}{dt} = \cos(t)$$

   é uma equação diferencial de ordem 2, onde t é a variável independente e x a variável dependente;

Solução de uma EDO

Definição

Chama-se solução da equação diferencial

$$F\left(x, y, y', y'', \ldots, y^{(n)}\right) = 0\,,$$

num intervalo I, a toda a função $\varphi : I \to \mathbb{R}$, com derivadas finitas até à ordem n, tal que

$$F\left(x, \varphi(x), \varphi'(x), \varphi''(x), \ldots, \varphi^{(n)}(x)\right) = 0\,, \qquad \forall x \in I.$$

Exemplo:

$\varphi_1(x) =$ sen x e $\varphi_2(x) = \cos x -$ sen x são duas soluções (em $\mathbb{R}$) de

$$y'' + y = 0$$

Identifique outras!

Mais terminologia associada a uma EDO de ordem n

Integral Geral: Família de soluções que se obtêm por técnicas de integração adequadas, que é definida, em geral, usando n constantes arbitrárias; o processo de obtenção dessa família de soluções é usualmente designado por integração(ou resolução) da EDO.

Integral Particular (ou solução particular): Solução que faz parte do integral geral;

Solução Singular: Solução que não se obtém a partir do integral geral;

Solução Geral: Conjunto de todas as soluções.

Exemplo: $(y')^2 - 4y = 0.$

Integral geral: $y = (x + C)^2$, onde $C \in \mathbb{R}$; Solução particular: $y = x^2$;
Solução singular: $y = 0$.

Problema de valores iniciais

Definição:

Chama-se problema de valores iniciais (PVI) (ou problema de Cauchy) a todo o problema que consiste em encontrar a solução (ou soluções) de uma dada equação diferencial satisfazendo certas condições (ditas condições iniciais) num mesmo ponto:

$$\begin{cases} F\left(x, y, y', y'', \ldots, y^{(n)}\right) = 0 \\ y(x_0) = y_0, \quad y'(x_0) = y_1, \quad \ldots \;, \quad y^{(n-1)}(x_0) = y_{n-1}. \end{cases}$$

Exemplo:

$y = -\frac{x^3}{6} + 1$ é a solução do PVI

$$\begin{cases} y'' + x = 0 \\ y(0) = 1 \\ y'(0) = 0 \end{cases}$$

Verifique!

Problema de valores na fronteira

Definição:

Chama-se problema de valores na fronteira (ou problema de fronteira) a todo o problema que consista em encontrar a solução (ou soluções) de uma dada equação diferencial satisfazendo condições em dois ou mais pontos.

Exemplo:

O problema de fronteira

$$\begin{cases} y'' + x = 0 \\ y(0) + y'(1) = -\frac{1}{3} \\ y(1) + y'(0) = 0 \end{cases}$$

tem uma única solução. Qual é?

Existência e Unicidade de Solução para um PVI

- Nem todo o PVI admite solução;
- Caso exista solução para o PVI, esta pode não ser única;
- É possível provar que um PVI de primeira ordem na forma normal, i.e., do tipo

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

admite uma e uma só solução (definida num intervalo centrado em x_0), desde que a função f satisfaça determinadas condições (*Teorema de Cauchy-Picard*). Não estudamos aqui este resultado, mas trataremos um caso particular a propósito das EDO's lineares (mais à frente).

Equações de variáveis separáveis

EDO de primeira ordem da forma:

$$y' = \frac{p(x)}{q(y)}, \quad (\text{com } q(y) \neq 0)$$

para p e q dependentes apenas de x e de y, respetivamente.

Determinação dum integral geral

1. Escrever a equação na forma:

$$y' q(y) = p(x) \qquad (1)$$

2. Integrar ambos os membros de (1), para obter um integral geral da equação na seguinte forma implícita:

$$\int q(y)\, dy = \int p(x)\, dx$$

Exemplo

$$y' = \frac{1}{y} e^x, y \neq 0$$

Separando as variáveis a equação toma a forma:

$$yy' = e^x$$

Integrando membro a membro

$$\int y \, dy = \int e^x \, dx \,,$$

obtendo-se o seguinte integral geral:

$$y^2 = 2e^x + C, \; C \in \mathbb{R}$$

Equações Diferenciais Homogéneas

EDO de primeira ordem da forma:

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

onde $f : D \to \mathbb{R}$ é homogénea de grau zero, i.e.,
$f(\lambda x, \lambda y) = f(x, y), \ \forall (x, y) \in D, \ \forall \lambda \in \mathbb{R},$ tais que $(\lambda x, \lambda y) \in D$.

Exemplo:

$$y' = \underbrace{\frac{x^2 + xy + y^2}{x^2}}_{f(x,y)}$$

f é homogénea de grau zero pois, desde que $\lambda \neq 0$,

$$f(\lambda x, \lambda y) = \frac{\lambda^2 x^2 + \lambda x \lambda y + \lambda^2 y^2}{\lambda^2 x^2} = \frac{x^2 + xy + y^2}{x^2} = f(x, y)$$

Determinação dum integral geral de uma equação diferencial homogénea:

1. Escrever a equação na forma:

$$y' = f(1, \frac{y}{x}) \qquad (1)$$

2. Em (1), fazer a mudança de variável $zx = y$:

$$z + xz' = g(z), \qquad (2)$$

   onde $g(z) = f(1, \frac{y}{x})$;

3. Integrar a equação (2), como equação de variáveis separáveis.
4. No integral geral obtido fazer $z = \frac{y}{x}$.

Voltando ao Exemplo do Slide 18

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

Ora,

$$\frac{x^2 + xy + y^2}{x^2} = 1 + \frac{y}{x} + \left(\frac{y}{x}\right)^2, \qquad x \neq 0,$$

Através da substituição $y = zx$, obtemos a equação de variáveis separáveis

$$\frac{1}{1+z^2}\, z' = \frac{1}{x},$$

com integral geral dado por

$$\operatorname{arctg} z = \ln|x| + C, \qquad C \in \mathbb{R}.$$

Por conseguinte, um integral geral da equação homogénea dada tem a forma

$$\operatorname{arctg} \frac{y}{x} = \ln|x| + C, \qquad \text{i.e.} \qquad y = x \operatorname{tg}\left(\ln|x| + C\right), \qquad C \in \mathbb{R}.$$

Equações Diferenciais Exatas

Uma equação da forma

$$M(x,y)dx + N(x,y)dy = 0,$$

onde $M, N\colon D \subseteq \mathbb{R}^2 \to \mathbb{R}$ são contínuas e D é aberto, diz-se uma equação diferencial exata se existir $F\colon D \subseteq \mathbb{R}^2 \to \mathbb{R}$, $F \in \mathcal{C}^1(D)$, tal que

$$dF = M(x,y)dx + N(x,y)dy\,, \tag{1}$$

i.e., $\frac{\partial F}{\partial x}(x,y) = M(x,y)$ e $\frac{\partial F}{\partial y}(x,y) = N(x,y)$.

Resolver uma equação diferencial exata é encontrar uma função F (nas condições descritas). A família de funções

$$F(x,y) = C, C \in \mathbb{R}\,,$$

forma o conjunto das soluções da equação (1).

Exemplo:

$$y^2 dx + 2xy\, dy = 0$$

Esta equação é exata se existir $F\colon \mathbb{R}^2 \to \mathbb{R}$ tal que

$$\begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial x}(x,y) &= M(x,y) = y^2 && (2)\\ \frac{\partial F}{\partial y}(x,y) &= N(x,y) = 2xy && (3) \end{aligned}$$

De (2) conclui-se que

$$F(x,y) = y^2 x + \phi(y)\,,$$

derivando em ordem a y e conjugando com (3), $\phi(y) = C,\ C \in \mathbb{R}$.
Deste modo, a equação é exata e o conjunto das suas soluções é

$$y^2 x = C, C \in \mathbb{R}\,.$$

Caracterização das EDOs exatas em abertos simplesmente conexos

Conjuntos abertos simplesmente conexos:

Um conjunto simplesmente conexo em $\mathbb{R}^2$ é aquele que não apresenta "buracos"[a]. Exemplos de abertos simplesmente conexos:

$\mathbb{R}^2$; $\quad]a,b[\times]c,d[$, onde $a,b,c,d \in \mathbb{R}$, $a<b$ e $c<d$;

bolas abertas; semiplanos abertos.

[a] A definição rigorosa ultrapassa o âmbito desta u.c., trabalharemos com casos dentro dos exemplos dados.

Proposição:

Sejam $M, N\colon D \subseteq \mathbb{R}^2 \to \mathbb{R}$, $M, N \in \mathcal{C}^1(D)$, e D aberto simplesmente conexo.

$$M(x,y)dx + N(x,y)dy = 0$$

é uma equação diferencial exata se e só se $\frac{\partial M}{\partial y}(x,y) = \frac{\partial N}{\partial x}(x,y)$.

Exemplos de classificação de EDOs em exatas/não exatas

1. $y^2 dx + 2xy\, dy = 0\,.$

   Sejam $M(x, y) = y^2$ e $N(x, y) = 2xy$, $(x, y) \in \mathbb{R}^2$. Como

   $$\frac{\partial M}{\partial y}(x, y) = \frac{\partial N}{\partial x}(x, y) = 2y\,,$$

   a equação é exata (por aplicação da proposição do slide anterior).

2. $(3y + 4xy^2)\, dx + (2x + 3yx^2)\, dy = 0\,.$

   Sejam $M(x, y) = 3y + 4xy^2$ e $N(x, y) = 2x + 3yx^2$, $(x, y) \in \mathbb{R}^2$. Como

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

   a equação não é exata (por aplicação da proposição do slide anterior).

Fatores integrantes para EDOs redutíveis a exatas

Uma função não nula $\mu(x, y)$ diz-se um fator integrante da equação (não exata)

$$M(x, y)\, dx + N(x, y)\, dy = 0$$

se a equação

$$\mu(x, y)M(x, y)\, dx + \mu(x, y)N(x, y)\, dy = 0$$

é diferencial exata.

Exemplo:

A equação $(3y + 4xy^2)\, dx + (2x + 3yx^2)\, dy = 0$ não é exata. Mas

$$x^2y(3y + 4xy^2)\, dx + x^2y(2x + 3yx^2)\, dy = 0$$

é exata [Verifique!]. Assim, $\mu(x, y) = x^2y$ é um fator integrante da equação $(3y + 4xy^2)\, dx + (2x + 3yx^2)\, dy = 0$.

Equações Diferenciais Lineares de Primeira Ordem:

$$a_0(x)\,y' + a_1(x)\,y = b(x)$$

onde a_0, a_1, b são funções definidas num certo intervalo I, com $a_0(x) \neq 0$ para todo $x \in I$. Deste modo, esta equação pode tomar a seguinte forma:

$$y' + p(x)\,y = q(x).$$

Quando $b \equiv 0$ ($q \equiv 0$), a equação diz-se incompleta ou homogénea.

Exemplos

- $y' + xy = 1$ equação diferencial linear de 1.ª ordem completa.
- $y' + xy = 0$ equação diferencial linear de 1.ª ordem incompleta (ou homogénea).

Note que, se $q \equiv 0$ ou se p e q forem funções constantes a EDO é de variáveis separáveis.

EDOs Lineares de Primeira Ordem (cont.):

Para resolver a equação
$$y' + p(x)\,y = q(x).$$
basta determinar uma primitiva P da função p, multiplicar ambos os membros pelo fator integrante $\mu(x) = e^{P(x)}$ e integrar de seguida em ordem a x.

Exemplo:
$$y' - y = -e^x$$
Um fator integrante é e^{-x}, pois $p(x) = -1$. Multiplicando ambos os membros da equação por e^{-x} obtemos
$$e^{-x}y' - e^{-x}y = -1\,, \qquad \text{i.e.,} \qquad \tfrac{d}{dx}\left(e^{-x}y\right) = -1.$$
Integrando vem
$$e^{-x}y = \int(-1)\,dx = -x + C\,, \qquad C \in \mathbb{R}.$$
Assim, um integral geral da equação linear é
$$y = (C - x)\,e^x\,, \qquad C \in \mathbb{R}.$$

EDOs Lineares de Primeira Ordem (cont.):

Teorema (existência e unicidade de solução):

Se p e q são funções contínuas num intervalo I, então o problema de Cauchy

$$\begin{cases} y' + p(x)\, y = q(x) \\ y(x_0) = y_0 \end{cases}$$

tem nesse intervalo uma e uma só solução.

Exemplo:

O problema de Cauchy

$$\begin{cases} y' - \ y = -e^x \\ y(0) = 0 \end{cases}$$

tem como solução única $y = -xe^x$, para $x \in \mathbb{R}$. Porquê?

Equações de Bernoulli:

$$y' + a(x)\,y = b(x)\,y^{\alpha}\,, \quad \alpha \in \mathbb{R}$$

- Se $\alpha = 0$ ou $\alpha = 1$, a equação é linear de 1ª ordem.
- Se $\alpha \neq 0$ e $\alpha \neq 1$, a equação é redutível a uma linear de 1ª ordem, usando a mudança de variável $z = y^{1-\alpha}$. De facto, a equação de Bernoulli pode escrever-se na forma

$$y^{-\alpha}y' + a(x)\,y^{1-\alpha} = b(x)$$

(eventualmente com $y \neq 0$). Com a substituição $z = y^{1-\alpha}$, chegamos à equação linear de 1ª ordem

$$z' + (1-\alpha)a(x)\,z = (1-\alpha)\,b(x)\,,$$

Exemplo:

A equação

$$y' + y = e^x\, y^2$$

é uma equação de Bernoulli (com $\alpha = 2$). Fazendo $z = 1/y$ $(y \neq 0)$ obtemos

$$z' - z = -e^x$$

cujo integral geral é

$$z = (C - x)\, e^x\,, \qquad C \in \mathbb{R},$$

Ver slide 27

Assim, um integral geral da equação de Bernoulli é

$$y = \frac{e^{-x}}{C - x}\,, \quad C \in \mathbb{R}$$

Equações Lineares de Ordem Arbitrária:

$$a_0(x)\, y^{(n)} + a_1(x)\, y^{(n-1)} + \cdots + a_{n-1}(x)\, y' + a_n(x)\, y = b(x)$$

onde

$b\colon I \to \mathbb{R}$;

$a_i\colon I \to \mathbb{R}$, $i = 0, \ldots, n$, com $a_0(x) \neq 0$ para todo $x \in I$.

$\downarrow$

coeficientes da equação

- Se $b \equiv 0$, a equação diz-se incompleta (ou homogénea); Caso contrário, a equação diz-se completa (ou não homogénea);
- Se os coeficientes da equação são funções constantes, a equação diz-se de linear de coeficientes constantes.

Exemplos

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

   EDO linear homogénea de segunda ordem com coeficientes constantes;

2. $$e^x\, y' - \cos x\, y = x$$

   EDO linear completa de primeira ordem;

3. $$y^{(5)} + 2y' = 0$$

   EDO linear homogénea de quinta ordem com coeficientes constantes.

Equação homogénea associada a uma EDO linear

Se na equação

$$a_0(x)\, y^{(n)} + a_1(x)\, y^{(n-1)} + \cdots + a_{n-1}(x)\, y' + a_n(x)\, y = b(x)$$

tomarmos $b(x) \equiv 0$, obtemos a chamada equação homogénea associada.

Exemplo:

A equação homógenea associada à equação completa

$$y'' + y = \cos(x)$$

é a equação:

$$y'' + y = 0\,.$$

Solução geral de uma EDO linear completa

Teorema:

A solução geral de uma equação linear completa obtém-se adicionando uma qualquer sua solução à solução geral da equação homogénea associada.

$$y' - 2y = e^{5x}.$$

Exemplo:

A equação homogénea associada é a equação

$$y' - 2y = 0\ ,$$

cuja solução geral é dada por $y_h = C\,e^{2x}$, com $C \in \mathbb{R}$. Uma solução da EDO completa é $y_p = \dfrac{1}{3}\,e^{5x}$ [Verifique!]. Assim, a solução geral da equação completa é

$$y = \underbrace{C\,e^{2x}}_{y_h} + \underbrace{\frac{1}{3}\,e^{5x}}_{y_p},\ \ C \in \mathbb{R}.$$

EDO linear homogénea – Conjunto das soluções

Considere-se a EDO:

$$a_0(x)\, y^{(n)} + a_1(x)\, y^{(n-1)} + \cdots + a_{n-1}(x)\, y' + a_n(x)\, y = 0 \qquad (4)$$

onde $a_i\colon I \to \mathbb{R}$, $i = 0, \ldots, n$, com $a_0(x) \neq 0$ para todo $x \in I$.

Teorema:

Sejam $y\colon I \to \mathbb{R}$, $w\colon I \to \mathbb{R}$ e $\alpha \in \mathbb{R}$.

(i) $y \equiv 0$ é solução de (4);

(ii) Se y e w são soluções de (4), então $y + w$ é solução de (4);

(iii) Se y é solução de (4), então αy é solução de (4);

Isto é, o conjunto das soluções de (4) é um subespaço vetorial do espaço vetorial das funções reais de variável real definidas em I.

EDO linear homogénea – Conjunto das soluções (cont.)

Na verdade, o conjunto das soluções de uma EDO linear homógenea é um subespaço vetorial de dimensão n, como se conclui do seguinte teorema:

Teorema: Toda a equação linear homogénea de ordem n

$$a_0(x)\,y^{(n)} + a_1(x)\,y^{(n-1)} + \cdots + a_{n-1}(x)\,y' + a_n(x)\,y = 0,$$

num dado intervalo I ($a_0, a_1, \ldots a_n$ contínuas em I; $a_0(x) \neq 0$ para todo o $x \in I$) admite n soluções, $\varphi_1, \varphi_2, \ldots, \varphi_n$, linearmente independentes e qualquer sua solução, y, pode escrever-se como sua combinação linear, *i.e.*,

$$y = C_1\varphi_1 + \cdots + C_n\varphi_n, \text{ para } C_j \in \mathbb{R}\,.$$

Qualquer conjunto de n soluções linearmente independente de uma EDO linear homogénea de ordem n é designado por sistema fundamental de soluções dessa equação.

Exemplo:

$$y'' + y = 0 \tag{5}$$

$\varphi_1(x) = \cos x$, $\varphi_2(x) = \sin x$ são soluções desta equação e são linearmente independentes. Ver slide 11

Assim, $\{\varphi_1(x), \varphi_2(x)\}$ é sistema fundamental de soluções de (5). Logo, a solução geral da equação é

$$y = C_1 \cos x + C_2 \sin x, \;\; C_1, C_2 \in \mathbb{R}\,.$$

Observações:

1. A resolução de uma EDO linear homogénea reduz-se à determinação de um sistema fundamental de soluções. Todavia, para $n > 1$, não existe método geral que permita obter um tal conjunto de soluções.
2. No caso de a EDO ser de coeficientes constantes, um sistema fundamental de soluções pode ser obtido a partir do conhecimento das raízes de certo polinómio (ver 43 e seguintes).

Método da variação das constantes

$\downarrow$

método de determinação de uma solução particular de uma equação linear completa que:

- pressupõe o conhecimento da solução geral da equação homogénea associada:

$$y_h = C_1\varphi_1(x) + \cdots + C_n\varphi_n(x)\,, \quad C_1, \ldots, C_n \in \mathbb{R},$$

  onde $\{\varphi_1, \ldots, \varphi_n\}$ é um sistema fundamental de soluções desta equação.

- procura obter uma solução particular da equação completa da forma

$$y_p = C_1(x)\varphi_1(x) + \cdots + C_n(x)\varphi_n(x)\ ,$$

  admitindo que as constantes são funções de x diferenciáveis.

Método da variação das constantes (cont.)

- As funções $C_i(x)$, $i = 1, 2, \ldots, n$ determinam-se calculando as suas derivadas que constituem a solução do seguinte sistema de equações:

$$\begin{cases} C_1' \varphi_1 + \cdots + C_n' \varphi_n = 0 \\ C_1' \varphi_1' + \cdots + C_n' \varphi_n' = 0 \\ \qquad \vdots \\ C_1' \varphi_1^{(n-2)} + \cdots + C_n' \varphi_n^{(n-2)} = 0 \\ C_1' \varphi_1^{(n-1)} + \cdots + C_n' \varphi_n^{(n-1)} = \frac{b}{a_0} \end{cases}$$

- Calculando as primitivas $G_i(x)$, $i = 1, \ldots, n$, das funções que se obtêm da resolução do sistema anterior, podemos escrever a seguinte solução particular da equação completa:

$$y_p = G_1(x)\varphi_1(x) + \cdots + G_n(x)\varphi_n(x).$$

Exemplo: $$y'' + y = \operatorname{cosec} x\,,\ x \in]0, \pi[\tag{6}$$

1. A solução geral da equação homogénea associada é

$$y = C_1 \cos x + C_2 \sin x,\ \ C_1, C_2 \in \mathbb{R}\,.$$

▸ Ver slide 37

2. Procure-se uma solução particular da forma

$$y_p = C_1(x) \cos x + C_2(x) \text{ sen } x,$$

onde

$$\begin{cases} C_1'(x) \cos x + C_2'(x) \text{ sen } x = 0 \\ C_1'(x)(-\text{ sen } x) + C_2'(x) \cos x = \operatorname{cosec} x. \end{cases}$$

3. Da resolução do sistema obtemos $C_1'(x) = -1$ e $C_2'(x) = \operatorname{cotg} x$. Logo, podemos tomar

$$C_1(x) = -x \quad \text{e} \quad C_2(x) = \ln(\text{ sen } x)\,, \quad 0 < x < \pi\,.$$

Exemplo (cont.):

4. Assim, uma solução particular é

$$y_p = -x\cos x + \operatorname{sen} x \ln(\operatorname{sen} x).$$

5. Logo, a solução geral da equação completa (6) é

$$\begin{aligned} y &= \underbrace{C_1\cos x + C_2 \operatorname{sen} x}_{y_h} \underbrace{-x\cos x + \operatorname{sen} x \ln(\operatorname{sen} x)}_{y_p}, \quad 0 < x < \pi, \\ &= (C_1 - x)\cos x + (C_2 + \ln(\operatorname{sen} x)) \operatorname{sen} x, \qquad 0 < x < \pi, \end{aligned}$$

onde C_1, C_2 são constantes reais arbitrárias.

Princípio de sobreposição

Teorema:

Suponha-se que y_1 é uma solução particular da equação

$$a_0(x)\, y^{(n)} + a_1(x)\, y^{(n-1)} + \cdots + a_n(x)\, y = b_1(x)\,,$$

e que y_2 é uma solução particular da equação

$$a_0(x)\, y^{(n)} + a_1(x)\, y^{(n-1)} + \cdots + a_n(x)\, y = b_2(x)\,.$$

Então $y_1 + y_2$ é uma solução particular da equação

$$a_0(x)\, y^{(n)} + a_1(x)\, y^{(n-1)} + \cdots + a_{n-1}(x)\, y' + a_n(x)\, y = b_1(x) + b_2(x).$$

EDOs lineares com coeficientes constantes

EDO linear de ordem n com coeficientes constantes tem a forma:

$$a_0\, y^{(n)} + a_1\, y^{(n-1)} + \cdots + a_{n-1}\, y' + a_n\, y = b(x)\,,$$

onde $a_0, a_1, \ldots, a_n \in \mathbb{R}$ com $a_0 \neq 0$.

Equação homogénea associada:

$$a_0\, y^{(n)} + a_1\, y^{(n-1)} + \cdots + a_{n-1}\, y' + a_n\, y = 0$$

Polinómio associado (polinómio característico):

$$P(r) = a_0\, r^n + a_1\, r^{n-1} + \cdots + a_{n-1}\, r + a_n$$

As n raízes do polinómio P(r) permitem determinar n soluções linearmente independentes da equação homógenea, cada uma associada a cada uma dessas raízes (ver como no slide seguinte). Portanto, permitem determinar a solução geral da equação homógenea.

Construção dum sistema fundamental de soluções (base do subespaço das soluções) da EDO linear com coeficientes constantes e homogénea:

Considerem-se as raízes de P(r) identificadas e para cada uma delas real e para cada par delas complexas (se existirem) proceda-se à seguinte associação de soluções (no final do processo ter-se-à n soluções linearmente independentes):

- 1.º Caso: A raíz, r, é real simples.

  Solução: e^{rx}
- 2.º Caso: A raíz, r, é real de mutiplicidade k.

  Soluções: $e^{rx}, xe^{rx}, \ldots, x^{k-1}e^{rx}$
- 3.º Caso: As raízes são complexas conjugadas simples, $\alpha + \beta i$ e $\alpha - \beta i$.

  Soluções: $e^{\alpha x}\cos(\beta x) \quad \text{e} \quad e^{\alpha x}\operatorname{sen}(\beta x)$
- 4.º Caso: As raízes são complexas conjugadas, $\alpha + \beta i$ e $\alpha - \beta i$, com multiplicidade k.

  Soluções: $e^{\alpha x}\cos(\beta x), \; x\,e^{\alpha x}\cos(\beta x), \ldots, \; x^{k-1}e^{\alpha x}\cos(\beta x),$
  $e^{\alpha x}\operatorname{sen}(\beta x), \; x\,e^{\alpha x}\operatorname{sen}(\beta x), \ldots, \; x^{k-1}e^{\alpha x}\operatorname{sen}(\beta x)$

Exemplo: $y^{(5)} + 2y^{(4)} + 4y^{(3)} + 8y^{(2)} + 4y' + 8y = 0$

Polinómio característico: $r^5 + 2r^4 + 4r^3 + 8r^2 + 4r + 8$

Raízes do polinómio característico:
-2 (simples); $i\sqrt{2}$ e $-i\sqrt{2}$, raízes duplas;

Sistema fundamental de soluções:
$\{e^{-2x}\,,\ \cos(\sqrt{2}x)\,,\ x\cos(\sqrt{2}x)\,,\ \operatorname{sen}(\sqrt{2}x)\,,\ x\operatorname{sen}(\sqrt{2}x)\}$

Assim, a solução geral da equação dada é

$$y = B\,e^{-2x} + \big(C_1 + C_2x\big)\cos(\sqrt{2}x) + \big(D_1 + D_2x\big)\operatorname{sen}(\sqrt{2}x)\,,$$

com $B, C_1, C_2, D_1, D_2 \in \mathbb{R}$.

Método dos Coeficientes Indeterminados:

- Método para determinar uma solução particular, aplicável às EDOs lineares de coeficientes constantes completas

$$a_0\, y^{(n)} + a_1\, y^{(n-1)} + \cdots + a_{n-1}\, y' + a_n\, y = b(x) \tag{7}$$

com $b(x)$ da forma

$$b(x) = P_m(x)\, e^{\alpha x} \cos(\beta x) \quad \text{ou} \quad b(x) = P_m(x)\, e^{\alpha x}\, \text{sen}\,(\beta x),$$

onde $P_m(x)$ denota um polinómio de grau $m \in \mathbb{N}_0$ e $\alpha, \beta \in \mathbb{R}$.

- Neste caso, prova-se que existe uma solução particular da equação (7) do tipo

$$y_p(x) = x^k\, e^{\alpha x}\, (P(x) \cos(\beta x) + Q(x)\, \text{sen}\,(\beta x)) \tag{8}$$

onde:

(i) k é a multiplicidade de $\alpha + i\beta$, se $\alpha + i\beta$ for raiz do polinómio característico da equação homogénea associada a (7); Senão, $k = 0$;

(ii) $P(x)$, $Q(x)$ são polinómios de grau m cujos coeficientes terão de ser determinados usando a EDO (7) e a expressão para a solução (8).

Exemplo (Cálculo de solução particular de uma EDO linear de coeficientes constantes completa, usando o método dos coeficientes indeterminados):

$$y' - 3y = e^{3x} \, .$$

Como

$$e^{3x} = P_m(x)\, e^{\alpha x} \cos(\beta x)$$

com $P_m(x) \equiv 1$ (grau zero), $m = 0$, $\alpha = 3$, $\beta = 0$ e 3 é raiz do polinómio característico, com multiplicidade 1, então a solução particular a procurar é da forma

$$y_p = x\ e^{3x} A\,, \quad \text{com } A \in \mathbb{R} \text{ a determinar.}$$

Substituíndo y_p e y_p' na equação:

$$\underbrace{A\, e^{3x} + 3Ax\, e^{3x}}_{y_p'} - 3(\underbrace{A\, x\, e^{3x}}_{y_p}) = e^{3x}$$

obtemos $(A-1)e^{3x} = 0$, e portanto $A = 1$. Assim, $y_p = xe^{3x}$.

Problemas de Cauchy

Teorema (existência e unicidade de solução):

Se $a_0(x), a_1(x), \ldots, a_{n-1}, a_n(x)$ e $b(x)$ são funções contínuas num intervalo I, $a_0(x) \neq 0$, para todo o $x \in I$, então o problema de Cauchy

$$\begin{cases} a_0(x)\,y^{(n)} + a_1(x)\,y^{(n-1)} + \cdots + a_{n-1}(x)\,y' + a_n(x)\,y = b(x) \\ \\ y(x_0) = \beta_0, y'(x_0) = \beta_1, \ldots, y^{n-1}(x_0) = \beta_{n-1}\,, \end{cases}$$

onde $x_0 \in I$ e β_i, $i = 0, 1, \ldots, n-1$, são reais dados, tem nesse intervalo uma e uma só solução.

Exemplo: O problema de Cauchy

$$\begin{cases} y'' + y = 0 \\ y(0) = 0, y'(0) = 2 \end{cases}$$

tem uma solução única em $\mathbb{R}$. Porquê? e Qual?