

Exercícios Resolvidos do Livro  
Geometria Analítica e Álgebra Linear  
de Elon Lages Lima  
(Segunda Edição–Oitava Impressão)

Gustavo de Oliveira

6 de julho de 2018

## Seção 1 – Coordenadas na Reta

**1.** Sejam  $a < b$  respectivamente as coordenadas dos pontos  $A$  e  $B$  sobre o eixo  $E$ . Determine as coordenadas dos pontos  $X_1, \dots, X_{n-1}$  que dividem o segmento  $AB$  em  $n$  partes iguais.

*Solução.* Para  $j = 1, \dots, n-1$ , observamos que  $d(X_j, a) = j d(A, B)/n$ . Seja  $x_j$  a coordenada do ponto  $X_j$ . Então  $|x_j - a| = j|a - b|/n$ , ou seja,  $x_j - a = j(b - a)/n$ , pois  $x_j > a$  e  $b > a$ . Portanto  $x_j = a + j(b - a)/n$ .

**2.** Sejam  $a, x$  e  $b$ , com  $a < x < b$ , as coordenadas dos pontos  $A, X$  e  $B$  sobre um eixo  $\mathcal{E}$ , respectivamente. Dizemos que o ponto  $X$  divide o segmento de reta  $AB$  em *média e extrema razão* se  $X$  satisfaz

$$\frac{d(A, X)}{d(A, B)} = \frac{d(X, B)}{d(A, X)}.$$

O quociente  $d(A, X)/d(A, B)$  é chamado *razão áurea*. Supondo que  $X$  divide o segmento de reta  $AB$  em média e extrema razão, calcule  $x$  em função de  $a$  e  $b$ .

*Solução.* Usando coordenadas, a condição se escreve

$$\frac{|a - x|}{|a - b|} = \frac{|x - b|}{|a - x|}.$$

Como  $a < x < b$ , essa expressão é equivalente a

$$\frac{x - a}{b - a} = \frac{b - x}{x - a},$$

ou seja,

$$x^2 + (b - 3a)x + (a^2 - b^2 + ab) = 0.$$

O discriminante dessa equação é  $\Delta = 5(b-a)^2$ . Portanto as raízes da equação são

$$x_{\pm} = \frac{1}{2}(3a - b \pm \sqrt{5}(b - a)).$$

Usando a condição  $a < x < b$ , obtemos que  $a < x_+ < b$  e  $x_- < a$ . Logo a única raiz no intervalo  $[a, b]$  é  $x_+$ . Portanto o ponto  $X$  procurado tem coordenada

$$x = \frac{1}{2}((3 - \sqrt{5})a + (\sqrt{5} - 1)b).$$

**3.** Seja  $O$  a origem de um eixo  $\mathcal{E}$ , e seja  $A$  o ponto desse eixo cuja coordenada é igual a 1. Qual é a coordenada do ponto  $X$  que divide o segmento de reta  $OA$  em média e extrema razão? No Exercício 2, calcule a razão áurea  $d(O, X)/d(O, A)$  (veja o exercício anterior).

*Solução.* O ponto  $X$  tem coordenada

$$x = \frac{1}{2}((3 - \sqrt{5})0 + (\sqrt{5} - 1)1) = \frac{\sqrt{5} - 1}{2}.$$

A razão áurea é

$$\frac{d(O, X)}{d(O, A)} = \frac{\sqrt{5} - 1}{2}.$$

## Seção 7 – As Equações da Reta

**10.** Sejam  $A = (1, 2)$ ,  $B = (2, 4)$  e  $C = (3, 1)$ . Ache as equações da mediana e da altura do triângulo  $ABC$  que partem do vértice  $A$ .

*Solução.* A mediana que parte do vértice  $A$  é o segmento  $AM$  onde  $M$  é o ponto médio do lado  $BC$ . Calculando  $M$ , obtemos  $M = (5/2, 5/2)$ . A reta que passa por  $A$  e  $M$  tem inclinação  $[(5/2) - 2]/[(5/2) - 1] = 1/3$ , ou seja, a equação dessa reta é da forma  $y = (1/3)x + b$ . Calculando  $b$ , obtemos  $b = 5/3$ . Logo a equação da reta  $AM$  é  $y = (1/3)x + 5/3$ .

A reta que contém a altura do vértice  $A$  é a reta perpendicular ao lado  $BC$  passando por  $A$ . O lado  $BC$  é paralelo a  $OC'$  com  $C' = (1, -5)$ . Logo a equação da reta tem a forma  $x - 5y = c$ . Como a reta passa por  $A$ , devemos ter  $1 - 5(2) = c$ , ou seja,  $c = -9$ . Portanto a equação da reta é  $x - 5y = -9$ .

**22.** Qual é a distância entre as retas paralelas  $x - 3y = 4$  e  $2x - 6y = 1$ ?

*Solução.* Sejam  $r$  e  $s$  as retas definidas por  $x - 3y = 4$  e  $2x - 6y = 1$ , respectivamente. Seja  $t$  a reta perpendicular a  $r$  (e portanto a  $s$ ) que passa pela origem. Uma equação para  $t$  é  $3x + y = 0$ . Calculamos  $P = r \cap t$ , ou seja, resolvemos o sistema  $x - 3y = 4$ ,  $3x + y = 0$ . A solução desse sistema é  $x = 2/5$  e  $y = -6/5$ . Portanto  $P = (2/5, -6/5)$ . Calculamos  $Q = s \cap t$ , ou seja, resolvemos o sistema  $2x - 6y = 1$ ,  $3x + y = 0$ . A solução desse sistema é  $x = 1/20$  e  $y = -3/20$ . Portanto  $Q = (1/20, -3/20)$ . Observamos que  $d(r, s) = d(P, Q)$ . Calculando  $d(P, Q)$ , concluímos que  $d(r, s) = 7/(2\sqrt{10})$ .

## Seção 12 – Equação da Circunferência

4. Qual é a equação da circunferência que passa pelos pontos  $A = (1, 2)$ ,  $B = (3, 4)$  e tem o centro sobre o eixo  $OY$ ?

*Solução.* Como o centro da circunferência está sobre o eixo  $OY$ , a equação da circunferência tem a forma  $x^2 + (y - b)^2 = r^2$ . Como  $A$  e  $B$  pertencem à circunferência, devemos ter

$$\begin{aligned} 1 + (2 - b)^2 &= r^2 \\ 9 + (4 - b)^2 &= r^2. \end{aligned}$$

Resolvendo esse sistema, obtemos  $b = 5$  e  $r = \sqrt{10}$ . Portanto a equação da circunferência é  $x^2 + (y - 5)^2 = 10$ .

5. Escreva a equação da circunferência que tem centro no ponto  $P = (2, 5)$  e é tangente à reta  $y = 3x + 1$ .

*Solução.* A equação da circunferência tem a forma  $(x - 2)^2 + (y - 5)^2 = r^2$ . Para que a circunferência seja tangente à reta, o sistema

$$\begin{aligned} (x - 2)^2 + (y - 5)^2 &= r^2 \\ y &= 3x + 1 \end{aligned}$$

deve possuir apenas uma solução. Substituindo a segunda equação na primeira, obtemos  $10x^2 - 28x + 20 - r^2 = 0$ . Essa equação em  $x$  tem apenas uma solução se e somente se  $28^2 - 800 + 40r^2 = 0$ , ou seja,  $r = \sqrt{2/5}$ . Portanto a equação da circunferência é  $(x - 2)^2 + (y - 5)^2 = 2/5$ .

## Seção 14 – Vetores no Plano

2. Prove geometricamente que um quadrilátero é um paralelogramo se, e somente se, suas diagonais se cortam mutuamente ao meio.

*Solução.* ( $\Rightarrow$ ) Suponha que o quadrilátero  $ABCD$  é um paralelogramo. O paralelogramo é formado por dois pares de lados. Em cada par de lados, os lados são paralelos e têm o mesmo comprimento. Portanto  $\overrightarrow{AD} = \overrightarrow{BC}$  e  $\overrightarrow{AB} = \overrightarrow{DC}$ . Seja  $P$  o ponto médio de  $DB$ , e seja  $Q$  o ponto médio de  $AC$ . Vamos provar que  $Q = P$ . Escolhemos um sistema de coordenadas  $OXY$  de modo que  $A = (0, 0)$ ,  $B = (b, 0)$  e  $D = (c, d)$ . Logo  $\overrightarrow{AD} = (c, d)$  e  $C = B + \overrightarrow{AD} = (b + c, d)$ . Calculando os pontos  $P$  e  $Q$ , obtemos

$$P = \left( \frac{c+b}{2}, \frac{d+0}{2} \right) = \left( \frac{b+c}{2}, \frac{d}{2} \right),$$

$$Q = \left( \frac{b+c+0}{2}, \frac{d+0}{2} \right) = \left( \frac{b+c}{2}, \frac{d}{2} \right).$$

Portanto  $P = Q$ .

( $\Leftarrow$ ) Seja  $P$  o ponto médio de  $DB$ , e seja  $Q$  o ponto médio de  $AC$ . Suponha que as diagonais do paralelogramo se cortam mutuamente ao meio, ou seja, suponha que  $P = Q$ . Escolhemos um sistema de coordenadas  $OXY$  de modo que  $A = (0, 0)$ ,  $B = (b, 0)$  e  $D = (c, d)$ . Temos então  $\overrightarrow{AD} = (c, d)$  e  $\overrightarrow{AB} = (b, 0)$ . Escrevemos  $C = (x, y)$ . Vamos determinar  $x$  e  $y$ . Calculando os pontos  $P$  e  $Q$ , obtemos

$$P = \left( \frac{c+b}{2}, \frac{d}{2} \right),$$

$$Q = \left( \frac{x}{2}, \frac{y}{2} \right).$$

A igualdade  $P = Q$  implica  $x = c + b$  e  $y = d$ . Logo  $(x, y) = (b + c, d)$ , ou seja,  $C = (b + c, d)$ . Portanto  $C = B + \overrightarrow{AD}$  e  $C = D + \overrightarrow{AB}$ , ou seja,  $\overrightarrow{BC} = \overrightarrow{AD}$  e  $\overrightarrow{DC} = \overrightarrow{AB}$ . Isso implica que  $ABCD$  é um paralelogramo.

## Seção 15 – Operações com Vetores

1. Dados os vetores  $u$  e  $v$ , prove que as seguintes afirmações são equivalentes:

- (a) Uma combinação linear  $\alpha u + \beta v$  só pode ser igual a zero quando  $\alpha = 0$  e  $\beta = 0$ .
- (b) Se  $\alpha u + \beta v = \alpha' u + \beta' v$ , então  $\alpha = \alpha'$  e  $\beta = \beta'$ .
- (c) Nenhum dos vetores  $u$  e  $v$  é múltiplo do outro.
- (d) Para  $u = (a, b)$  e  $v = (a', b')$ , temos  $ab' - a'b \neq 0$ .
- (e) Todo vetor do plano é combinação linear de  $u$  e  $v$ .

(Neste exercício, devem ser provadas as implicações  $(a) \Rightarrow (b) \Rightarrow (c) \Rightarrow (d) \Rightarrow (e) \Rightarrow (a)$ .)

*Solução.*  $(a) \Rightarrow (b)$ . Se  $\alpha u + \beta v = \alpha' u + \beta' v$ , então  $(\alpha - \alpha')u + (\beta - \beta')v = 0$ . Logo  $(a)$  implica que  $\alpha - \alpha' = 0$  e  $\beta - \beta' = 0$ , ou seja,  $\alpha = \alpha'$  e  $\beta = \beta'$ .

$(b) \Rightarrow (c)$ . Vamos provar que  $-(c)$  implica  $-(b)$ . Se existe  $\lambda$  tal que  $u = \lambda v$ , então  $\alpha u + \beta v = \alpha' u + \beta' v$  com  $\alpha = 1$ ,  $\beta = -\lambda$ ,  $\alpha' = 0$  e  $\beta' = 0$ , onde  $\alpha \neq \alpha'$  e  $\beta \neq \beta'$ , ou seja, a afirmação  $-(b)$  é verdadeira.

$(c) \Rightarrow (d)$ . Vamos provar que  $-(d)$  implica  $-(c)$ . Suponha que  $\alpha\beta' - \alpha'\beta = 0$ . Se  $\alpha = \alpha' = \beta = \beta'$ , então  $u = 0$  e  $v = 0$ , e portanto  $u = \lambda v$  para todo  $\lambda$ , ou seja, a afirmação  $-(c)$  é verdadeira. Se  $\alpha = \beta = 0$ , então  $u = 0$ , e portanto  $u = 0v$ . Logo  $-(c)$  é verdadeira. Se  $\alpha \neq 0$  e  $\beta \neq 0$ , então  $\beta'/\beta = \alpha'/\alpha = \lambda$  para alguma constante  $\lambda$ . Logo  $\alpha' = \lambda\alpha$  e  $\beta' = \lambda\beta$ , ou seja,  $(\alpha', \beta') = \lambda(\alpha, \beta)$ , ou seja  $v = \lambda u$ , ou seja, a afirmação  $-(c)$  é verdadeira.

$(d) \Rightarrow (e)$ . Sejam  $u = (\alpha, \beta)$ ,  $v = (\alpha', \beta')$  e  $w = (\gamma, \delta)$ . Então a equação  $w = xu + yv$  é equivalente ao sistema de equações

$$\begin{aligned}\alpha x + \alpha' y &= \lambda \\ \beta x + \beta' y &= \gamma.\end{aligned}$$

Como  $\alpha\beta' - \alpha'\beta \neq 0$ , esse sistema possui apenas uma solução. De fato, a solução é

$$x = \frac{\beta'\gamma - \alpha'\delta}{\beta'\alpha - \alpha'\beta}, \quad y = \frac{\beta\gamma - \alpha\delta}{\beta\alpha' - \alpha\beta'}.$$

$(e) \Rightarrow (a)$ . Temos que  $xu + yv = 0$  para  $x$  e  $y$  únicos. Como  $x = 0$  e  $y = 0$  é solução desse sistema, essa deve ser a única solução, ou seja, a afirmação  $(a)$  é verdadeira.

**7.** Seja  $P$  um ponto interior ao triângulo  $ABC$  tal que  $\overrightarrow{PA} + \overrightarrow{PB} + \overrightarrow{PC} = 0$ . Prove que as retas  $AP$ ,  $BP$  e  $CP$  são medianas de  $ABC$ , logo  $P$  é o bari-centro desse triângulo.

*Solução.* Seja  $Q$  o ponto de intersecção da reta  $BP$  com o segmento  $AC$ . Observamos que  $\overrightarrow{QA} = \alpha\overrightarrow{CA}$  para  $\alpha \in \mathbb{R}$ . Logo

$$\overrightarrow{QC} = \overrightarrow{QA} + \overrightarrow{AC} = \alpha\overrightarrow{CA} - \overrightarrow{CA} = (\alpha - 1)\overrightarrow{CA}.$$

Vamos provar que  $Q$  é o ponto médio de  $AC$ , ou seja, vamos provar que  $\alpha = 1/2$ . Escrevemos

$$\begin{aligned}\overrightarrow{PA} &= \overrightarrow{PQ} + \overrightarrow{QA} = \overrightarrow{PQ} + \alpha\overrightarrow{CA}, \\ \overrightarrow{PB} &= \overrightarrow{PQ} + \overrightarrow{QB} = \overrightarrow{PQ} + (\alpha - 1)\overrightarrow{CA} + \overrightarrow{CB}, \\ \overrightarrow{PC} &= \overrightarrow{PQ} + \overrightarrow{QC} = \overrightarrow{PQ} + (\alpha - 1)\overrightarrow{CA}.\end{aligned}$$

Logo

$$\overrightarrow{PA} + \overrightarrow{PB} + \overrightarrow{PC} = 3\overrightarrow{PQ} + (3\alpha - 2)\overrightarrow{CA} + \overrightarrow{CB}.$$

Além disso,

$$\overrightarrow{BQ} = \overrightarrow{BC} + \overrightarrow{CQ} = -\overrightarrow{CB} - \overrightarrow{QC} = -\overrightarrow{CB} + (1 - \alpha)\overrightarrow{CA}.$$

Para algum  $\beta \in \mathbb{R}$ , temos

$$\overrightarrow{PQ} = \beta\overrightarrow{BQ}.$$

Portanto

$$\overrightarrow{PQ} = \beta\overrightarrow{BQ} = -\beta\overrightarrow{CB} + \beta(1 - \alpha)\overrightarrow{CA}.$$

Consequentemente

$$\overrightarrow{PA} + \overrightarrow{PB} + \overrightarrow{PC} = (3\beta(1 - \alpha) + 3\alpha - 2)\overrightarrow{CA} + (1 - 3\beta)\overrightarrow{CB}.$$

Por outro lado, temos  $\overrightarrow{PA} + \overrightarrow{PB} + \overrightarrow{PC} = 0$ . Logo

$$(3\beta(1 - \alpha) + 3\alpha - 2)\overrightarrow{CA} + (1 - 3\beta)\overrightarrow{CB} = 0.$$

Como  $\overrightarrow{CA}$  e  $\overrightarrow{CB}$  são linearmente independentes, essa igualdade implica (veja o Exercício 1 da Seção 15)

$$(3\beta(1 - \alpha) + 3\alpha - 2) = 0 \quad \text{e} \quad 1 - 3\beta = 0.$$

A segunda equação implica  $\beta = 1/3$ . Substituindo esse valor de  $\beta$  na primeira equação, obtemos  $3(1/3)(1 - \alpha) + 3\alpha - 2 = 0$ , ou seja,  $\alpha = 1/2$ . Portanto  $Q$  é o ponto médio de  $AC$ . Renomeando os pontos, obtemos a demonstração para as medianas correspondentes aos outros vértices do triângulo.

## Seção 16 – Equação da Elipse

**10.** Quais são as tangentes à elipse  $x^2 + 4y^2 = 32$  que têm inclinação igual a  $1/2$ ?

*Solução.* Uma reta com inclinação  $1/2$  é dada por  $y = (1/2)x + b$  para  $b \in \mathbb{R}$ . Vamos determinar os valores de  $b$  para os quais a reta  $y = (1/2)x + b$  é tangente à elipse  $x^2 + 4y^2 = 32$ , ou seja, vamos determinar os valores de  $b$  para os quais o sistema

$$\begin{aligned}x^2 + 4y^2 &= 32 \\ y &= (1/2)x + b\end{aligned}$$

tem apenas uma solução. Substituindo a segunda equação na primeira e desenvolvendo, obtemos

$$2x^2 + 4bx + (4b^2 - 32) = 0.$$

Essa equação possui apenas uma solução se, e somente se, o discriminante da equação é igual a zero, ou seja,

$$\Delta = -16b^2 + 16^2 = 0.$$

Isso implica  $b = \pm 4$ . Portanto, as retas tangentes são

$$y = \frac{1}{2}x - 4 \quad \text{e} \quad y = \frac{1}{2}x + 4.$$

## Seção 17 – Equação da Hipérbole

**2.** Para todo ponto  $P = (m, n)$  na hipérbole  $H : x^2/a^2 - y^2/b^2 = 1$ , mostre que a reta  $r : (m/a^2)x - (n/b^2)y = 1$  tem apenas o ponto  $P$  em comum com  $H$ . A reta  $r$  chama-se a *tangente* a  $H$  no ponto  $P$ .

*Solução.* A reta  $r$  é tangente à hipérbole  $H$  no ponto  $P$  se, e somente se,  $x = m$  e  $y = n$  é a única solução do sistema

$$\begin{aligned} (m/a^2)x - (n/b^2)y &= 1 \\ x^2/a^2 - y^2/b^2 &= 1. \end{aligned}$$

A primeira equação implica

$$x = \frac{a^2}{m} \left( 1 + \frac{n}{b^2} \right).$$

Substituindo essa expressão para  $x$  na segunda equação e desenvolvendo, obtemos

$$(a^2n^2 - b^2m^2)y^2 + b^2a^22ny + b^4(a^2 - m^2) = 0.$$

Como  $P$  pertence à hipérbole, temos  $a^2n^2 - b^2m^2 = -a^2b^2$ . Substituindo essa expressão na equação anterior e simplificado, encontramos

$$-a^2y^2 + a^22ny + b^2(a^2 - m^2) = 0.$$

Calculando o discriminante  $\Delta$  dessa equação quadrática, obtemos

$$\Delta = 4a^2(a^2n^2 - b^2m^2 + b^2a^2) = 4a^2(-a^2b^2 + b^2a^2) = 4a^2(0) = 0.$$

Nesse cálculo, usamos novamente que  $P$  pertence a  $H$ . Como  $\Delta = 0$ , a equação para  $y$  possui apenas uma solução. Associado a essa solução temos apenas um valor para  $x$ . Portanto o sistema de equações possui apenas uma solução  $(x, y)$ , ou seja, a reta  $r$  é tangente à hipérbole  $H$ .

## Seção 20 – Formas Quadráticas

1. Para cada uma das formas quadráticas abaixo, execute as seguintes tarefas:

1. Escreva sua matriz e sua equação característica;
2. Obtenha seus autovalores;
3. Descreva suas linhas de nível;
4. Ache autovetores unitários ortogonais  $u$  e  $u^*$ ;
5. Determine os novos eixos em cujas coordenadas a forma quadrática se exprime como  $A's^2 + C't^2$ ;
6. Ache os focos da cônica  $A's^2 + C't^2 = 1$  em termos das coordenadas  $x$  e  $y$ .

As formas quadráticas são:

- (a)  $\varphi(x, y) = x^2 + xy + y^2$ .
- (b)  $\varphi(x, y) = xy$ .
- (c)  $\varphi(x, y) = x^2 - 6xy + 9y^2$ .
- (d)  $\varphi(x, y) = x^2 + xy - y^2$ .
- (e)  $\varphi(x, y) = x^2 + 2xy - 3y^2$ .
- (f)  $\varphi(x, y) = x^2 + 24xy - 6y^2$ .

*Solução.* (a) A matriz de  $\varphi$  é

$$\begin{bmatrix} 1 & 1/2 \\ 1/2 & 1 \end{bmatrix}.$$

A equação característica de  $\varphi$  é  $\lambda^2 - 2\lambda + 3/4 = 0$ . Logo os autovalores são  $\lambda_1 = 3/2$  e  $\lambda_2 = 1/2$ . Os autovetores unitários correspondentes são

$$u = \left( \frac{1}{\sqrt{2}}, \frac{1}{\sqrt{2}} \right), \quad u^* = \left( \frac{-1}{\sqrt{2}}, \frac{1}{\sqrt{2}} \right).$$

Consequentemente, se efetuarmos a mudança de variáveis

$$\begin{aligned} x &= \frac{1}{\sqrt{2}}s - \frac{1}{\sqrt{2}}t, \\ y &= \frac{1}{\sqrt{2}}s + \frac{1}{\sqrt{2}}t, \end{aligned}$$



a forma quadrática assume a forma

$$\bar{\varphi}(s, t) = \frac{3}{2}s^2 + \frac{1}{2}t^2 = \frac{s^2}{2/3} + \frac{t^2}{2}.$$

Para  $d < 0$ , as linhas de nível  $\bar{\varphi}(s, t) = d$  são o conjunto vazio. Para  $d = 0$ , a linha de nível  $\bar{\varphi}(s, t) = d$  é o ponto  $(0, 0)$ . Para  $d > 0$ , as linhas de nível  $\bar{\varphi}(s, t) = d$  são elipses. Nesse caso, temos uma elipse com  $c^2 = a^2 + b^2$ , ou seja,  $c = 2\sqrt{2d/3}$ . Portanto os focos da elipse são  $(-c, 0)$  e  $(c, 0)$ , no sistema  $s$  e  $t$ . Em termos das coordenadas  $x$  e  $y$ , os focos são, respectivamente,

$$\left( \frac{-2\sqrt{d}}{\sqrt{3}}, \frac{-2\sqrt{d}}{\sqrt{3}} \right), \quad \left( \frac{2\sqrt{d}}{\sqrt{3}}, \frac{2\sqrt{d}}{\sqrt{3}} \right).$$

(c) A matriz de  $\varphi$  é

$$\begin{bmatrix} 1 & -3 \\ -3 & 9 \end{bmatrix}.$$

A equação característica de  $\varphi$  é  $\lambda^2 - 10\lambda = 0$ . Logo os autovalores são  $\lambda_1 = 0$  e  $\lambda_2 = 10$ . Os autovetores unitários correspondentes são

$$u = \left( \frac{3}{\sqrt{10}}, \frac{1}{\sqrt{10}} \right), \quad u^* = \left( \frac{-1}{\sqrt{10}}, \frac{3}{\sqrt{10}} \right).$$

Consequentemente, se efetuarmos a mudança de variáveis

$$\begin{aligned} x &= \frac{3}{\sqrt{10}}s - \frac{1}{\sqrt{10}}t, \\ y &= \frac{1}{\sqrt{10}}s + \frac{3}{\sqrt{10}}t, \end{aligned}$$

a forma quadrática assume a forma

$$\bar{\varphi}(s, t) = 10t^2.$$

Para  $d < 0$ , as linhas de nível  $\bar{\varphi}(s, t) = d$  são o conjunto vazio. Para  $d = 0$ , a linha de nível  $\bar{\varphi}(s, t) = d$  é a reta horizontal  $t = 0$  que passa pela origem. Para  $d > 0$ , as linhas de nível  $\bar{\varphi}(s, t) = d$  são o par de retas horizontais  $t = \pm\sqrt{d/10}$ . Em termos das coordenadas  $x$  e  $y$ , a reta  $t = 0$  é dada por  $x - 3y = 0$ , e as retas  $t = \pm\sqrt{d/10}$  são dadas por  $x - 3y = \mp\sqrt{d}$ .

(d) A matriz de  $\varphi$  é

$$\begin{bmatrix} 1 & 1/2 \\ 1/2 & -1 \end{bmatrix}.$$

A equação característica de  $\varphi$  é  $\lambda^2 - 5/4 = 0$ . Logo os autovalores são  $\lambda_1 = \sqrt{5}/2$  e  $\lambda_2 = -\sqrt{5}/2$ . Os autovetores unitários correspondentes são

$$u = \left( \frac{1}{\sqrt{10 - 4\sqrt{5}}}, \frac{\sqrt{5} - 2}{\sqrt{10 - 4\sqrt{5}}} \right), \quad u^* = \left( \frac{2 - \sqrt{5}}{\sqrt{10 - 4\sqrt{5}}}, \frac{1}{\sqrt{10 - 4\sqrt{5}}} \right).$$

Consequentemente, se efetuarmos a mudança de variáveis

$$\begin{aligned}x &= u_1 s - u_2 t, \\y &= u_2 s + u_1 t,\end{aligned}$$

onde  $u_1$  e  $u_2$  são as coordenadas de  $u$ , a forma quadrática assume a forma

$$\bar{\varphi}(s, t) = \frac{\sqrt{5}}{2}s^2 - \frac{\sqrt{5}}{2}t^2 = \frac{s^2}{2/\sqrt{5}} - \frac{t^2}{2/\sqrt{5}}.$$

Para  $d = 0$ , as linhas de nível  $\bar{\varphi}(s, t) = d$  são as retas  $t = \pm s$ . Para  $d \neq 0$ , as linhas de nível  $\bar{\varphi}(s, t) = d$  são hipérboles. Em particular, para  $d > 0$ , temos uma hipérbole com  $c^2 = a^2 + b^2$ , ou seja,  $c = 2\sqrt{d}/\sqrt{\sqrt{5}}$ . Portanto os focos da hipérbole são  $(-c, 0)$  e  $(c, 0)$ , no sistema  $s$  e  $t$ . Em termos das coordenadas  $x$  e  $y$ , os focos são, respectivamente,

$$\left( \frac{-2}{\sqrt{10\sqrt{5}-20}}, \frac{4-2\sqrt{5}}{\sqrt{10\sqrt{5}-20}} \right), \quad \left( \frac{2}{\sqrt{10\sqrt{5}-20}}, \frac{2\sqrt{5}-4}{\sqrt{10\sqrt{5}-20}} \right).$$

(f) A matriz de  $\varphi$  é

$$\begin{bmatrix} 1 & 12 \\ 12 & -6 \end{bmatrix}.$$

A equação característica de  $\varphi$  é  $\lambda^2 + 5\lambda - 150 = 0$ . Logo os autovalores são  $\lambda_1 = -15$  e  $\lambda_2 = 10$ . Os autovetores unitários correspondentes são

$$u = \left( \frac{3}{5}, \frac{-4}{5} \right), \quad u^* = \left( \frac{4}{5}, \frac{3}{5} \right).$$

Consequentemente, se efetuarmos a mudança de variáveis

$$\begin{aligned}x &= \frac{3}{5}s + \frac{4}{5}t, \\y &= -\frac{4}{5}s + \frac{3}{5}t,\end{aligned}$$

a forma quadrática assume a forma

$$\bar{\varphi}(s, t) = -15s^2 + 10t^2 = \frac{s^2}{-1/15} + \frac{t^2}{1/10}.$$

Para  $d = 0$ , as linhas de nível  $\bar{\varphi}(s, t) = d$  são as retas  $t = \pm\sqrt{3/2}s$ . Para  $d \neq 0$ , as linhas de nível  $\bar{\varphi}(s, t) = d$  são hipérboles. Em particular, para  $d < 0$ , temos uma hipérbole com  $c^2 = a^2 + b^2$ , ou seja,  $c = \sqrt{6|d|}/6$ . Nesse caso, os focos da hipérbole são  $(-c, 0)$  e  $(c, 0)$ , no sistema  $s$  e  $t$ . Em termos das coordenadas  $x$  e  $y$ , os focos são, respectivamente,

$$\left( -\frac{3}{5}c, \frac{4}{5}c \right), \quad \left( \frac{3}{5}c, -\frac{4}{5}c \right).$$

## Seção 23 – Transformações Lineares

**11.** Uma transformação linear  $T : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$  de posto 2 transforma toda reta numa reta. Prove isto.

*Solução.* Seja  $T(x, y) = (ax + by, cx + dy)$  e seja  $M$  a matriz de  $T$ . Como  $M$  tem posto 2, os vetores-coluna de  $M$  são não-colineares. Se  $r$  é uma reta vertical, então  $r$  é formada pelos pontos  $(x, y) = (\alpha, t)$  para  $t \in \mathbb{R}$ . Logo, os pontos

$$T(x, y) = T(\alpha, t) = (a\alpha + bt, c\alpha + dt) = \alpha(a, c) + t(b, d)$$

para  $t \in \mathbb{R}$  formam uma reta, pois  $(b, d) \neq (0, 0)$  (caso contrário teríamos  $ad - bc = 0$ , o que é impossível). Se  $r$  é uma reta não-vertical, então  $r$  é o conjunto dos pontos  $(x, y) = (t, \alpha t + \beta)$  para  $t \in \mathbb{R}$ . Logo, os pontos

$$T(x, y) = T(t, \alpha t + \beta) = \beta(b, d) + t((a, c) + \alpha(b, d))$$

para  $t \in \mathbb{R}$  formam uma reta, pois não existe  $\alpha$  tal que  $(a, c) + \alpha(b, d) = 0$  (caso contrário  $(a, c)$  e  $(b, d)$  seriam colineares).

**15.** Seja  $T : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$  uma transformação linear invertível. Mostre que  $T$  transforma retas paralelas em retas paralelas, portanto paralelogramos em paralelogramos. E losangos?

*Solução.* Seja  $T(x, y) = (ax + by, cx + dy)$  e seja  $M$  a matriz de  $T$ . Como  $T$  é invertível, para todo  $(m, n) \in \mathbb{R}^2$  existe apenas um vetor  $(x, y) \in \mathbb{R}^2$  tal que  $T(x, y) = (m, n)$ . Dito de outra forma, o sistema de equações

$$\begin{aligned} ax + by &= m \\ cx + dy &= n \end{aligned}$$

possui apenas uma solução. Portanto as retas  $ax + by = m$  e  $cx + dy = n$  são concorrentes. Logo os vetores  $(a, b)$  e  $(c, d)$  são não-colineares, ou seja,  $ad - bc \neq 0$ . Isso implica que os vetores  $(a, c)$  e  $(b, d)$  são não-colineares, ou seja, que a matriz de  $M$  tem posto 2. Pela solução do Exercício 11, para qualquer valor de  $\alpha$ , a transformação  $T$  mapeia a reta  $x = \alpha$  em uma reta paralela ao vetor  $(b, d)$  que passa por  $(a, c)$ . Isso mostra que  $T$  transforma as retas paralelas  $x = \alpha$  e  $x = \alpha'$  em retas paralelas ao vetor  $(b, d)$ . Pela solução do Exercício 11, a transformação  $T$  mapeia a reta  $y = \alpha x + \beta$  em uma reta paralela ao vetor  $(a, c) + \alpha(b, d)$  que passa por  $(a, c)$ . Analogamente, a transformação  $T$  mapeia a reta  $y = \alpha'x + \beta$  em uma reta paralela ao vetor  $(a, c) + \alpha'(b, d)$  que passa por  $(a, c)$ . Como  $(a, b) + \alpha(c, d)$  e  $(a, c) + \alpha'(b, d)$  são vetores colineares, concluímos que  $T$  transforma retas não-verticais paralelas em retas não-verticais paralelas. Além disso, concluímos que  $T$  transforma

paralelogramos em paralelogramos. A transformação  $T$  não mapeia losangos em losangos, em geral. De fato, considere o quadrado cujos vértices são os pontos  $A = (0, 0)$ ,  $B = (1, 0)$ ,  $C = (1, 1)$  e  $D = (0, 1)$  (esse é um exemplo de losango). Observamos que os vetores unitários  $\overrightarrow{AB} = (1, 0)$  e  $\overrightarrow{AD} = (0, 1)$  são mapeados nos vetores  $(a, c)$  e  $(b, d)$ , que não são unitários, em geral. Logo o quadrado  $ABCD$  não é transformado em um quadrado, em geral.

**17.** Dados  $u = (1, 2)$ ,  $v = (3, 4)$ ,  $u' = (5, 6)$  e  $v' = (7, 8)$ , ache uma transformação linear  $T : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$  tal que  $Tu = u'$  e  $Tv = v'$ .

*Solução.* Seja  $T(x, y) = (ax + by, cx + dy)$ , onde  $a, b, c, d \in \mathbb{R}$ . Procuramos constantes  $a, b, c$  e  $d$  tais que  $T(1, 2) = (5, 6)$  e  $T(3, 4) = (7, 8)$ , ou seja,  $(a + 2b, c + 2d) = (5, 6)$  e  $(3a + 4b, 3c + 4d) = (7, 8)$ , ou seja,  $a + 2b = 5$ ,  $c + 2d = 6$  e  $3a + 4b = 7$ ,  $3c + 4d = 8$ . Obtemos portanto um sistema de quatro equações e quatro incógnitas,  $a, b, c$  e  $d$ . De fato, obtemos dois sistemas de duas equações e duas incógnitas, desacoplados:

$$\begin{array}{ll} a + 2b = 5 & c + 2d = 6 \\ 3a + 4b = 7 & 3c + 4d = 8. \end{array}$$

Resolvendo esses sistemas, obtemos  $a = -3$ ,  $b = 4$ ,  $c = -4$  e  $d = 5$ . Portanto, a transformação linear procurada é

$$T(x, y) = (-3x + 4y, -4x + 5y).$$

## Seção 24 – Coordenadas no Espaço

**5.** Escreva a equação do plano vertical que passa pelos pontos  $P = (2, 3, 4)$  e  $Q = (1, 1, 758)$ .

*Solução.* O plano vertical que passa por  $P$  e  $Q$  deve conter todos os pontos da forma  $(2, 3, z)$  e  $(1, 1, z')$  para  $z \in \mathbb{R}$  e  $z' \in \mathbb{R}$ . Em particular, o plano vertical deve conter os pontos  $P' = (2, 3, 0)$  e  $Q' = (1, 1, 0)$ . Além disso, observamos que o plano vertical deve conter a reta  $\overrightarrow{P'Q'}$ . As coordenadas de  $P'$  e  $Q'$  no plano  $\Pi_{xy}$  são  $(2, 3)$  e  $(1, 1)$ . Portanto  $\overrightarrow{P'Q'} = (-1, -2)$  no plano  $\Pi_{xy}$ . O vetor  $v = (2, -1)$  é ortogonal a  $\overrightarrow{P'Q'}$ . Logo a equação da reta  $P'Q'$  no plano  $\Pi_{xy}$  é  $2x - y = c = 2(1) - 1(1) = 1$ , ou seja,  $2x - y = 1$ . O plano vertical que passa por  $P$  e  $Q$  é formado por todos os pontos  $(x, y, z)$  tais que  $2x - y = 1$ . Essa é a equação do plano.

**7.** Escreva a equação geral de um plano vertical.

*Solução.* A equação geral de um plano vertical é  $ax + by = c$ , onde  $a, b$  e  $c$  são números reais. De fato, o conjunto de todos os pontos  $(x, y, z)$  tais

que  $ax + by = c$  forma um plano que contém o eixo  $OZ$  ou é paralelo ao eixo  $OZ$  (veja a solução do Exercício 5).

## Seção 28 – Vetores no Espaço

3. Seja  $u = (a, b, c)$  um vetor unitário, com  $abc \neq 0$ . Determine o valor de  $t$  de modo que, pondo  $v = (-bt, at, 0)$  e  $w = (act, bct - 1/t)$ , os vetores  $u$ ,  $v$  e  $w$  sejam unitários e mutuamente ortogonais.

*Solução.* Como  $u$  é unitário, temos  $a^2 + b^2 + c^2 = 1$ . Observamos que  $u \cdot v = 0$  e  $v \cdot w = 0$  para qualquer valor de  $t$ . Por outro lado,  $u \cdot w = 0$  implica  $t = \pm 1/\sqrt{a^2 + b^2}$ . Para esses valores de  $t$ , obtemos  $\|v\|^2 = (b^2 + a^2)t^2 = 1$  e  $\|w\|^2 = c^2 + a^2 + b^2 = 1$ . A condição  $abc \neq 0$  pode ser substituída por  $a^2 + b^2 \neq 0$ .

## Seção 29 – Equação do Plano

2. Obtenha uma equação para o plano que contém  $P$  e é perpendicular ao segmento de reta  $AB$  nos seguintes casos:

- (a)  $P = (0, 0, 0)$ ,  $A = (1, 2, 3)$  e  $B = (2, -1, 2)$ .
- (b)  $P = (1, 1, -2)$ ,  $A = (3, 5, 2)$  e  $B = (7, 1, 12)$ .
- (c)  $P = (3, 3, 3)$ ,  $A = (2, 2, 2)$  e  $B = (4, 4, 4)$ .
- (d)  $P = (x_0, y_0, z_0)$ ,  $A = (x_1, y_1, z_1)$  e  $B = (x_2, y_2, z_2)$ .

*Solução.* (a) Observamos que o plano é perpendicular à reta  $AB$  se e somente se o plano é perpendicular à reta  $OB'$  com  $B' = (1, -3, -1)$ . Logo uma equação para o plano é  $x - 3y - z = d$  para alguma constante  $d$ . Como  $P$  pertence ao plano, devemos ter  $1(0) - 3(0) - 1(0) = d$ , ou seja,  $d = 0$ . Portanto uma equação do plano é  $x - 3y - z = 0$ .

(b) Procedendo como no item (a), obtemos a equação  $4x - 4y + 10z = -20$ .

(c) Procedendo como no item (a), obtemos a equação  $2x + 2y + 2z = 18$ .

(d) Procedendo como no item (a), obtemos a equação  $(x_2 - x_1)x + (y_2 - y_1)y + (z_2 - z_1)z = (x_2 - x_1)x_0 + (y_2 - y_1)y_0 + (z_2 - z_1)z_0$ .

4. Sejam  $A = (-1, 1, 2)$ ,  $B = (2, 3, 5)$  e  $C = (1, 3, -2)$ . Obtenha uma equação para o plano que contém a reta  $AB$  e o ponto  $C$ .

*Solução.* Procuramos um vetor  $v = (a, b, c)$  tal que  $\langle v, \overrightarrow{AB} \rangle = 0$  e  $\langle v, \overrightarrow{AC} \rangle = 0$ . Calculamos  $\overrightarrow{AB} = (3, 2, 3)$  e  $\overrightarrow{AC} = (2, 2, -4)$ . Com isso

obtemos o seguinte sistema de equações para  $(a, b, c)$ :

$$\begin{aligned}3a + 2b + 3c &= 0 \\ 2a + 2b - 4c &= 0.\end{aligned}$$

Escrevemos

$$\begin{aligned}3a + 2b &= -3c \\ 2a + 2b &= 4c\end{aligned}$$

e resolvemos para  $a$  e  $b$  considerando  $c$  como um parâmetro. Obtemos que  $(-7c, 9c, c)$  para  $c \in \mathbb{R}$  são as soluções do sistema original. Em particular, o vetor  $v = (-7, 9, 1)$  é solução do sistema. Portanto, uma equação do plano é  $-7x + 9y + z = d$  para alguma constante  $d$ . Como  $A$  pertence ao plano, devemos ter  $-7(-1) + 9(1) + 1(2) = d$ , ou seja,  $d = 18$ . Portanto, uma equação para o plano é  $-7x + 9y + z = 18$ .

## Seção 31 - Sistemas de Equações Lineares com Três Incógnitas

1. Para cada um dos sistemas a seguir, decida se existem ou não soluções. No caso afirmativo, exiba todas as soluções do sistema em termos de um ou dois parâmetros independentes.

$$\begin{array}{lll} \text{(a)} & \begin{array}{l} x + 2y + 3z = 4 \\ 2x + 3y + 4z = 5 \end{array} & \begin{array}{l} \text{(b)} \\ 2x - y + 5z = 3 \\ 4x - 2y + 10z = 5 \end{array} & \begin{array}{l} \text{(c)} \\ 6x - 4y + 12z = 2 \\ 9x - 6y + 18z = 3 \end{array} \end{array}$$

*Solução.* (a) Observamos que os vetores  $l_1 = (1, 2, 3)$  e  $l_2 = (2, 3, 4)$  não são colineares. Logo os planos definidos pelas equações se intersectam segundo uma reta, ou seja, o sistema possui soluções. A matriz aumentada do sistema é

$$\begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 \\ 2 & 3 & 4 & 5 \end{bmatrix}.$$

Escalonando essa matriz, obtemos

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & -2 \\ 0 & 1 & 2 & 3 \end{bmatrix}.$$

Portanto as soluções do sistema são  $x = -2 + t$ ,  $y = 3 - 2t$ ,  $z = t$  para  $t \in \mathbb{R}$ .

(b) Observamos que os vetores  $l_1 = (2, -1, 5)$  e  $l_2 = (4, -2, 10)$  são colineares e os vetores  $L_1 = (2, -1, 5, 3)$  e  $L_2 = (4, -2, 10, 5)$  não são colineares. Logo os planos definidos pelas equações são paralelos, ou seja, o sistema não possui soluções.

(c) Observamos que os vetores  $l_1 = (6, -4, 12)$  e  $l_2 = (9, -6, 18)$  são colineares e os vetores  $L_1 = (6, -4, 12, 2)$  e  $L_2 = (9, -6, 18, 3)$  são colineares. Logo os planos definidos pelas equações são coincidentes, ou seja, o sistema possui soluções. A matriz aumentada do sistema é

$$\begin{bmatrix} 6 & -4 & 12 & 2 \\ 9 & -6 & 18 & 3 \end{bmatrix}.$$

Escalonando essa matriz obtemos

$$\begin{bmatrix} 1 & -2/3 & 2 & 1/3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Portanto as soluções do sistema são  $x = 1/3 + (2/3)s - 2t$ ,  $y = s$ ,  $z = t$  para  $s, t \in \mathbb{R}$ .

## Seção 41 - Mudança de Coordenadas no Espaço

1. Ache números  $\alpha$ ,  $\beta$  de modo que os múltiplos  $\alpha m$  e  $\beta n$  das matrizes abaixo sejam matrizes ortogonais

$$m = \begin{bmatrix} 2 & -2 & 1 \\ 1 & 2 & 2 \\ 2 & 1 & -2 \end{bmatrix}, \quad n = \begin{bmatrix} 6 & 3 & 2 \\ -3 & 2 & 6 \\ 2 & -6 & 3 \end{bmatrix}.$$

*Solução.* Procuramos  $\alpha$  tal que  $(\alpha m)(\alpha m)^T = I$ , ou seja,  $\alpha^2(mm^T) = I$ . Calculando  $mm^T$ , obtemos

$$\alpha^2(mm^T) = \alpha^2 \begin{bmatrix} 9 & 0 & 0 \\ 0 & 9 & 0 \\ 0 & 0 & 9 \end{bmatrix}.$$

Portanto, a condição para  $\beta$  é  $\beta^2 9 = 1$ , ou seja,  $\beta = \pm 1/3$ .

Procuramos  $\beta$  tal que  $(\beta n)(\beta n)^T = I$ , ou seja,  $\beta^2(nn^T) = I$ . Calculando  $nn^T$ , obtemos

$$\beta^2(nn^T) = \beta^2 \begin{bmatrix} 49 & 0 & 0 \\ 0 & 49 & 0 \\ 0 & 0 & 49 \end{bmatrix}.$$

Portanto, a condição para  $\beta$  é  $\beta^2 49 = 1$ , ou seja,  $\beta = \pm 1/7$ .