

Álgebra Linear e Geometria Analítica

Cónicas e Quádricas

Departamento de Matemática  Universidade de Aveiro

Equação geral de uma cónica

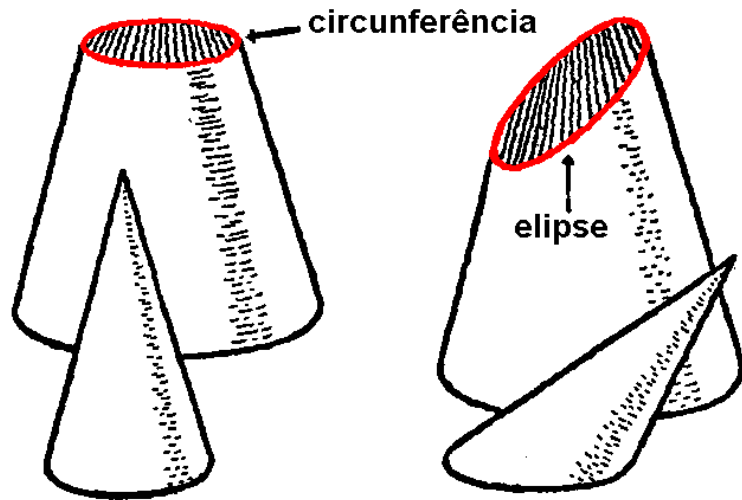
Dados $\alpha, \beta, \gamma \in \mathbb{R}$ não simultaneamente nulos e $\delta, \eta, \mu \in \mathbb{R}$,

$$\begin{aligned} \alpha x^2 + \beta y^2 + 2\gamma xy + \delta x + \eta y + \mu &= 0 \\ \Leftrightarrow \underbrace{\begin{bmatrix} x & y \end{bmatrix}}_{X^T} \underbrace{\begin{bmatrix} \alpha & \gamma \\ \gamma & \beta \end{bmatrix}}_A \underbrace{\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}}_X + \underbrace{\begin{bmatrix} \delta & \eta \end{bmatrix}}_B \underbrace{\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}}_X + \mu &= 0 \\ \Leftrightarrow X^T A X + B X + \mu &= 0, \end{aligned}$$

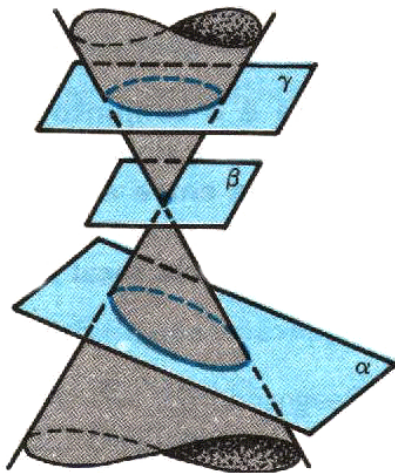
com A matriz simétrica 2×2 não nula e B matriz 1×2 , é a equação geral que as coordenadas $X \in \mathbb{R}^2$ dos pontos de uma cónica satisfazem.

As cónicas são curvas obtidas pela interseção de um plano com um cone.

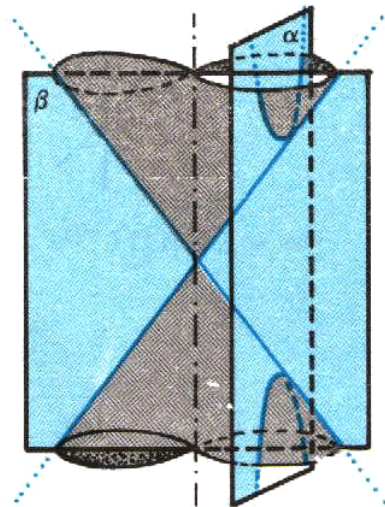
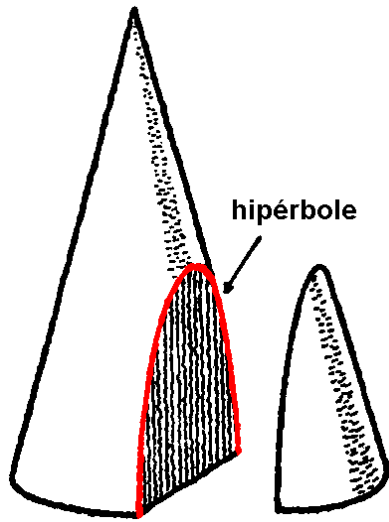
Secções cónicas: circunferência e elipse



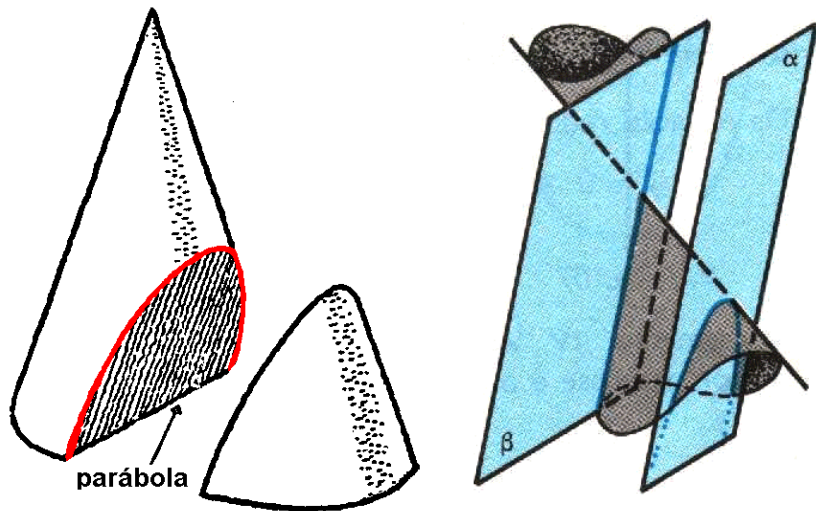
Secções cónicas: circunferência e elipse



Secções cónicas: hipérbole

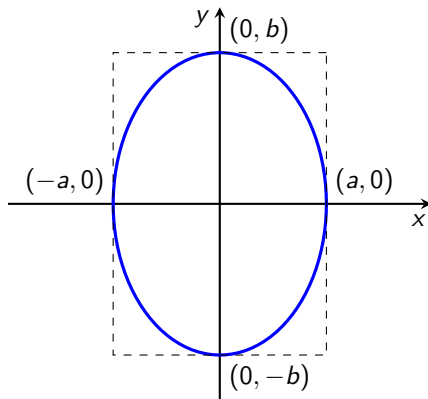


Secções cónicas: parábola



Equação reduzida de uma elipse

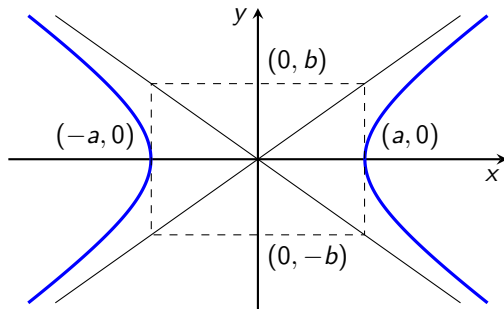
$$\begin{bmatrix} x & y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{a^2} & 0 \\ 0 & \frac{1}{b^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} - 1 = 0 \iff \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1, \quad 0 < a \leq b$$



Caso particular: $a = b$ (=raio) \Leftrightarrow circunferência

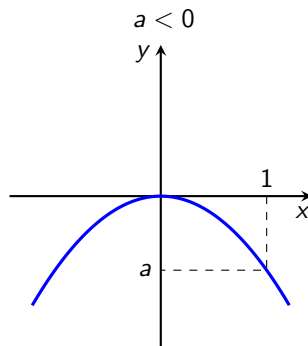
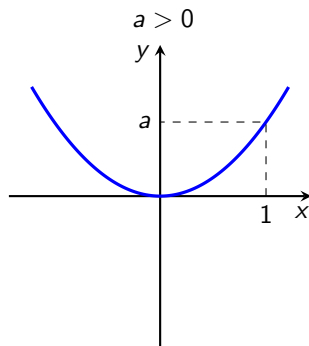
Equação reduzida de uma hipérbole

$$\begin{bmatrix} x & y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{a^2} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{b^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} - 1 = 0 \iff \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 1, \quad a, b > 0$$



Equação reduzida de uma parábola

$$\begin{bmatrix} x & y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = 0 \iff y = ax^2$$



Diagonalização ortogonal de A

Pode simplificar-se a equação geral de uma cónica

$$X^T A X + B X + \mu = 0$$

efetuando a diagonalização ortogonal da matriz simétrica A .

Seja P uma matriz ortogonal tal que

$$P^T A P = D = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{bmatrix},$$

onde λ_1 e λ_2 são os valores próprios de A .

Redução da equação de uma cónica

Considerando $X = P\hat{X}$ e $\hat{B} = BP$ na equação das cónicas, obtém-se

$$\hat{X}^T P^T A P \hat{X} + B P \hat{X} + \mu = \hat{X}^T D \hat{X} + \hat{B} \hat{X} + \mu = 0$$

que, para $\hat{X} = \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \end{bmatrix}$ e $\hat{B} = \begin{bmatrix} \hat{\delta} & \hat{\eta} \end{bmatrix}$, é equivalente a

$$\begin{bmatrix} \hat{x} & \hat{y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \hat{\delta} & \hat{\eta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \end{bmatrix} + \mu = 0$$
$$\Downarrow$$
$$\lambda_1 \hat{x}^2 + \lambda_2 \hat{y}^2 + \hat{\delta} \hat{x} + \hat{\eta} \hat{y} + \mu = 0,$$

onde o termo cruzado (termo em “xy”) foi eliminado.

A técnica para eliminar os termos $\hat{B}\hat{X}$ ou μ , quando possível, será mostrada nos exemplos.

Nota: Esta mudança de variável corresponde a uma rotação.

Exemplo 1

$$x^2 + y^2 + 4xy \overline{-2x + 2y} - 6 = 0$$

$$\begin{array}{c} \Updownarrow \\ X^T \textcolor{red}{A} X + \textcolor{green}{B} X - 6 = 0 \end{array}$$

com

$$X = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}, \quad \textcolor{red}{A} = \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 2 & 1 \end{bmatrix}, \quad \textcolor{green}{B} = \begin{bmatrix} -2 & 2 \end{bmatrix}.$$

No **Exemplo 5** do **Capítulo 5** (slide 5-17) efetuou-se a **diagonalização ortogonal** da matriz simétrica A , tendo-se obtido

$$\textcolor{blue}{P}^T \textcolor{red}{A} \textcolor{blue}{P} = \begin{bmatrix} \textcolor{red}{3} & 0 \\ 0 & \textcolor{red}{-1} \end{bmatrix} \quad \text{com} \quad \textcolor{blue}{P} = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{\sqrt{2}}{2} \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix}$$

uma **matriz ortogonal**.

Exemplo 1 – continuação

Considerando $X = P\hat{X}$, obtém-se

$$\hat{X}^T P^T A P \hat{X} + B P \hat{X} = 6.$$



Tomando $\hat{X} = \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \end{bmatrix}$ e atendendo a que $B P = \begin{bmatrix} 0 & 2\sqrt{2} \end{bmatrix}$, obtém-se

$$3\hat{x}^2 - \hat{y}^2 + 2\sqrt{2}\hat{y} = 6 \iff 3\hat{x}^2 - (\hat{y}^2 - 2\sqrt{2}\hat{y} + 2) = 6 - 2$$

$$\iff 3\hat{x}^2 - \underbrace{(\hat{y} - \sqrt{2})^2}_{\tilde{y}} = 4$$

$$\iff \frac{\tilde{x}^2}{\frac{4}{3}} - \frac{\tilde{y}^2}{4} = 1.$$

Esta última é a equação reduzida de uma **hipérbole**.

Nota: A mudança de variável $\tilde{x} = \hat{x}$ e $\tilde{y} = \hat{y} - \sqrt{2}$ corresponde a uma translação.

Exemplo 2

$$\begin{aligned} 2x^2 + y^2 + 12x + 4y + 18 &= 0 \\ \Updownarrow \\ 2(x^2 + 6x + 9) - 18 + (y^2 + 4y + 4) - 4 + 18 &= 0 \\ \Updownarrow \\ 2(\underbrace{x+3}_{\tilde{x}})^2 + (\underbrace{y+2}_{\tilde{y}})^2 &= 4 \\ \Updownarrow \\ \frac{\tilde{x}^2}{2} + \frac{\tilde{y}^2}{4} &= 1. \end{aligned}$$

Esta última é a equação reduzida de uma [elipse](#).

Exemplo 3

$$\begin{aligned} 2x^2 + 12x + 3y + 15 &= 0 \\ \Updownarrow \\ 2(x^2 + 6x + 9) - 18 + 3y + 15 &= 0 \\ \Updownarrow \\ 2(\underbrace{x+3}_{\tilde{x}})^2 + 3(\underbrace{y-1}_{\tilde{y}}) &= 0 \\ \Updownarrow \\ \tilde{y} &= -\frac{2}{3} \tilde{x}^2. \end{aligned}$$

Esta é a equação reduzida de uma **parábola**.

Exemplos de equações que não correspondem a curvas

Exemplo 4:

$$\begin{aligned}2x^2 + y^2 + 12x + 4y + 24 &= 0 \\ \Updownarrow \\ 2(x^2 + 6x + 9) - 18 + (y^2 + 4y + 4) - 4 + 24 &= 0 \\ \Updownarrow \\ 2(x + 3)^2 + (y + 2)^2 &= -2.\end{aligned}$$

Esta é a equação de um conjunto vazio.

Exemplo 5:

$$\begin{aligned}2x^2 + y^2 + 12x + 4y + 22 &= 0 \\ \Updownarrow \\ 2(x + 3)^2 + (y + 2)^2 &= 0. \\ \Updownarrow \\ x = -3 \quad \text{e} \quad y = -2.\end{aligned}$$

Esta é a equação de um ponto.

Cônicas degeneradas

Situações degeneradas que podem ocorrer:

1. $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = -1 \rightarrow$ conjunto vazio;
2. $\frac{x^2}{a^2} = -1 \rightarrow$ conjunto vazio;
3. $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 0 \rightarrow$ um ponto (origem do referencial);
4. $\frac{x^2}{a^2} = 0 \rightarrow$ duas retas coincidentes (eixo Oy , $x = 0$);
5. $\frac{x^2}{a^2} = 1 \rightarrow$ duas retas estritamente paralelas ($x = \pm a$);
6. $\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 0 \rightarrow$ duas retas concorrentes ($y = \pm \frac{b}{a}x$).

Equação geral de uma quádrlica

A equação geral (na forma matricial) de uma quádrlica é

$$X^T A X + B X + \mu = 0, \quad (1)$$

com A matriz simétrica 3×3 não nula, B matriz 1×3 , $X \in \mathbb{R}^3$ e $\mu \in \mathbb{R}$.

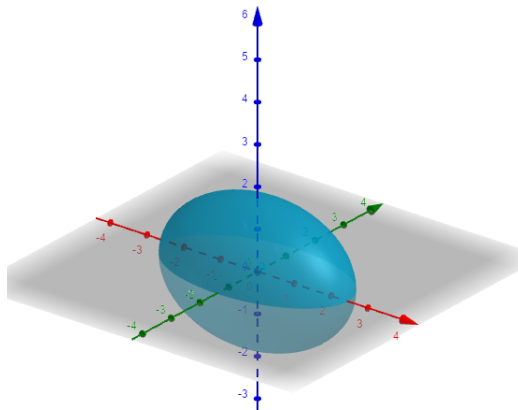
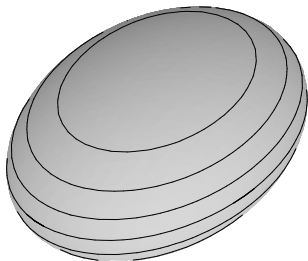
A partir desta equação geral podem ser obtidas as equações reduzidas das quádrlicas por um processo análogo ao levado a cabo para as cónicas:

1. “rotação” dos eixos (diagonalização ortogonal de A) e
2. “translação” dos eixos.

Exercício: Determine as interseções com os planos coordenados ($x = 0$, $y = 0$ e $z = 0$) de todas as quádrlicas apresentadas nos próximos 5 slides.

Equação reduzida do elipsóide

Equação reduzida de um elipsóide: $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1$.

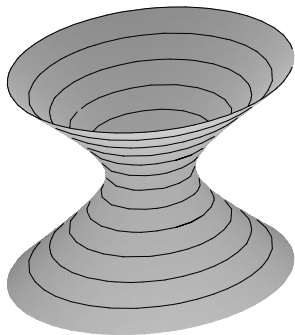


Nota: No caso particular $a = b = c$, tem-se uma **esfera**.

Equações reduzidas dos hiperbolóides

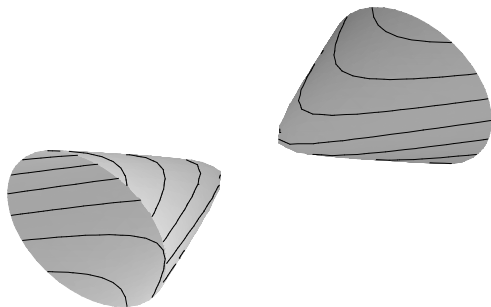
Equação reduzida de um
hiperbolóide de uma folha:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2} = 1.$$



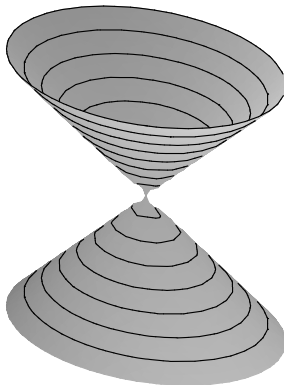
Equação reduzida de um
hiperbolóide de duas folhas:

$$\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2} = 1.$$



O cone

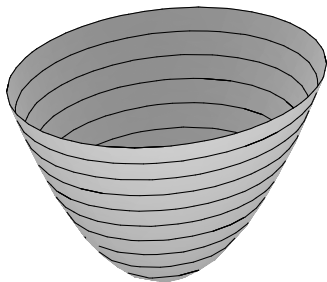
Equação reduzida de um cone: $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2} = 0$.



Equações reduzidas dos parabolóides

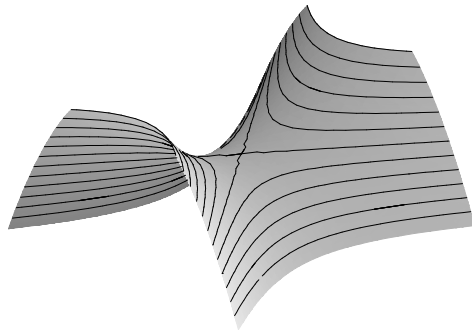
Equação reduzida de um
parabolóide elíptico:

$$z = \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2}.$$



Equação reduzida de um
parabolóide hiperbólico:

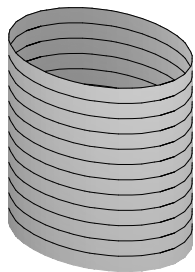
$$z = \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2}.$$



Quádricas degeneradas: os cilindros

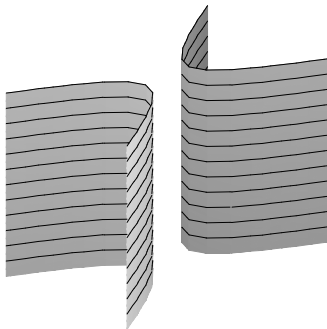
Equação reduzida de
um cilindro elíptico:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1.$$



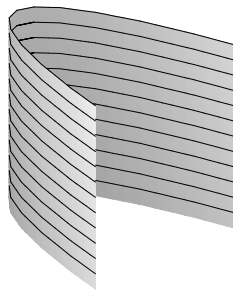
Equação reduzida de
um cilindro hiperbólico:

$$\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 1.$$



Equação reduzida de
um cilindro parabólico:

$$y = ax^2.$$



Exemplo 6

$$-8x^2 - 8y^2 + 10z^2 + 32xy - 4xz - 4yz - 24 = 0$$



$$X^T A X = 24,$$

com

$$X = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad A = \begin{bmatrix} -8 & 16 & -2 \\ 16 & -8 & -2 \\ -2 & -2 & 10 \end{bmatrix}.$$

Como os valores próprios de A são 12 , 6 e -24 , existe P ortogonal tal que

$$P^T A P = D = \begin{bmatrix} 12 & 0 & 0 \\ 0 & 6 & 0 \\ 0 & 0 & -24 \end{bmatrix}.$$

Exemplo 6 – continuação

Considerando $X = P \hat{X}$ na equação geral, com $\hat{X} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$, obtém-se

$$\begin{aligned} X^T A X &= 24 \iff \hat{X}^T D \hat{X} = 24 \\ &\iff 12\hat{x}^2 + 6\hat{y}^2 - 24\hat{z}^2 = 24 \\ &\iff \frac{\hat{x}^2}{2} + \frac{\hat{y}^2}{4} - \hat{z}^2 = 1 \end{aligned}$$

que é a equação reduzida de um hiperbolóide de uma folha.

Nota:

As interseções com os eixos coordenados são:

$$\begin{array}{lll} \hat{x} = 0 & \rightarrow & \frac{\hat{y}^2}{4} - \hat{z}^2 = 1 \quad \text{hipérbole no plano } \hat{y}O\hat{z} \\ \hat{y} = 0 & \rightarrow & \frac{\hat{x}^2}{2} - \hat{z}^2 = 1 \quad \text{hipérbole no plano } \hat{x}O\hat{z} \\ \hat{z} = 0 & \rightarrow & \frac{\hat{x}^2}{2} + \frac{\hat{y}^2}{4} = 1 \quad \text{elipse no plano } \hat{x}O\hat{y} \end{array}$$