

## Trabalho A1: Curvas Offset

Iara Cristina e Janaina Neres

### Introdução

Para este trabalho, escolhemos trabalhar com Curvas Offset matematicamente e computacionalmente. A importância de Curvas offset se dá pelas aplicações em diversas áreas, como usinagem, modelagem geométrica, computação gráfica e robótica. Podemos citar alguns exemplos: criar caminhos para ferramentas de corte, criar superfícies com certa espessura, planejar trajetórias de movimento e definir regiões de tolerância em peças mecânicas.

O estudo das propriedades geométricas e topológicas de curvas offset pode levar a novos insights matemáticos que contribuem para o desenvolvimento de novas técnicas para sua manipulação e uso em aplicações práticas. Vamos começar definindo alguns conceitos de curvas que serão utilizados e discutidos:

- Para uma curva parametrizada regular  $\alpha : I \rightarrow \mathbb{R}^2$  representada por  $\alpha(t) = (x(t), y(t))$ , sua derivada é  $\alpha'(t) = (x'(t), y'(t))$
- Para uma curva parametrizada regular  $\alpha : I \rightarrow \mathbb{R}^3$  representada por  $\alpha(t) = (x(t), y(t), z(t))$ , sua derivada é  $\alpha'(t) = (x'(t), y'(t), z'(t))$
- Uma curva é regular, se  $\alpha'(t) \neq 0 \forall t \in I$
- Uma curva é unit speed, se  $\|\alpha'(t)\| = 1$
- O vetor tangente  $T$  é definido por  $\frac{\alpha'}{\|\alpha'(t)\|}$  no caso geral.
- O vetor normal  $N$  é definido por  $\frac{\alpha''(t)}{\|\alpha''(t)\|}$ , ou também,  $\frac{T'(t)}{\|T'(t)\|}$ .
- O vetor binormal  $B$  é definido por  $T(t) \times N(t)$

### O que é uma curva offset?

A curva offset [4] é representada pela a seguinte expressão:

$$O_d(t) = C(t) + d * n(t)$$

- $O_d(t)$  é a curva offset resultante, que está a uma distância  $d$  da curva original  $C(t)$ .
- $C(t)$  é a curva original em sua forma parametrizada, que define a forma do objeto que se deseja fabricar.
- $d$  é a distância fixa entre a curva original e a curva offset. Por exemplo, em um processo de usinagem, essa distância pode ser determinada pelo diâmetro da ferramenta de corte usada para cortar ao longo da curva original.
- $n(t)$  é o vetor normal unitário à curva original  $C(t)$  na posição  $t$ . Este vetor é perpendicular à curva e indica a direção para a qual a curva se afasta da curva original. Multiplicando por  $d$ , obtemos um vetor que indica a direção e a magnitude da distância entre as duas curvas para cada valor de  $t$ .

### Curvas Offset x Curvas Paralelas

Até aqui, deve ter surgido o questionamento de uma curva offset ser ou não o mesmo que uma curva paralela. Pode-se dizer que a curva offset é um conceito mais específico da curva paralela pelo seu contexto em desenho assistido por computador (CAD), mas na prática, os termos "curvas offset" e "curvas paralelas" são usados de forma intercambiável, uma vez que o objetivo é criar uma geometria que seja paralela a uma forma dada a uma distância fixa.

## Singularidades de Curvas Offset

Existem dois tipos de singularidades nas curvas offset: pontos irregulares e auto-interseções.

### Pontos irregulares

- Pontos isolados: Este ponto ocorre quando a curva progenitora com raio  $R$  é um círculo e o deslocamento é  $d = -R$ .
- Cusps [2]: Este ponto ocorre em um ponto  $t$  onde o vetor tangente desaparece, ou seja, a curvatura  $\kappa(t)$  da curva é:

$$\kappa(t) = -\frac{1}{d}$$

### Auto-interseções

As auto-interseções ocorrem se a distância da curva original exceder o raio de curvatura mínimo (curvatura) da curva que está sendo compensada. Por exemplo, se uma curva tiver um raio de 5 cm e você tentar compensar mais de 5 cm para dentro, a curva offset se cruzará e criará um loop.

Na usinagem, o raio do cortador não deve exceder o menor raio principal côncavo de curvatura da superfície para evitar goivagem local. Como a densidade dos caminhos da ferramenta é alta, a eficiência diminuirá significativamente.

## Exemplos

Para uma primeira impressão, vamos ilustrar como as curvas offset se comportam para alguns exemplos em diferentes parâmetros e intervalos.

- Parábola

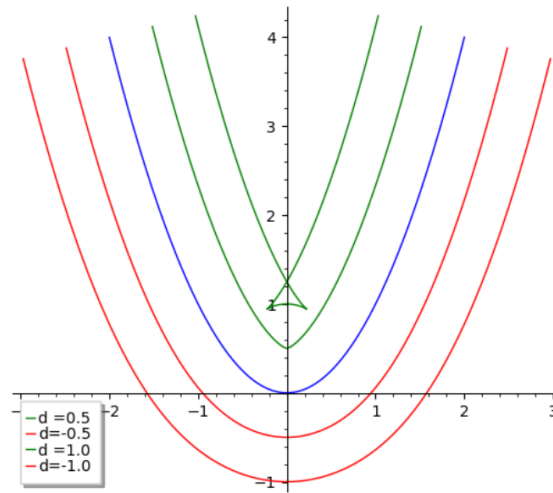


Figura 1: Exemplo de Curvas offset para  $C(t) = (t, t^2)$

Para  $d = -1$ , ocorre uma **auto-interseção**.

- Involutas

A involuta de uma curva pode ser definida como a trajetória de um ponto que está preso em um fio que é enrolado na curva original. Visto isso, podemos representar a involuta como uma função de arco  $s$  e um parâmetro  $a$  que representa a distância do ponto inicial no fio à curva original:  $\vec{C}_a(s) = \vec{c}(s) - \vec{c}'(s)(s - a)$ , temos que  $\vec{C}'_a(s) \cdot \vec{c}'(s) = 0$ . Então as involutas são curvas paralelas, devido a  $\vec{C}_a(s) = \vec{C}_0(s) + a\vec{c}'(s)$ , onde  $a$  é a distância e  $\vec{c}'(s)$  é  $N(t)$  em  $\vec{C}_0(s)$ .

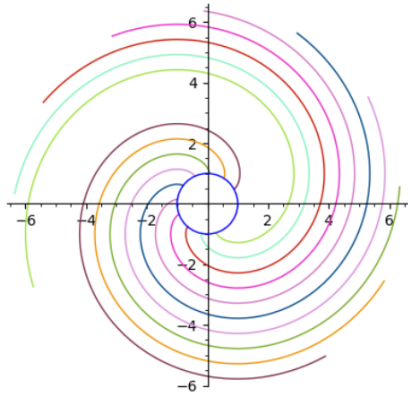


Figura 2: 10 involutas para  $C(t) = (\sin(t), \cos(t))$

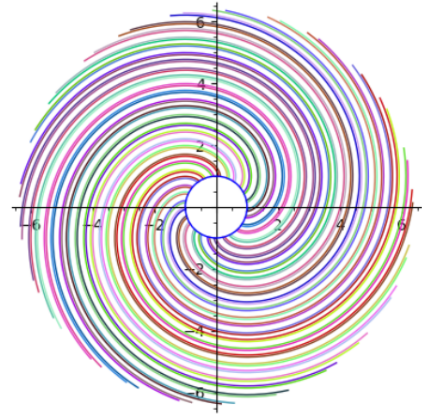


Figura 3: 100 involutas para  $C(t) = (\sin(t), \cos(t))$

#### • Evolutas

A definição de Evolutas é o lugar geométrico de todos os seus centros de curvatura. Uma definição alternativa é tratar a evoluta de  $C$  como o lugar geométrico das "cusps" das suas curvas paralelas.

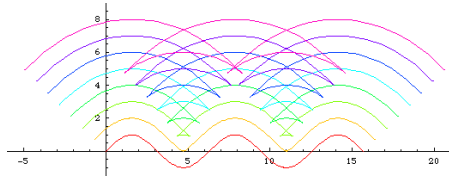


Figura 4:  $C(t) = (t, \sin(t))$  e offsets

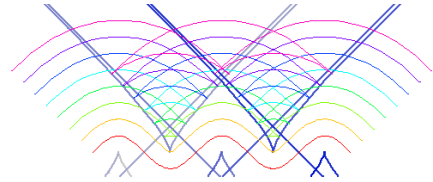


Figura 5: Sobreposição de  $C(t) = (t, \sin(t))$  e offsets com suas Evolutas

## NC Machining & Ball-End Cutter

As curvas offset são importantes em "Numerical Controlled Machining" ou "Usinagem Controlada Numericamente", onde definem a forma do corte feito por uma ferramenta de corte redonda de uma máquina de dois eixos que é transladada da trajetória do cortador por uma distância constante na direção normal à trajetória do cortador em cada ponto. Uma dessas ferramentas de corte é a "Ball-End Nose Cutter", que é usada em Controle Numérico Computadorizado (CNC) que tem uma ponta esférica para criar superfícies curvas em objetos tridimensionais. Segue a função que gera uma animação para alguns exemplos:

```
1 def ball_end(C, d, t_range, x_range, y_range):
2     T = diff(C, t) / diff(C, t).norm() # vetor tangente
3     N = vector((- T[1], T[0])) # vetor normal
4     Od = C + d*N # curva offset
5
6     frames = [parametric_plot(Od, (t, t_range[0], t_range[1]), color="black") +
7               parametric_plot(C, (t, t_range[0], t_range[1]), color = "blue") +
8               plot(N.subs(t=i)*2*d, start = C.subs(t=i), color = "red") +
9               plot(circle(Od.subs(t=i), d, color = "blue")) for i in srange(t_range
10 [0], t_range[1], 0.5)]
11     return animate(frames, figsize=10, xmin=x_range[0], xmax=x_range[1], ymin=
12 y_range[0], ymax=y_range[1])
```

Figura 6: "ball-end curve cutter" ao longo do offset de  $C(t) = (t, t^2)$

Figura 7: "ball-end curve cutter" ao longo do offset de  $C(t) = (2 \cos(t), 2 \sin(t))$

## Curvas Offset em Funções Implícitas?

Após investigar sobre o caso de curvas offset em funções implícitas, concluímos que geralmente a representação analítica de uma curva paralela de uma curva implícita não é possível. Mas existe uma forma de representar a distância orientada analiticamente. Para isso calculamos:

- Grad: O gradiente da função  $C$ .
- $n$ : O gradiente da função  $C$  normalizado.
- $N(x,y)$ : Produto de cada componente de Grad com seu respectivo componente em  $n$ .
- Offset: Curva offset representada por  $O(x, y) = C(x, y) + d * N(x, y)$

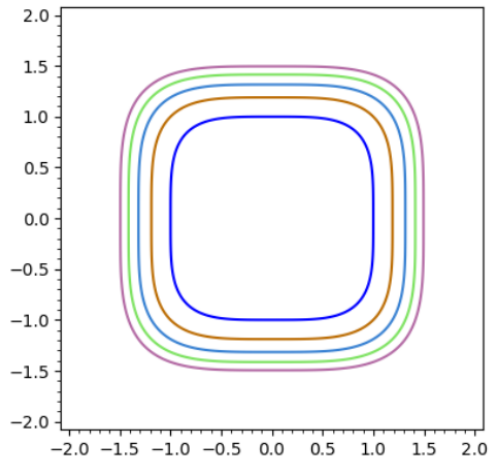


Figura 8:  $F(x, y) = \sin^4(x) + \cos^4(y) - 1$

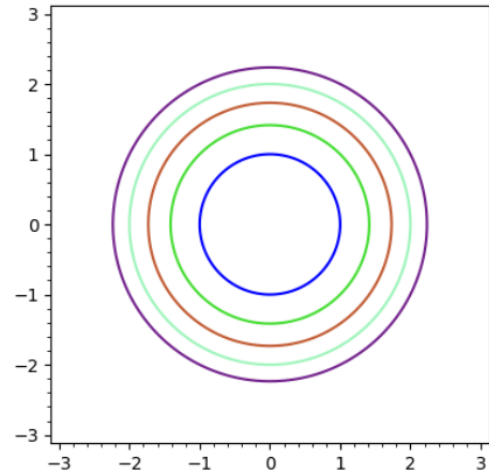


Figura 9:  $F(x, y) = \sin(x)^2 + \cos(x)^2 - 1$

Apesar de obter os resultados desejados, não foi possível restringir a distância  $d$  como gostaríamos, e nem sempre obteremos curvas paralelas. Para mais detalhes [5].

## Curvas 3D

A situação das curvas offset pode ser generalizada pro plano 3d. É possível mover a curva ao longo do vetor normal, mas também ao longo do vetor binormal para obter uma "curva binomial paralela", representada pela expressão:

$$C_d(t) = C(t) + d * B(t)$$

Podemos criar a curva offset normal e binormal de uma curva 3D através da função abaixo:

```

1 def normal_binormal_offsets(C, d, t_range):
2     Ta = diff(alpha, t) / norm(diff(alpha, t))
3     Na = diff(Ta, t) / norm(diff(Ta, t))
4     Ba = Ta.cross_product(Na)
5
6     # Principal Parallel Curve
7     Alpha_N = alpha + d*Na
8
9     # Binormal Parallel Curve
10    Alpha_B = alpha + d*Ba
11
12    #Plots 3d
13    figures = []
14    figures.append(parametric_plot(alpha, (t, -2*pi, 2*pi), color='blue'))
15    figures.append(parametric_plot(Alpha_N, (t, -2*pi, 2*pi), color='black'))
16    figures.append(parametric_plot(Alpha_B, (t, -2*pi, 2*pi), color='red'))
17
18    show(sum(figures), frame=False)

```

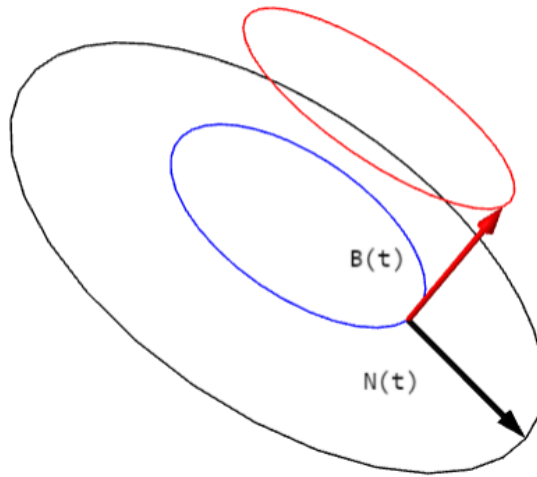


Figura 10: Exemplo  $C = ((4/5) * \cos(t), 1 - \sin(t), (-3/5) * \cos(t))$

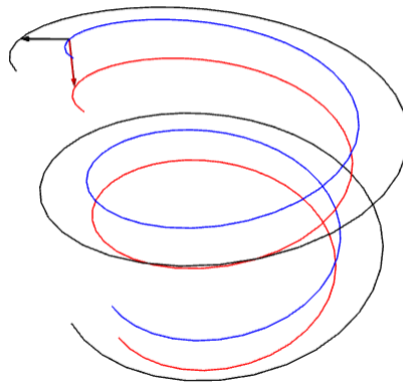


Figura 11: Exemplo  $C = (3 * \cos(2t), 3 * \sin(2t), t)$

Para mais detalhes [1].

## Exercícios

Os exercícios resolvidos são propostos na página 108 do livro [3] "Applied Geometry for Computer Graphics and CAD" do Duncan Marsh.

Começamos criando duas funções, a primeira retorna a equação da curva offset, a partir da curva original e o valor "d", enquanto a segunda gera os plots de múltiplas curvas offsets para vários valores de d.

```

1 def get_offset_curve(alpha, d):
2     #--- INPUT ---
3     # alpha: curva
4     # d: distancia entre a curva original e offset
5     #-----
6     C(t) = alpha
7     C_d(t) = diff(C(t), t)
8     v_n(t) = (- C_d(t)[1], C_d(t)[0]) # vetor normal
9     n(t) = v_n(t) / v_n(t).norm() # vetor normal unitario
10    offset = C(t) + d*n(t) # aplica a formula da curva offset
11
12    return offset

1 def plot_multiple_d(alpha, d, k, intervalo, size):
2     figures = []

```

```

3     curve = figures.append(parametric_plot(alpha, (t, intervalo[0], intervalo[1]),
4         figsize=size, color="blue"))
5     for i in range(1,k+1):
6         d_k = d*i
7         positive_offset = get_offset_curve(alpha, d_k)
8         negative_offset = get_offset_curve(alpha, -d_k)
9
10        if k < 4:
11            figures.append(parametric_plot((positive_offset), (t, intervalo[0],
12                intervalo[1]), figsize=size, color="green", legend_label=f"d = {float(str(d_k).
13                    rstrip('0')).rstrip('.')})"))
14            figures.append(parametric_plot((negative_offset), (t, intervalo[0],
15                intervalo[1]), figsize=size, color="red", legend_label=f"d = {float(str(-d_k).
16                    rstrip('0')).rstrip('.')})"))
17        else:
18            figures.append(parametric_plot((positive_offset), (t, intervalo[0],
19                intervalo[1]), figsize=size, color="green"))
20            figures.append(parametric_plot((negative_offset), (t, intervalo[0],
21                intervalo[1]), figsize=size, color="red"))
22    return sum(figures)

```

## Questões

5.15. Determine a offset de  $\mathbf{C}(t) = (1 - 3t + 3t^2, 3t^2 - 2t^3)$  em uma distância  $d$ . Plote a curva e sua offset em uma distância  $d = 1$ .

5.16. Determine as offsets à uma distance  $d$  para as seguintes curvas:

- (a)  $(c \cosh(t/c), t)$
- (b)  $(e^{bt} \cos t, e^{bt} \sin t)$ .
- (c)  $(\cos t + t \sin t, \sin t - t \cos t)$ .

5.17. Mostre que a offset em uma distância  $d$  de um círculo de raio  $r$  é um círculo de raio  $r + d$ .

## Soluções

### 5.15

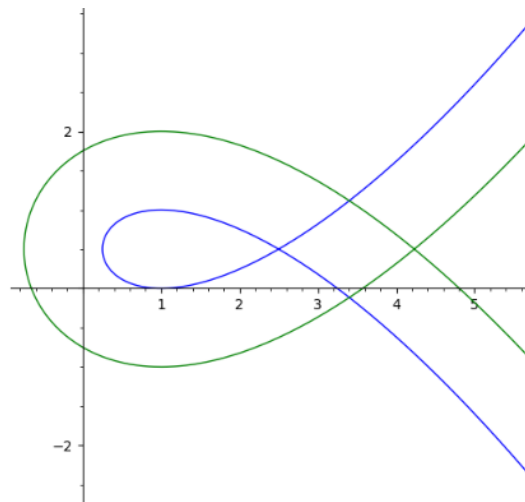


Figura 12: Exercício 5.15,  $d = 1$

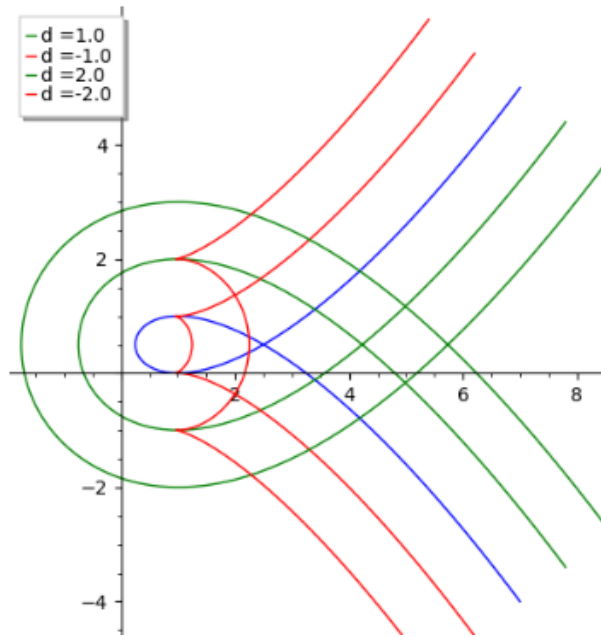


Figura 13: Exercício 5.15, outros valores de  $d$

5.16, a)

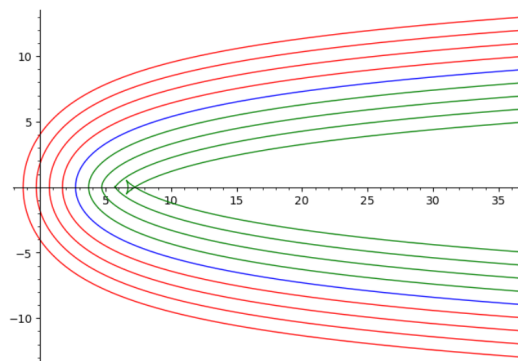


Figura 14:  $C(t) = (c \cosh(t/c), t)$ ,  $c = e$

b)

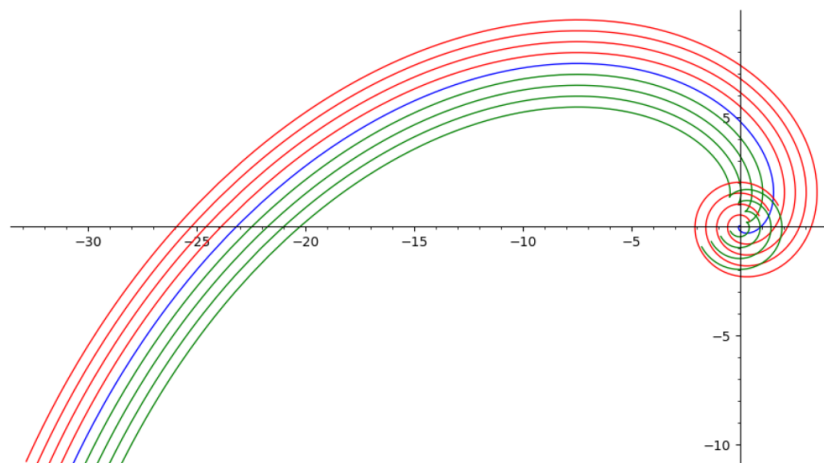


Figura 15:  $C(t) = (e^{bt} \cos t, e^{bt} \sin t)$



c)

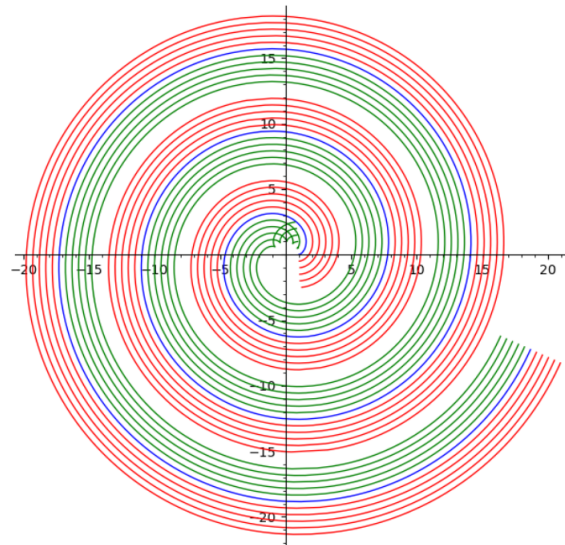


Figura 16:  $(\cos t + t \sin t, \sin t - t \cos t)$

### 5.17

Para provar que a offset em uma distância  $d$  de um círculo de raio  $r$  é um círculo de raio  $r + d$ , seja a parametrização de um círculo de raio  $r$ ,  $C(t) = (r \cos(t), r \sin(t))$ , calculamos a expressão da curva offset e mostramos que é a parametrização de um círculo de raio  $(r + d)$

```
t, r, d = var("t r d")
assume(r > 0)

alpha(t) = (r*cos(t), r*sin(t))
offset = get_offset_curve(alpha, -d)
offset = vector((offset[0].full_simplify(), offset[1].full_simplify()))
show(offset)

((d + r) cos(t), (d + r) sin(t))
```

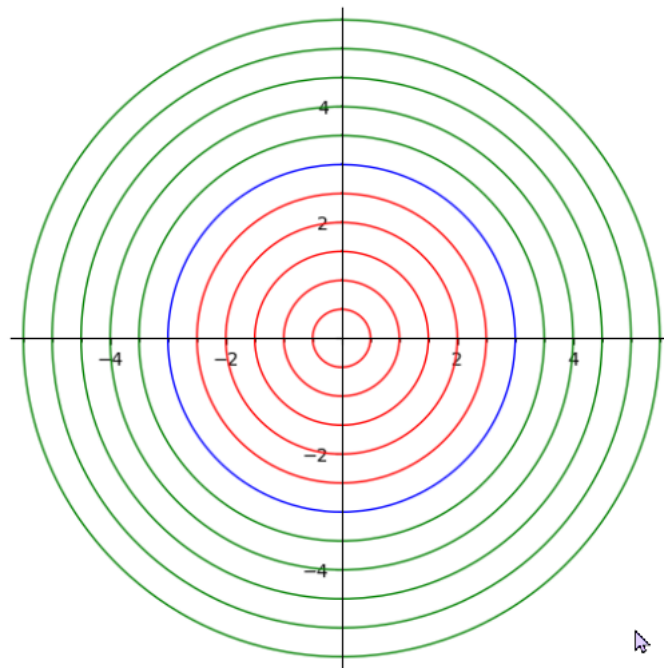


Figura 17: Exercício 5.17: para vários valores de  $d$

## Referências

- [1] Brown. Ma106: Lab 3 - brown math. [Online; accessed 24-April-2023].
- [2] Rida T Farouki and C Andrew Neff. Analytic properties of plane offset curves. *Computer aided geometric design*, 7(1-4):83–99, 1990.
- [3] Erich Hartmann. Geometry and algorithms for computer aided design. *Darmstadt University of Technology*, 80, 2003.
- [4] Duncan Marsh. *Applied geometry for computer graphics and CAD*. Springer Science & Business Media, 2005.
- [5] Wikipedia contributors. Parallel curve — Wikipedia, the free encyclopedia, 2022. [Online; accessed 24-April-2023].