

Aula 13

Integração numérica

$$\int_a^b f(x) dx$$

$$\iint_S f(x, y) dx dy$$

$$\iiint_V f(x, y, z) dx dy dz$$

Calcular: $\int_a^b f(x) dx$

Massa de placa semi-circular homogénea (densidade $\rho \equiv \text{kgm}^{-2}$).

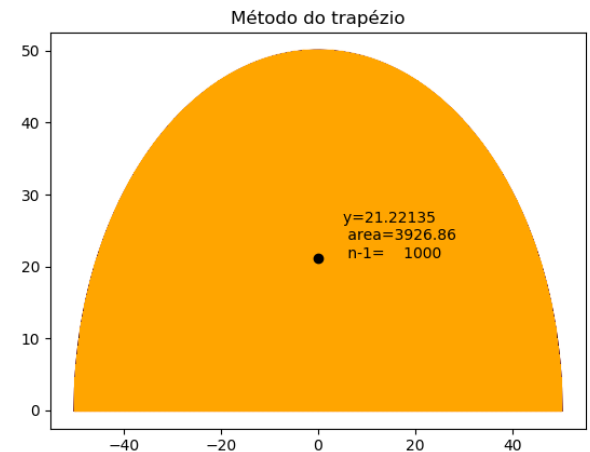
$$y = f(x) = \sqrt{R^2 - x^2}$$

$$m = \iint_S \rho dS = \int_{-R}^R \rho y dx = \frac{\rho \pi R^2}{2}$$

($m = \text{área}$, quando $\rho = 1$)

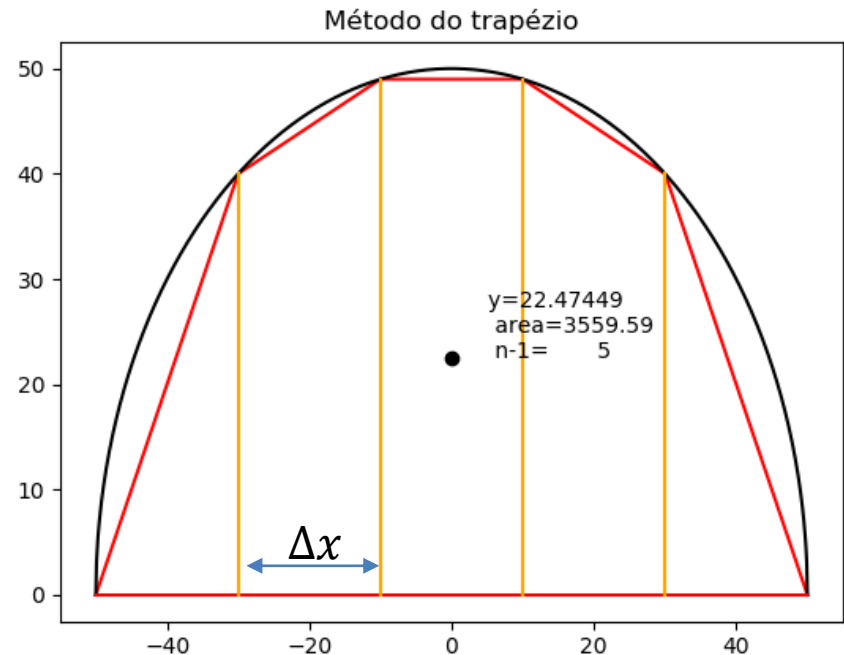
Centro de massa:

$$\vec{r}_{CM} = \frac{1}{m} \iint_S \vec{r} \rho dS$$



Método do trapézio

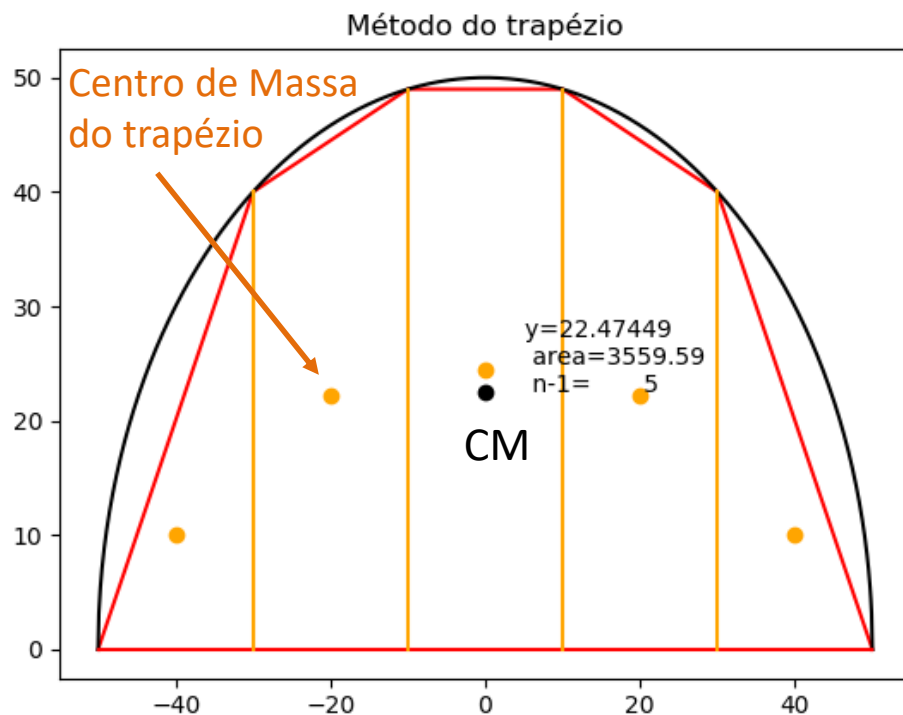
- (1) Divide-se o intervalo de integração em N sub-intervalos
- (2) Aproxima-se a função integranda pela **linha quebrada**
- (3) Cada elemento de integração é um trapézio (neste caso, com 2 triângulos em cada limite)
- (4) No $\lim_{N \rightarrow \infty}$ a **linha quebrada** converge para a função.



$$\int_{x_0}^{x_N} f(x) dx \approx S_N = \Delta x \sum_{k=1}^N \frac{f_{k-1} + f_k}{2} = \Delta x \left[\frac{f_0}{2} + f_1 + \dots + f_{N-1} + \frac{f_N}{2} \right]$$

Cálculo do centro de massa pelo método do trapézio

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
def placa(x,R):
    f=np.sqrt(R**2-x**2)
    return f
ro=1.;R=50.;kp=0; n=6
x=np.linspace(-R,R,n+1);dx=x[1]-x[0]
f=placa(x,R)
massa=ro*(f[0]+f[n])/2
xcm=ro*(f[0]*x[0]+f[n]*x[n])/2
ycm=ro*(f[0]*f[0]/2+f[n]*f[n]/2)/2
for k in range(1,n):
    massa=massa+ro*f[k]
    xcm=xcm+ro*f[k]*x[k]
    ycm=ycm+ro*f[k]*f[k]/2
massa=massa*dx
xcm=xcm*dx/massa
ycm=ycm*dx/massa
plt.scatter(xcm,ycm,color='black',zorder=10)
```



$$\Delta x \left[\frac{f_0}{2} + f_1 + \dots + f_{N-1} + \frac{f_N}{2} \right]$$

n é o número de intervalos
(n+1) pontos

Convergência trapézio

```
from sympy import integrate, Symbol, sqrt
x=Symbol('x');f=Symbol('f');f=sqrt(50**2-x**2)
a=integrate(f,(x,-50,50))
yCM=integrate(f**2/2,(x,-50,50))/a
print('Analítico área=',a,'=%23.16f yCM=%23.16f' %(a,yCM))
```

n=	6	massa=	3559.592	kg	xcm=	0.000	m	yCM=	22.47448714	m
n=	11	massa=	3796.311	kg	xcm=	0.000	m	yCM=	21.73162294	m
n=	101	massa=	3922.836	kg	xcm=	0.000	m	yCM=	21.24101229	m
n=	1001	massa=	3926.859	kg	xcm=	-0.000	m	yCM=	21.22134832	m
n=	10001	massa=	3926.987	kg	xcm=	-0.000	m	yCM=	21.22068133	m
n=	100001	massa=	3926.991	kg	xcm=	0.000	m	yCM=	21.22065979	m

```
Analítico área= 1250*pi = 3926.9908169872414874 yCM=
21.2206590789193790
```

TRAPÉZIO vers.2

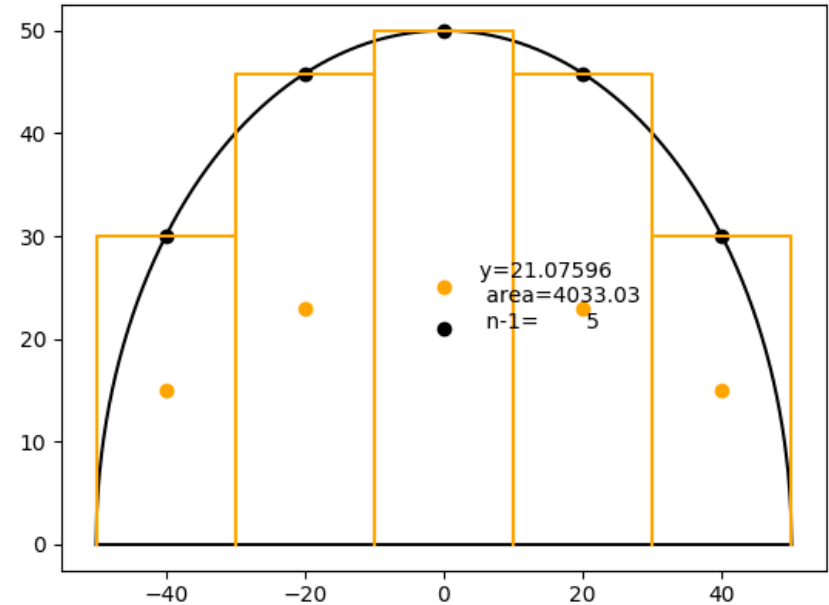
```
n=100
mPM=intTRAP(placa,-R,R,n)
xPM=intTRAP(placax,-R,R,n)/mTRAP
yPM=intTRAP(placay,-R,R,n)/mTRAP
```

```
import numpy as np
def placa(x,R=50):
    f=np.sqrt(R**2-x**2)
    return f
def placax(x,R=50):
    f=placa(x,R)*x
    return f
def placay(x,R=50):
    f=placa(x,R)**2/2
    return f
```

```
def intTRAP(fun,a,b,n):
    dx=(b-a)/n
    x=np.linspace(a,b,n+1)
    f=fun(x)
    integral=0.5*(f[0]+f[n])
    for k in range(1,n):
        integral=integral+f[k]
    integral=integral*dx
    return integral
```

Método do ponto médio

- (1) Divide-se o intervalo de integração em N sub-intervalos
- (2) Toma-se o valor da função no ponto médio
- (3) Cada elemento de integração é um **retângulo**
- (4) No $\lim_{N \rightarrow \infty}$ a **escada** converge para a função.



$$\int_{x_0}^{x_N} f(x) dx \approx S_N = h \sum_{k=1}^N f_{k-\frac{1}{2}} = h[f_{1/2} + f_{3/2} + \dots + f_{N-1/2}]$$

PONTO MÉDIO

```
n=100
mPM=intPM(placa, -R, R, n)
xPM=intPM(placax, -R, R, n) / mPM
yPM=intPM(placay, -R, R, n) / mPM
```

```
import numpy as np
def placa(x, R=50):
    f=np.sqrt(R**2-x**2)
    return f
def placax(x, R=50):
    f=placa(x, R) * x
    return f
def placay(x, R=50):
    f=placa(x, R) **2/2
    return f
```

```
def intPM(fun, a, b, n):
    dx=(b-a) / n
    x=np.linspace(a+dx/2, b-dx/2, n)
    f=fun(x)
    integral=0.
    for k in range(n):
        integral=integral+f[k]
    integral=integral*dx
    return integral
```



```
def intPM(fun, a, b, n):
    dx=(b-a) / n
    x=np.linspace(a+dx/2, b-dx/2, n)
    integral=dx*np.sum(fun(x))
    return integral
```


Vantagens trapézio vs ponto médio

Os dois métodos têm desempenho comparável. Por vezes a função não pode ser calculada nos pontos limite, apesar de ser integrável: nesse caso usa-se o ponto médio.

O método do ponto médio é extensível a problemas **multidimensionais**.

Método de Simpson

No método de Simpson, a função é reconstruída entre cada três pontos por uma parábola:

$$\int_{x_0}^{x_N} f(x) dx \approx S_N$$
$$= h \left[\frac{1}{3} f_0 + \frac{4}{3} f_1 + \frac{2}{3} f_2 + \frac{4}{3} f_3 + \cdots + \frac{2}{3} f_{N-2} + \frac{4}{3} f_{N-1} + \frac{1}{3} f_N \right]$$

SIMPSON

```
n=100
mPM=intSI (placa, -R,R,n)
xPM=intSI (placax, -R,R,n) /mSI
yPM=intSI (placay, -R,R,n) /mSI
```

```
import numpy as np
def placa(x,R=50):
    f=np.sqrt(R**2-x**2)
    return f
def placax(x,R=50):
    f=placa(x,R)*x
    return f
def placay(x,R=50):
    f=placa(x,R)**2/2
    return f
```

```
def intSIMP (fun,a,b,n):
    dx=(b-a)/n
    x=np.linspace(a,b,n+1)
    coef=np.zeros(x.shape,dtype=float)
    coef[0]=1./3
    coef[1:n:2]=4./3
    coef[2:n:2]=2./3
    coef[n]=1./3
    integral=dx*fun(x).dot(coef)
    return integral
```

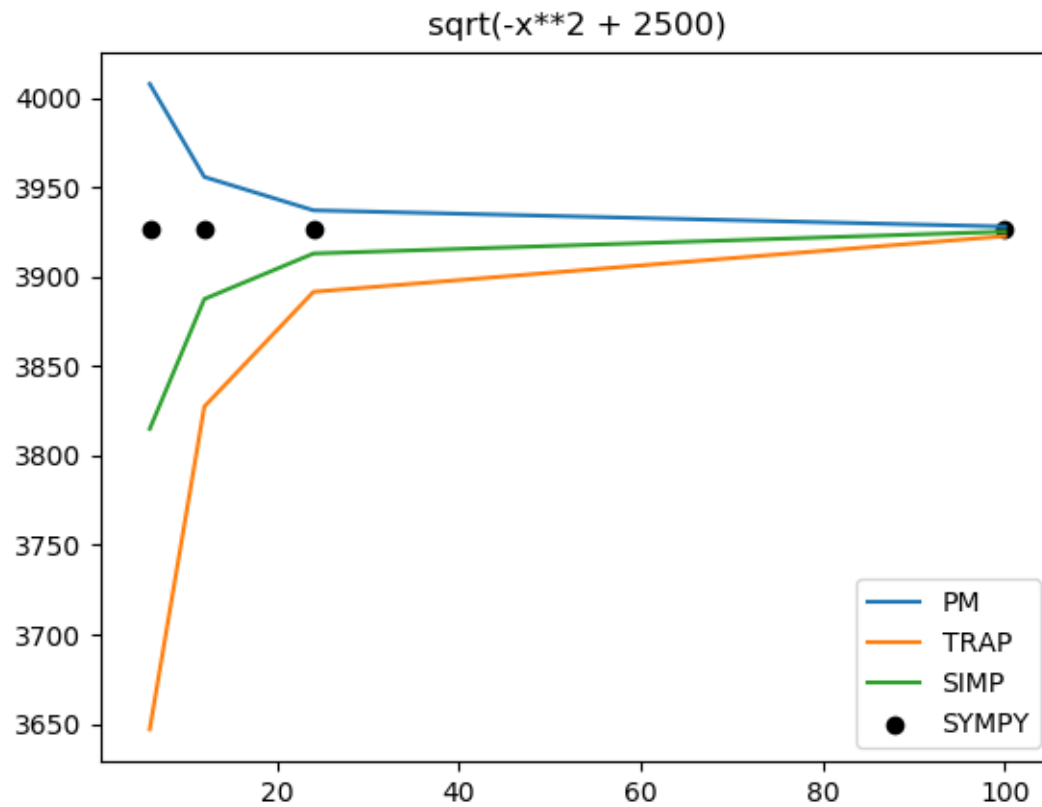
Para outra função mudar

$$\Delta x \left[\frac{1}{3} f_0 + \frac{4}{3} f_1 + \frac{2}{3} f_2 + \frac{4}{3} f_3 + \dots + \frac{2}{3} f_{N-2} + \frac{4}{3} f_{N-1} + \frac{1}{3} f_N \right]$$
$$= \Delta x \vec{c} \cdot \vec{f}$$
$$\vec{c} = \left[\frac{1}{3}, \frac{4}{3}, \frac{2}{3}, \frac{4}{3}, \frac{2}{3}, \dots, \frac{2}{3}, \frac{4}{3}, \frac{1}{3} \right]$$

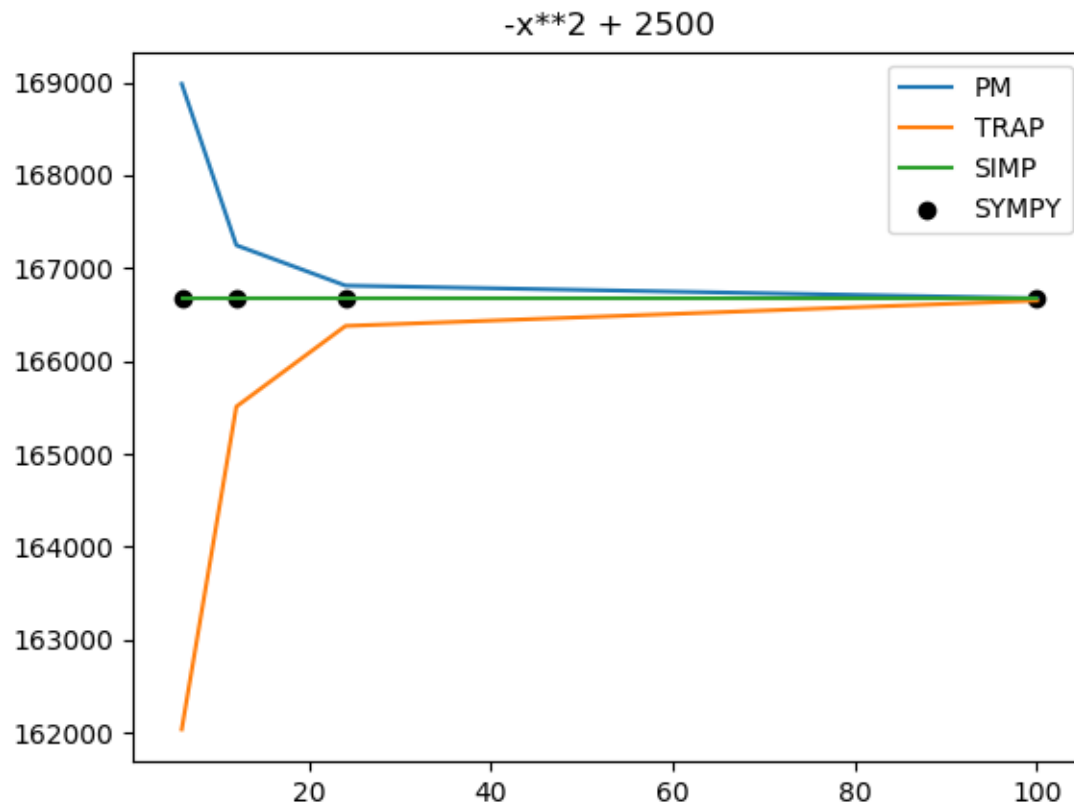
Testes de desempenho

```
kp=-1;R=50
points=np.array([6,12,24,100]);area=np.zeros((len(points),3),dtype=float)
for n in points:
    kp=kp+1
    mPM=intPM(placa,-R,R,n)
    xPM=intPM(placax,-R,R,n)/mPM; yPM=intPM(placay,-R,R,n)/mPM
    mTRAP=intTRAP(placa,-R,R,n)
    xTRAP=intTRAP(placax,-R,R,n)/mTRAP; yTRAP=intTRAP(placay,-R,R,n)/mTRAP
    mSI=intSIMP(placa,-R,R,n)
    xSI=intSIMP(placax,-R,R,n)/mSI; ySI=intSIMP(placay,-R,R,n)/mSI
    area[kp,0]=mPM;area[kp,1]=mTRAP;area[kp,2]=mSI
from sympy import integrate,Symbol,sqrt
x=Symbol('x');f=Symbol('f');f=sqrt(50**2-x**2)
aSYM=integrate(f,(x,-R,R)) #solução exata
ySYM=integrate(f**2/2,(x,-R,R))/aSYM
plt.plot(points,area[:,0],label='PM')
plt.plot(points,area[:,1],label='TRAP')
plt.plot(points,area[:,2],label='SIMP')
plt.scatter(points,aSYM*np.ones(points.shape),label='SYMPY',color='black')
plt.title(f);plt.legend()
```

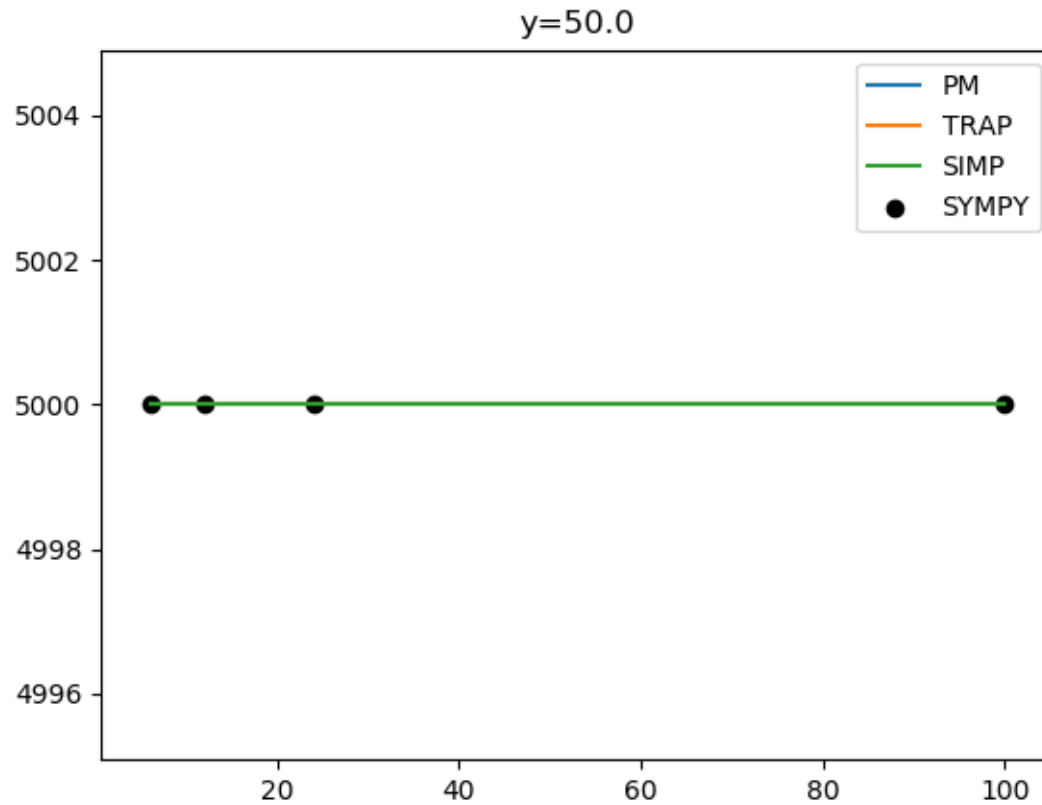
semicírculo



Parábola (SIMPSON dá resultado exato!)



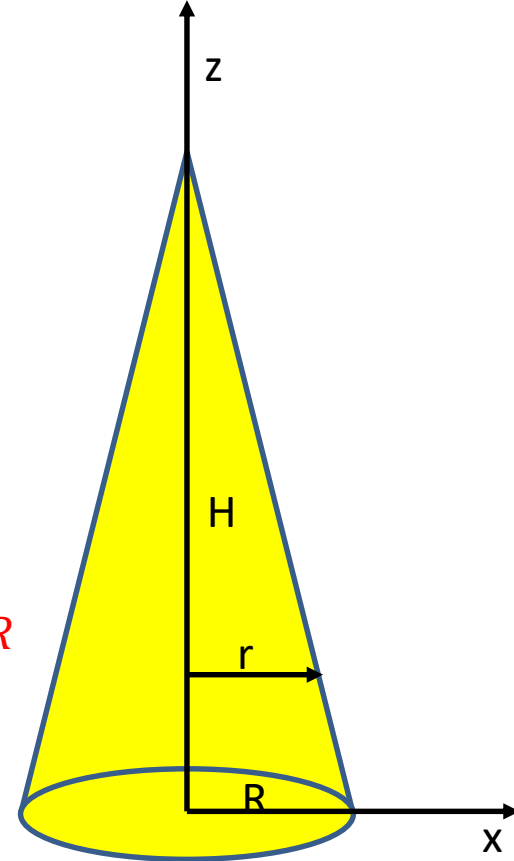
Retângulo (todos exatos)



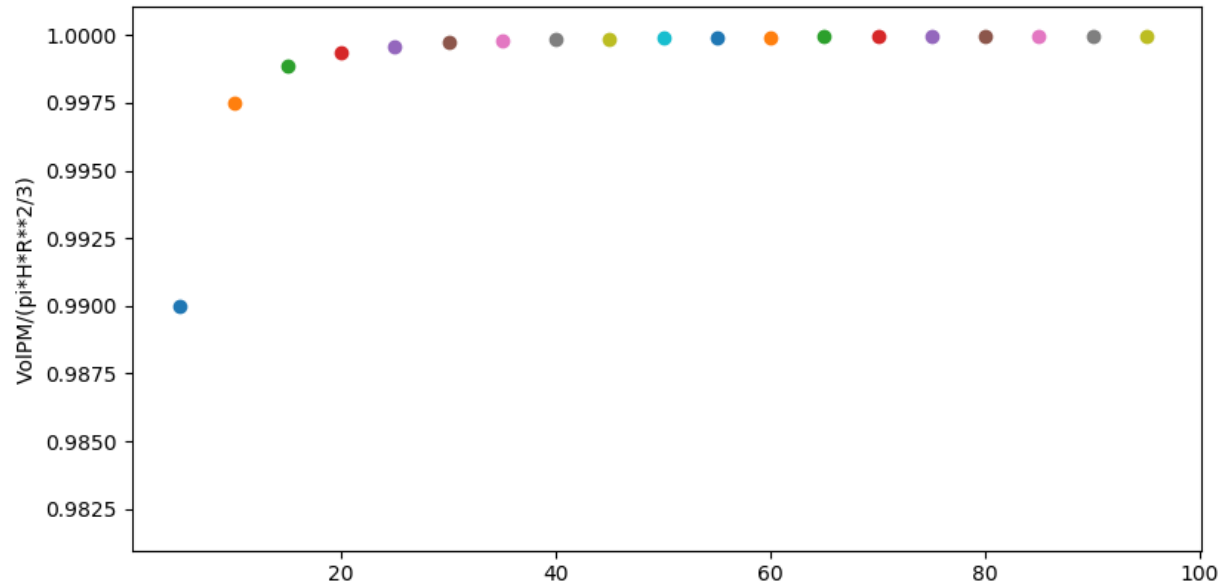
Volume de um cone (integral 1D)

```
import numpy as np;from sympy import Symbol,integrate,pi
def circulo(z,R=2,H=10):
    circ=np.pi*(R-z/H*R)**2
    return circ
def intPMed(fun,a,b,n):
    dx=(b-a)/n
    x=np.linspace(a+dx/2,b-dx/2,n)
    integral=dx*np.sum(fun(x))
    return integral
H=10;R=2
z=Symbol('z');r=Symbol('r');r=(R-z/H*R)
Vol=integrate(pi*r**2,(z,0,H))
ns=np.arange(5,100,5)
for n in ns:
    VolPM=intPMed(circulo,0,H,n)
    print('VolPM=%25.16e VolANA=%25.16e' % (VolPM,Vol))
    plt.scatter(n,VolPM/Vol)
plt.ylabel('VolPM/('+str(Vol)+')
```

$$r = R - \frac{z}{H}R$$

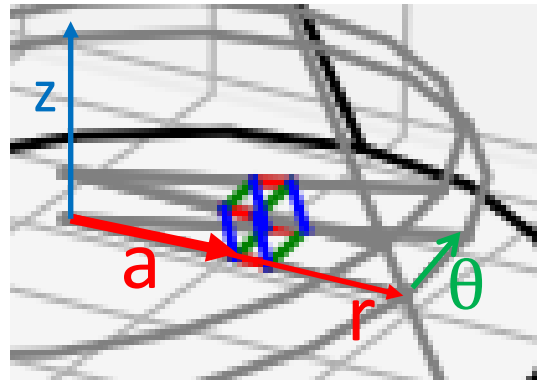
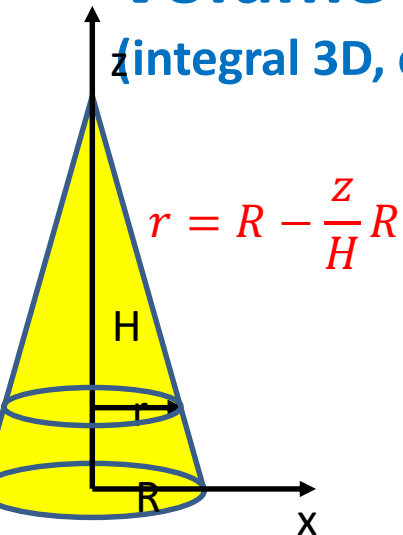


Volume de um cone (integral 1D)

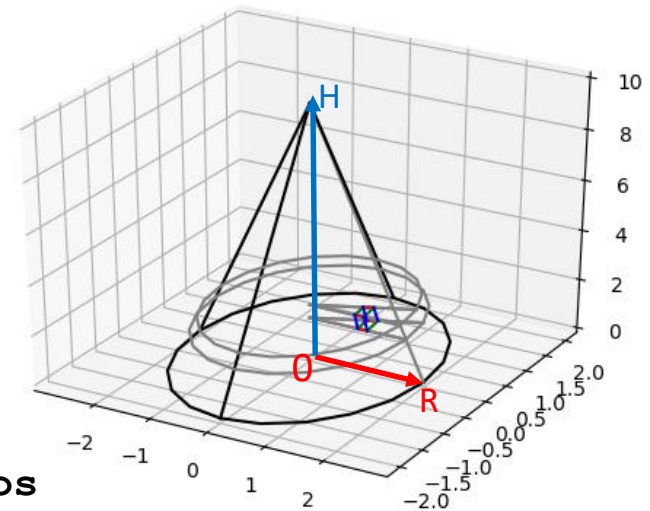


Volume de um cone

(integral 3D, coord polares)



$$V = \int_{z=0}^H \left[\int_{a=0}^{r=R-\frac{zR}{H}} \left(\int_{\theta=0}^{2\pi} a \, d\theta \right) da \right] dz$$



```
from sympy import Symbol, integrate, pi, sin, cos
```

```
H=Symbol('H'); z=Symbol('z');
```

```
r=Symbol('r'); R=Symbol('R');
```

```
theta=Symbol('theta'); a=Symbol('a')
```

```
 $r = (R - z/H * R)$ 
```

```
Vol3 = \
```

```
integrate(integrate(integrate(a, (theta, 0, 2*pi)), (a, 0, r)), (z, 0, H))
```

```
Print(Vol3)
```

```
>> pi * H * R ** 2 / 3
```

Comentário

$$V = \int_{z=0}^H \left[\int_{a=0}^{r=R-\frac{zR}{H}} \left(\int_{\theta=0}^{2\pi} a \, d\theta \right) da \right] dz$$

Este cálculo podia ser feito numericamente com o método do ponto médio, mas era trabalhoso: seria necessário distribuir os “pontos médios” de forma homogénea em 3 dimensões (polares).