

Esercizi di Analisi 2

Aguti Vittorio
vittorio.aguti@mail.polimi.it

Contents

1	Curve in \mathbb{R}^n	2
2	Serie di funzioni	9
3	Serie trigonometriche e serie di Fourier	17
4	Calcolo differenziale per funzioni in più variabili	20
5	Ottimizzazione	33
6	Calcolo integrale per funzioni di più variabili	44

1 Curve in \mathbb{R}^n

Esercizio 1.1. Sia $\gamma(t) = (t - t^2, t - t^3)$ con $t \in [0, 1]$. Stabilire se la curva è semplice, chiusa, regolare, disegnare qualitativamente il sostegno.

Soluzione. Una curva generica definita su un intervallo $[a, b]$ si dice semplice se è iniettiva sull'intervallo $[a, b]$. Questo significa che per ogni coppia di punti t_1 e t_2 nell'intervallo, le loro posizioni nello spazio devono essere diverse. Cerchiamo dunque due punti distinti $t_1 \neq t_2$ tali che $\gamma(t_1) = \gamma(t_2)$.

$$\begin{cases} t_1 - t_1^2 = t_2 - t_2^2 \\ t_1 - t_1^3 = t_2 - t_2^3 \end{cases}$$

Riscriviamo la prima equazione come:

$$(t_1 - t_2) - (t_1^2 - t_2^2) = 0$$

$$(t_1 - t_2) - (t_1 - t_2)(t_1 + t_2) = 0$$

$$(t_1 - t_2) \cdot [1 - (t_1 + t_2)] = 0$$

Poichè cerchiamo punti distinti ($t_2 \neq t_1$) possiamo scartare il primo fattore. Resta la condizione:

$$t_1 + t_2 = 1 \implies t_2 = 1 - t_1$$

Sostituendo nella seconda equazione si ottiene:

$$t_1 - t_1^3 = 1 - t_1 - (1 - t_1)^3$$

$$t_1 - t_1^3 = 1 - t_1 - (1 - 3t_1 + 3t_1^2 - t_1^3)$$

$$t_1 - t_1^3 = 1 - t_1 - 1 + 3t_1 - 3t_1^2 + t_1^3$$

$$2t_1^3 - 3t_1^2 + t_1 = 0$$

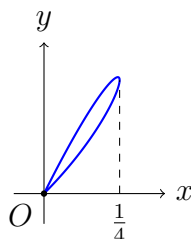
$$t_1(2t_1^2 - 3t_1 + 1) = 0$$

Da cui otteniamo $t_1 = 0$, $t_1 = 1$, $t_1 = \frac{1}{2}$. Se $t_1 = \frac{1}{2}$ allora $t_2 = 1 - \frac{1}{2} = \frac{1}{2}$ ma noi cerchiamo $t_1 \neq t_2$. Se $t_1 = 0$ allora $t_2 = 1$ guardando le immagini $\gamma(0) = (0, 0) = \gamma(1)$ tuttavia 1 e 0 sono gli estremi dell'intervallo su cui vogliamo verificare la semplicità della curva, quindi per definizione questo non prova che la curva sia semplice, bensì che sia chiusa. Stessa cosa se $t_1 = 1$ e $t_2 = 0$, è il simmetrico del caso precedente. Abbiamo quindi verificato che la curva è chiusa e semplice su $[0, 1]$.

Ricordiamo che una curva parametrica $\gamma(t)$ definita su un intervallo I si dice regolare se è differenziabile con continuità ($\gamma(t) \in C^1(I)$) e se il vettore derivata non si annulla mai cioè $\gamma'(t) \neq (0, 0) \forall t \in I$. Per la nostra curva la prima condizione è automaticamente verificata in quanto le funzioni che la compongono sono polinomi che sono di classe C^∞ e in particolare C^1 . Verificare la seconda condizione è facile:

$$\gamma'(t) = 0 \iff \begin{cases} 1 - 2t = 0 \\ 1 - 3t^2 = 0 \end{cases} \iff \begin{cases} t = \frac{1}{2} \\ 1 = \frac{3}{8} \end{cases}$$

Che chiaramente è impossibile. Per cui la curva è regolare su \mathbb{R} e in particolare sull'intervallo dato. Per disegnare qualitativamente il grafico può essere utile notare che $x(t)$ è crescente in $[0, \frac{1}{2}]$ mentre $y(t)$ è crescente in $[0, \frac{1}{\sqrt{3}}]$. Il grafico di $\gamma(t)$ per $t \in [0, 1]$ è:



Il sostegno della curva è un "laccio" situato interamente nel primo quadrante. La curva parte dall'origine con tangente $y = x$ (poiché per $t \rightarrow 0$, il rapporto $y'(t)/x'(t) \rightarrow 1$), raggiunge la massima estensione orizzontale in $x = 1/4$ (per $t = 1/2$), raggiunge la massima altezza poco dopo (per $t = 1/\sqrt{3}$) e ritorna nell'origine con una pendenza maggiore (tangente $y = 2x$, poiché per $t \rightarrow 1$ il rapporto delle derivate tende a 2).

Esercizio 1.2. Calcolare la lunghezza del grafico di $f(x) = x^{3/2}$ per $x \in [1, 4]$.

Soluzione. Per il grafico di una funzione esplicita $y = f(x)$ si usa la parametrizzazione $\vec{r}(x) = (x, f(x))$. Qui

$$\vec{r}'(x) = (1, f'(x)) = (1, \frac{3}{2}x^{1/2}),$$

quindi la lunghezza è

$$L = \int_1^4 \sqrt{1 + (f'(x))^2} dx = \int_1^4 \sqrt{1 + \frac{9}{4}x} dx.$$

Ponendo $u = 1 + \frac{9}{4}x$ si ha $du = \frac{9}{4}dx$, quindi $dx = \frac{4}{9}du$. Quando $x = 1$ si ha $u = \frac{13}{4}$ e quando $x = 4$ si ha $u = 10$. Otteniamo

$$L = \frac{4}{9} \int_{13/4}^{10} u^{1/2} du = \frac{4}{9} \cdot \frac{2}{3} [u^{3/2}]_{13/4}^{10} = \frac{8}{27} \left(10^{3/2} - \left(\frac{13}{4}\right)^{3/2} \right).$$

Si può semplificare la seconda potenza frazionaria: $\left(\frac{13}{4}\right)^{3/2} = \frac{13\sqrt{13}}{8}$. Quindi

$$L = \frac{8}{27} \cdot 10\sqrt{10} - \frac{8}{27} \cdot \frac{13\sqrt{13}}{8} = \frac{1}{27} (80\sqrt{10} - 13\sqrt{13}).$$

Valore numerico:

$$L \approx 7.6337054160 \approx 7.63.$$

Esercizio 1.3. Disegnare la linea Γ di equazione $x^{\frac{2}{3}} + y^{\frac{2}{3}} = 1$. Scriverne una parametrizzazione, specificare se essa è regolare e calcolarne la lunghezza.

Soluzione. Notiamo che la funzione non è esplicitabile per y . Per ottenere una parametrizzazione si può pensare di sfruttare una parametrizzazione trigonometrica:

$$\begin{cases} x^{\frac{1}{3}} = \cos(t) \\ y^{\frac{1}{3}} = \sin(t) \end{cases} \iff \begin{cases} x = \cos^3(t) \\ y = \sin^3(t) \end{cases} \quad \forall t \in [0, 2\pi]$$

Otteniamo quindi $\vec{r}(t) = (\cos^3(t), \sin^3(t))$, verifichiamo se la curva è regolare:

$$\vec{v}(t) = (-3\sin(t)\cos^2(t), 3\cos(t)\sin^2(t))$$

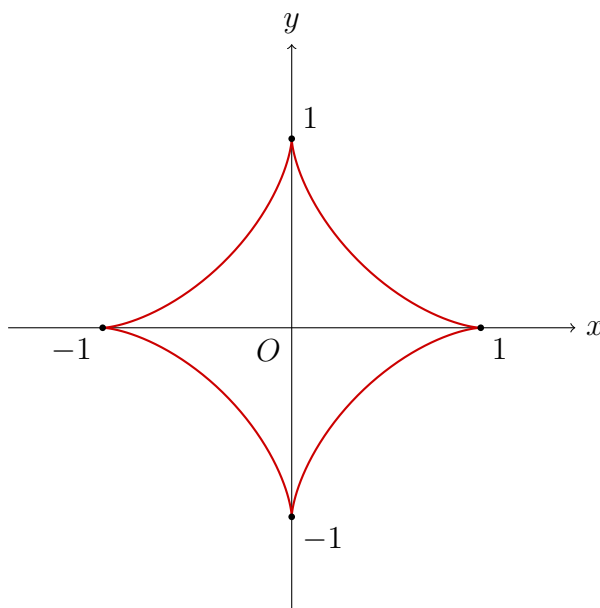
$$\vec{v}(t) = 0 \iff \begin{cases} -3 \sin(t) \cos^2(t) = 0 \\ 3 \cos(t) \sin^2(t) = 0 \end{cases} \iff t = \frac{k\pi}{2}$$

Quindi la parametrizzazione non è regolare, tuttavia è regolare a tratti per cui la lunghezza della curva è comunque ben definita. Se ora calcolassimo direttamente la lunghezza senza ulteriori semplificazioni l'integrale da risolvere sarebbe troppo difficile. Possiamo però notare che la curva è simmetrica sia rispetto all'asse x che rispetto all'asse y , infatti si verifica facilmente che sostituendo x con $-x$ e y con $-y$ a causa del quadrato l'espressione della curva non cambia. Questo significa che il grafico è diviso in quattro "spicchi" identici e possiamo calcolare la lunghezza totale come la lunghezza di uno spicchio moltiplicata per 4:

$$\|\vec{v}(t)\| = \sqrt{9 \sin^2(t) \cos^4(t) + 9 \cos^2(t) \sin^4(t)} = \sqrt{9 \sin^2(t) \cos^2(t) \cdot 1} = 3 |\sin(t) \cos(t)|$$

Scegliendo la porzione di grafico nel primo quadrante ($t \in [0, \frac{\pi}{2}]$) possiamo togliere il modulo e calcolare la lunghezza come:

$$\begin{aligned} L &= 4 \cdot \int_0^{\frac{\pi}{2}} 3 \sin(t) \cos(t) dt = 6 \cdot \int_0^{\frac{\pi}{2}} 2 \sin(t) \cos(t) dt = \\ &= 6 \cdot \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin(2t) dt = [-3 \cos(2t)]_0^{\frac{\pi}{2}} = 3 + 3 = 6 \end{aligned}$$



Il sostegno è un ipocicloide a quattro cuspidi (detto astroide). La curva è contenuta nel quadrato $[-1, 1] \times [-1, 1]$. Si notano chiaramente le quattro cuspidi in $(1, 0)$, $(0, 1)$, $(-1, 0)$, $(0, -1)$ dove la tangente non è unica (la derivata si annulla). La simmetria rispetto agli assi è evidente.

Esercizio 1.4. Dato un filo disposto lungo la curva definita da $\vec{r}(t) = (t^2 + 1)\underline{i} + e^t \underline{j} + 2t\underline{k}$ per $t \in [1, 2]$. Calcolare la massa totale del filo se la densità è $\delta(x, y, z) = \sqrt{4x + y^2}$

Soluzione. La massa M sarà pari all'integrale di linea di prima specie:

$$M = \int_{\gamma} \delta ds = \int_1^2 \delta(\vec{r}(t)) \cdot \|\vec{v}(t)\| dt$$

Calcoliamo la velocità e la sua norma:

$$\vec{v}(t) = (2t, e^t, 2) \implies \|\vec{v}(t)\| = \sqrt{4t^2 + e^{2t} + 4}$$

Valutiamo la densità lungo la curva sostituendo $x = t^2 + 1$ e $y = e^t$:

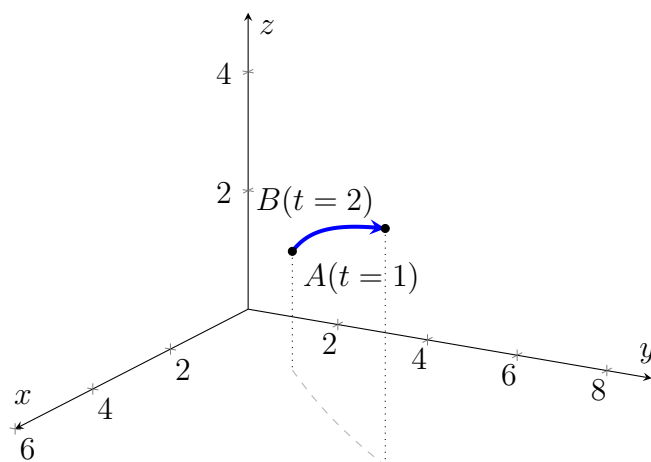
$$\delta(\vec{r}(t)) = \sqrt{4(t^2 + 1) + (e^t)^2} = \sqrt{4t^2 + 4 + e^{2t}}$$

Notiamo che la densità e la norma della velocità coincidono, quindi il loro prodotto elimina la radice:

$$\delta(\vec{r}(t)) \cdot \|\vec{v}(t)\| = \left(\sqrt{4t^2 + e^{2t} + 4}\right)^2 = 4t^2 + e^{2t} + 4$$

Risolviamo l'integrale:

$$\begin{aligned} M &= \int_1^2 (4t^2 + e^{2t} + 4) dt = \left[\frac{4t^3}{3} + \frac{e^{2t}}{2} + 4t \right]_1^2 = \\ &= \left(\frac{32}{3} + \frac{e^4}{2} + 8 \right) - \left(\frac{4}{3} + \frac{e^2}{2} + 4 \right) = \\ &= \frac{28}{3} + 4 + \frac{e^4 - e^2}{2} = \frac{40}{3} + \frac{e^4 - e^2}{2} \end{aligned}$$



Esercizio 1.5. Si consideri la curva parametrizzata da: $\vec{r}(t) = e^t \underline{i} + \sqrt{2}t \underline{j} - e^{-t} \underline{k}$ per $t \in [0, \log(4)]$. Stabilire se è semplice, chiusa e regolare. Se possibile calcolare la lunghezza nell'intervallo specificato.

Soluzione. La curva è semplice, per verificarlo basta osservare che $x(t) = e^t$ è iniettiva, quindi la curva è anch'essa iniettiva. Per verificare se è chiusa o meno basta valutare il valore che assume $\vec{r}(t)$ agli estremi: $\vec{r}(0) = (1, 0, -1) \neq \vec{r}(\log(4)) = (4, \sqrt{2}\log(4), -\frac{1}{4})$ quindi \vec{r} non è chiusa. Per determinare se è regolare osserviamo che ognuna delle tre funzioni che compongono la curva è di classe C^∞ e in particolare C^1 . Siccome l'esponenziale non si annulla per nessun t possiamo concludere che la derivata di \vec{r} non si annulla mai, quindi $\vec{r}(t)$ è regolare. Calcoliamo la lunghezza L del grafico nell'intervallo dato:

$$\begin{aligned} L &= \int_0^{\log(4)} \|\vec{v}(t)\| dt = \int_0^{\log(4)} \sqrt{e^{2t} + 2 + e^{-2t}} dt = \\ &= \int_0^{\log(4)} \sqrt{(e^t + e^{-t})^2} dt = \int_0^{\log(4)} (e^t + e^{-t}) dt = 4 - 1 - \frac{1}{4} + 1 = \frac{15}{4} \end{aligned}$$

Esercizio 1.6. Sia γ così descritta: $\vec{r}(t) = (e^t \cos(t), e^t \sin(t))$, con $t \in [0, 4\pi]$. Stabilire se è semplice, chiusa, regolare e calcolare l'integrale su γ di $f(x, y) = \sqrt{x^2 + y^2}$.

Soluzione. La curva $\vec{r}(t)$ descrive una spirale logaritmica le cui componenti in coordinate polari sono $\rho(t) = e^t$ e $\theta(t) = t$. Iniziamo analizzando le proprietà della curva. Poiché il raggio vettore $\rho(t) = e^t$ è una funzione strettamente crescente, la distanza dall'origine aumenta costantemente per ogni t ; questo garantisce l'iniettività della funzione, pertanto la curva è semplice (non passa mai due volte per lo stesso punto). La curva non è chiusa, dato che il punto iniziale $\vec{r}(0) = (1, 0)$ è distinto dal punto finale $\vec{r}(4\pi) = (e^{4\pi}, 0)$.

Per quanto riguarda la regolarità, osserviamo che le componenti sono funzioni di classe C^1 . Calcoliamo il vettore velocità:

$$\vec{v}(t) = \vec{r}'(t) = (e^t(\cos t - \sin t), e^t(\sin t + \cos t))$$

La norma del vettore velocità risulta essere:

$$\|\vec{v}(t)\| = \sqrt{e^{2t}(\cos t - \sin t)^2 + e^{2t}(\sin t + \cos t)^2} = \sqrt{2e^{2t}(\cos^2 t + \sin^2 t)} = \sqrt{2}e^t$$

Poiché l'esponenziale è strettamente positivo, $\|\vec{v}(t)\| \neq 0$ per ogni $t \in [0, 4\pi]$, dunque la curva è regolare in tutto il dominio.

Concludiamo calcolando l'integrale di linea di prima specie. Sostituendo la parametrizzazione nella funzione integranda otteniamo $f(\vec{r}(t)) = \sqrt{(e^t \cos t)^2 + (e^t \sin t)^2} = e^t$. L'integrale diventa:

$$\begin{aligned} \int_{\gamma} f \, ds &= \int_0^{4\pi} f(\vec{r}(t)) \cdot \|\vec{v}(t)\| \, dt = \int_0^{4\pi} e^t \cdot \sqrt{2}e^t \, dt = \sqrt{2} \int_0^{4\pi} e^{2t} \, dt \\ &= \sqrt{2} \left[\frac{e^{2t}}{2} \right]_0^{4\pi} = \frac{\sqrt{2}}{2} (e^{8\pi} - 1). \end{aligned}$$

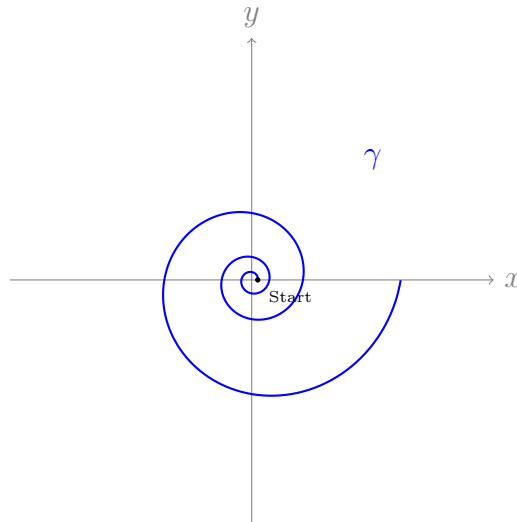


Figure 1: Rappresentazione qualitativa della spirale γ

Esercizio 1.7. Si consideri la curva $\phi(t) = (\log(t^2 - 1), t)$ con $t \in [2, 3]$. Scrivere l'equazione della retta tangente al sostegno nel punto $\phi(5/2)$ e calcolare la lunghezza della curva.

Soluzione. Svolgiamo il primo punto (equazione della retta tangente) in due modi diversi per verifica.

Metodo 1: Teorema del Dini (Funzioni implicite) Eliminando il parametro t (dato che $y = t$), otteniamo l'equazione cartesiana $x = \log(y^2 - 1)$, che possiamo scrivere in forma implicita come:

$$F(x, y) = x - \log(y^2 - 1) = 0$$

La funzione F è di classe C^∞ nel dominio considerato. Il punto di contatto è $P = \phi(5/2) = (\log(21/4), 5/2)$. Verifichiamo che $F(P) = 0$ (ovvio per costruzione). Calcoliamo le derivate parziali:

$$F_x = 1, \quad F_y(x, y) = -\frac{2y}{y^2 - 1}$$

Valutiamo F_y nel punto P (dove $y = 5/2$):

$$F_y(P) = -\frac{2(5/2)}{(5/2)^2 - 1} = -\frac{5}{21/4} = -\frac{20}{21} \neq 0$$

Poiché $F_y \neq 0$, possiamo applicare il teorema. Il coefficiente angolare m è dato da:

$$m = -\frac{F_x(P)}{F_y(P)} = -\frac{1}{-20/21} = \frac{21}{20}$$

L'equazione della retta tangente passante per P è dunque:

$$y - \frac{5}{2} = \frac{21}{20} \left(x - \log \frac{21}{4} \right)$$

Metodo 2: Vettore derivato (Parametrico) Calcoliamo il vettore velocità:

$$\phi'(t) = \left(\frac{d}{dt} \log(t^2 - 1), \frac{d}{dt} t \right) = \left(\frac{2t}{t^2 - 1}, 1 \right)$$

La curva è regolare poiché la seconda componente (1) non è mai nulla. Valutiamo il vettore in $t = 5/2$:

$$\phi'(5/2) = \left(\frac{2(5/2)}{25/4 - 1}, 1 \right) = \left(\frac{5}{21/4}, 1 \right) = \left(\frac{20}{21}, 1 \right)$$

Questo è il vettore direttore \vec{v} . Il coefficiente angolare è il rapporto tra la componente y e la componente x : $m = 1/(20/21) = 21/20$, che conferma il risultato precedente.

Calcolo della lunghezza La lunghezza L è data dall'integrale della norma del vettore velocità:

$$L = \int_2^3 \|\phi'(t)\| dt = \int_2^3 \sqrt{\left(\frac{2t}{t^2 - 1}\right)^2 + 1^2} dt$$

Svolgiamo i calcoli sotto radice (minimo comune multiplo):

$$= \int_2^3 \sqrt{\frac{4t^2 + (t^2 - 1)^2}{(t^2 - 1)^2}} dt = \int_2^3 \sqrt{\frac{t^4 - 2t^2 + 1 + 4t^2}{(t^2 - 1)^2}} dt$$

Riconosciamo il quadrato perfetto al numeratore ($t^4 + 2t^2 + 1 = (t^2 + 1)^2$):

$$= \int_2^3 \sqrt{\frac{(t^2 + 1)^2}{(t^2 - 1)^2}} dt = \int_2^3 \frac{t^2 + 1}{t^2 - 1} dt$$

Ora utilizziamo la scomposizione in fratti semplici. Osserviamo che $\frac{t^2+1}{t^2-1} = \frac{t^2-1+2}{t^2-1} = 1 + \frac{2}{t^2-1}$. Scomponendo ulteriormente $\frac{2}{t^2-1} = \frac{1}{t-1} - \frac{1}{t+1}$, otteniamo:

$$L = \int_2^3 \left(1 + \frac{1}{t-1} - \frac{1}{t+1} \right) dt$$

Integriamo:

$$= [t + \log |t-1| - \log |t+1|]_2^3 = \left[t + \log \left(\frac{t-1}{t+1} \right) \right]_2^3$$

Sostituiamo gli estremi:

$$\begin{aligned} &= \left(3 + \log \frac{2}{4} \right) - \left(2 + \log \frac{1}{3} \right) \\ &= 3 + \log \frac{1}{2} - 2 - \log \frac{1}{3} = 1 - \log 2 - (\log 1 - \log 3) \\ &= 1 - \log 2 + \log 3 = 1 + \log \left(\frac{3}{2} \right) \end{aligned}$$

2 Serie di funzioni

Esercizio 2.1. Stabilire se la serie $\sum_{n=0}^{+\infty} \frac{\sin(nx)}{2^n}$ è convergente puntualmente, assolutamente, totalmente su \mathbb{R} .

Soluzione. Se riuscissimo a dimostrare che la serie converge totalmente, sarebbe anche dimostrato che converge assolutamente e puntualmente. In questo caso è facile dimostrare ciò tramite il criterio di Weierstrass, anche noto come M-test.

$$\sup_{x \in \mathbb{R}} \left| \frac{\sin(nx)}{2^n} \right| = \frac{1}{2^n}$$

Ma $\sum_{n=0}^{+\infty} \frac{1}{2^n}$ è una serie geometrica convergente, si conclude che la serie di partenza è convergente in \mathbb{R} e quindi è anche assolutamente e puntualmente convergente.

Esercizio 2.2. Stabilire se la serie $\sum_{n=0}^{+\infty} \frac{nx}{e^{nx}}$ è convergente puntualmente, assolutamente, totalmente su \mathbb{R} .

Soluzione. Sia $f_n(x) = \frac{nx}{e^{nx}}$, allora applicando il criterio del rapporto su $f_n(x)$ si ha che:

$$\left| \frac{f_{n+1}(x)}{f_n(x)} \right| = \frac{(n+1)|x|}{e^{(n+1)x}} \cdot \frac{e^{nx}}{n|x|} = \frac{n+1}{e^x n} \underset{n \rightarrow \infty}{\sim} \frac{1}{e^x}$$

Quindi per il criterio del rapporto si ha che se $x > 0$ allora $e^x > 1$ e quindi $\frac{1}{e^x} < 1$ perciò la serie è assolutamente convergente e puntualmente convergente. Al contrario se $x < 0$ allora $\frac{1}{e^x} > 1$ la serie non converge. Per $x = 0$ il termine della serie diventa:

$$f_n(x) = f_n(0) = 0$$

E quindi ovviamente la serie converge assolutamente e semplicemente. Dunque l'insieme di convergenza è $E = [0, +\infty)$. Per ciò che riguarda la convergenza totale possiamo subito dire che sicuramente non c'è su \mathbb{R} però magari c'è su E :

$$\sup_{x \in E} |f_n(x)| = \sup_{x \geq 0} \frac{nx}{e^{nx}} = \frac{1}{e}$$

Ma la serie di $\frac{1}{e}$ non converge, per cui non c'è convergenza totale in E .

Esercizio 2.3. Si consideri la serie $s := \sum_{n=1}^{+\infty} n^{-5} x^4$. Stabilire qual è l'insieme di convergenza E e specificare in quali sottoinsiemi di E la convergenza è assoluta e totale.

Soluzione. Questa serie è una serie di potenze del tipo:

$$\sum_{n=0}^{+\infty} a_n (x - x_0)^n \text{ con } a_n = \frac{1}{n^5} \text{ e } x_0 = 0$$

Calcoliamo il raggio di convergenza:

$$R = \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{a_n}{a_{n+1}} = \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{(n+1)^5}{n^5} = 1$$

Da cui abbiamo che la serie converge totalmente $\forall x \in (-1, 1)$. Non sappiamo nulla però sulla convergenza agli estremi, che dobbiamo controllare. Per $x = \pm 1$:

$$s = \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{(\pm 1)^n}{n^5}$$

Che è assolutamente convergente. Si conclude che l'insieme di convergenza di s è $E = [-1, 1]$. Possiamo verificare facilmente che la convergenza su E è totale infatti:

$$\sup_{x \in E} \left| \frac{x^n}{n^5} \right| = \frac{1}{n^5}$$

Ma $\sum_{n=1}^{+\infty} \frac{1}{n^5}$ converge quindi la convergenza di s è totale su E .

Esercizio 2.4. Si studi la convergenza della serie $s := \sum_{n=2}^{+\infty} \frac{x^n}{n - \sqrt{n}}$

Soluzione. Si tratta di una serie di potenze centrata nell'origine. Calcoliamo il raggio di convergenza:

$$R = \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{a_n}{a_{n+1}} = \frac{n+1 - \sqrt{n+1}}{n - \sqrt{n}} \underset{n \rightarrow \infty}{\sim} \frac{n+1}{n} = 1$$

Quindi c'è convergenza assoluta su $(-1, 1)$, verifichiamo gli estremi:

$$\text{Per } x = 1 \quad s = \sum_{n=2}^{+\infty} \frac{1}{n - \sqrt{n}}$$

Che diverge per il criterio del confronto asintotico ($\sim \frac{1}{n}$). Mentre:

$$\text{Per } x = -1 \quad s = \sum_{n=2}^{+\infty} \frac{(-1)^n}{n - \sqrt{n}}$$

Che sicuramente non converge assolutamente, altrimenti otterremmo la stessa serie che per $x = 1$, però converge semplicemente per il criterio di Leibniz, infatti dato:

$$b_n = \frac{1}{n - \sqrt{n}}$$

Si dimostra facilmente che $b_n \geq 0 \forall n$, $\lim_{n \rightarrow +\infty} b_n = 0$ e che b_n sia definitivamente decrescente. Si conclude che l'insieme di convergenza è $E = [-1, 1)$ con convergenza assoluta solo su $(-1, 1)$. Inoltre per la convergenza uniforme di una serie di potenza sui compatti possiamo anche dire che c'è convergenza totale su ogni sottoinsieme compatto, cioè chiuso e limitato in $(-1, 1)$.

Esercizio 2.5. Determinare l'insieme di convergenza puntuale e assoluto di $s := \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{n^2}{3^n} (x-1)^n$.

Soluzione. Si tratta di una serie di potenza centrata in $x_0 = 1$, calcoliamo il raggio di convergenza:

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \sqrt[n]{|a_n|} = \lim_{n \rightarrow +\infty} \sqrt[n]{\frac{n^2}{3^n}} = \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{\sqrt[n]{n^2}}{\sqrt[n]{3^n}} = \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{(\sqrt[n]{n})^2}{3} = \frac{(1)^2}{3} = \frac{1}{3}$$

Da cui si ha che $R = 3$. Quindi la serie converge assolutamente $\forall x \in (-2, 4)$ e non converge per $x < -2 \vee x > 4$. Analizziamo ora il comportamento della serie ai due estremi:

$$\text{Per } x = -2 \quad s = \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{n^2 (-3)^n}{3^n} = \sum_{n=0}^{+\infty} (-1)^n n^2$$

Che non converge in quanto il modulo del termine generale non tende a 0 per $n \rightarrow +\infty$ e quindi neanche il termine generale stesso tende a 0, per cui la serie non può convergere.

$$\text{Per } x = 4 \quad s = \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{n^2(3)^n}{3^n} = \sum_{n=0}^{+\infty} n^2$$

Che ovviamente diverge a $+\infty$. Dunque l'insieme di convergenza è $I = (-2, 4)$ nel quale la convergenza è assoluta. C'è convergenza totale in qualsiasi intervallo $[a, b] \subset I$.

Esercizio 2.6. Si consideri la serie $t := \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{2^n - n}{3^n(n+1)}(x+1)^n$

a) Discutere la convergenza puntuale, assoluta e totale.

b) Dire se è possibile integrare per serie nell'intervallo $[-2, 0]$

Soluzione. a) Si tratta di una serie di potenze centrata in $x_0 = -1$ calcoliamo il raggio di convergenza:

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \sqrt[n]{|a_n|} = \lim_{n \rightarrow +\infty} \sqrt[n]{\frac{2^n - n}{3^n(n+1)}} = \lim_{n \rightarrow +\infty} \sqrt[n]{\frac{2^n}{3^n n}} = \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{2}{3e^{\frac{\ln(n)}{n}}} = \frac{2}{3}$$

Per cui il raggio di convergenza è $R = \frac{3}{2}$ e si ha convergenza assoluta per $x \in (-\frac{5}{2}, \frac{1}{2})$. Adesso verifichiamo la convergenza negli estremi:

$$\text{Per } x = \frac{1}{2} \quad t = \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{2^n - n}{3^n(n+1)} \cdot \left(\frac{3}{2}\right)^n$$

Che non converge, infatti $\frac{2^n - n}{3^n(n+1)} \cdot \left(\frac{3}{2}\right)^n \sim \frac{2^n}{3^n n} \cdot \frac{3^n}{2^n} = \frac{1}{n}$. Riguardo l'altro estremo:

$$\text{Per } x = -\frac{5}{2} \quad t = \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{2^n - n}{3^n(n+1)} \cdot \left(-\frac{3}{2}\right)^n = \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{(-1)^n(2^n - n)}{2^n(n+1)} = \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{(-1)^n}{(n+1)} - \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{(-1)^n n}{2^n(n+1)}$$

Questa è una somma di serie convergenti, infatti la prima converge semplicemente per il criterio di Leibniz mentre la seconda converge assolutamente e quindi semplicemente, in quanto:

$$\left| \frac{(-1)^n n}{(n+1)2^n} \right| = \frac{n}{(n+1)2^n} \sim \frac{n}{n \cdot 2^n} = \frac{1}{2^n}$$

Di cui la serie converge semplicemente. Quindi per $x = -\frac{5}{2}$ s converge semplicemente. Dunque l'insieme di convergenza puntuale è $[-\frac{5}{2}, \frac{1}{2}]$ mentre quello di convergenza assoluta è $(-\frac{5}{2}, \frac{1}{2})$. Possiamo anche dire che c'è convergenza totale su ogni sottoinsieme chiuso e limitato di $(-\frac{5}{2}, \frac{1}{2})$.

b) Avendo stabilito l'insieme di convergenza possiamo dire che $\forall x \in [-\frac{5}{2}, \frac{1}{2}]$ è definita la funzione somma della serie ovvero:

$$s(x) = \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{2^n - n}{3^n(n+1)} \cdot (x+1)^n$$

Integrare per serie significa calcolare l'integrale della funzione somma nell'intervallo specificato come:

$$\int_{-2}^0 s(x) dx = \sum_{n=0}^{+\infty} \int_{-2}^0 f_n(x) dx$$

Essendo la serie convergente totalmente in $[-2, 0] \subset (-\frac{5}{2}, \frac{1}{2})$ l'uguaglianza è garantita, per cui non ci resta che calcolare l'integrale:

$$\begin{aligned} \int_{-2}^0 s(x) dx &= \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{2^n - n}{3^n(n+1)} \int_{-2}^0 (x+1)^n dx \\ &= \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{2^n - n}{3^n(n+1)} \left[\frac{(x+1)^{n+1}}{n+1} \right]_{-2}^0 \\ &= \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{2^n - n}{3^n(n+1)^2} \cdot [1 - (-1)^{n+1}] \end{aligned}$$

Esercizio 2.7. Data l'uguaglianza $\ln(1+x) = \sum_{n=1}^{+\infty} (-1)^{n-1} \cdot \frac{x^n}{n} \quad \forall x \in (-1, 1]$

a) Verificare la convergenza della serie in $I = (-1, 1]$

b) Verificare la validità dell'uguaglianza per $x \in [0, 1]$ deducendola dalla formula di McLaurin con il resto di Lagrange.

Soluzione. Si tratta di una serie di potenze centrata in $x_0 = 0$, calcoliamo il raggio di convergenza:

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \left| \frac{a_{n+1}}{a_n} \right| = \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{n}{n+1} = 1$$

Quindi il raggio di convergenza R è uguale a 1. La convergenza è verificata dunque per $E = (-1, 1)$, analizziamo la convergenza negli estremi, per $x = 1$ la serie diventa:

$$\sum_{n=1}^{+\infty} \frac{(-1)^{n-1}}{n}$$

Che converge per il criterio di Leibniz. Per $x = -1$ invece si ha:

$$\sum_{n=1}^{+\infty} \frac{(-1)^{n-1} \cdot (-1)^n}{n} = - \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{1}{n}$$

Che è divergente. Quindi l'insieme di convergenza è effettivamente $I = (-1, 1]$.

b)

Esercizio 2.8. Si consideri la serie $k = \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{n^3 - \sqrt{n}}{n^2 \cdot 3^n} \cdot (x-4)^n$

a) Discutere la convergenza puntuale e totale della serie

b) Determinare la serie derivata e discuterne la convergenza puntuale e totale

Soluzione. a) Si tratta di una serie di potenze centrata in $x_0 = 4$, calcoliamo il raggio di convergenza:

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \sqrt[n]{|a_n|} = \lim_{n \rightarrow +\infty} \sqrt[n]{\frac{n^3 - \sqrt{n}}{n^2 \cdot 3^n}} = \lim_{n \rightarrow +\infty} \sqrt[n]{\frac{n^3}{n^2 \cdot 3^n}} = \lim_{n \rightarrow +\infty} \sqrt[n]{\frac{n}{3^n}} = \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{e^{\frac{\ln(n)}{n}}}{3} = \frac{1}{3}$$

Da cui si ha che $R = 3$. Quindi c'è convergenza assoluta $\forall x \in (1, 7)$. Analizziamo la convergenza agli estremi:

$$\text{Per } x = 7 \quad k = \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{n^3 - \sqrt{n}}{n^2} \sim \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{n^3}{n^2} = \sum_{n=1}^{+\infty} n = +\infty$$

Quindi nel primo estremo non abbiamo convergenza. Controlliamo il secondo:

$$\text{Per } x = 1 \quad k = \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{(-1)^n \cdot (n^3 - \sqrt{n})}{n^2}$$

Che non converge in quanto il termine generale non è infinitesimo. Concludiamo che nell'intervallo $I = (1, 7)$ abbiamo convergenza puntuale e assoluta mentre abbiamo convergenza totale in $[a, b] \subset (1, 7)$.

b) La serie derivata di s è semplicemente:

$$k' = \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{n^3 - \sqrt{n}}{n \cdot 3^n} (x - 4)^{n-1}$$

La teoria garantisce che questa serie abbia lo stesso raggio di convergenza della serie iniziale. In questo caso ha anche lo stesso insieme di convergenza, infatti non converge per $x = 1$ e $x = 7$. Abbiamo anche gli stessi insiemi di convergenza totale $[a, b] \subset (1, 7)$. Inoltre nell'intervallo $(1, 7)$ è possibile derivare per serie, ovvero è verificata l'uguaglianza:

$$k'(x) = \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{n^3 - \sqrt{n}}{n \cdot 3^n} (x - 4)^{n-1}$$

Esercizio 2.9. Si consideri la serie $s = \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{(\ln(x))^n}{n}$

a) Determinare l'insieme di convergenza della serie

b) Determinare la somma della serie

Soluzione. a) La serie si presenta non esattamente come una serie di potenze ma è facile ricondurla a ciò tramite la sostituzione $t = \ln(x)$. In questo modo si ottiene la serie:

$$s_0 = \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{t^n}{n}$$

Che ha raggio di convergenza:

$$R = \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{1}{\sqrt[n]{|a_n|}} = \lim_{n \rightarrow +\infty} \sqrt[n]{n} = \lim_{n \rightarrow +\infty} e^{\frac{\ln(n)}{n}} = 1$$

Possiamo subito dire che la serie ha insieme di convergenza puntuale $I = [-1, 1)$, infatti per $t = -1$ si ottiene una serie che converge per il criterio di Leibniz mentre per $t = 1$ si ottiene la serie armonica che diverge. Tornando quindi alla variabile originale si ha che s converge per $[\frac{1}{e}, e)$.

b) Partiamo dallo sviluppo di Taylor noto che assomiglia di più alla nostra serie:

$$\ln(1+x) = \sum_{n=1}^{+\infty} (-1)^{n-1} \cdot \frac{x^n}{n} \quad \forall x \in (-1, 1]$$

Ponendo $x = -t$ abbiamo:

$$\ln(1-t) = \sum_{n=1}^{+\infty} (-1)^{n-1} \cdot \frac{(-1)^n \cdot t^n}{n} = \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{-t^n}{n} = - \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{t^n}{n} \quad \forall t \in [-1, 1)$$

Con un altro cambio di variabile $t = \ln(x)$ si ottiene:

$$\ln(1 - \ln(x)) = - \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{(\ln(x))^n}{n} \quad \forall x \in \left[\frac{1}{e}, e\right)$$

Da cui concludiamo che la somma della nostra serie di partenza è $s(x) = -\ln(1 - \ln(x))$.

Esercizio 2.10. Sia la serie $s = \sum_{n=1}^{+\infty} nt^n$

- a) Determinare gli insiemi dove la serie converge totalmente e puntualmente
- b) Determinare la somma della serie (Suggerimento: raccogliere una t nella serie)
- c) Determinare l'insieme di convergenza di $\sum_{n=1}^{+\infty} n \cdot \left(\frac{x-1}{x-2}\right)^n$

Soluzione. a) Si tratta di una serie di potenze centrata in $x_0 = 0$, calcoliamo il raggio di convergenza:

$$R = \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{1}{\sqrt[n]{|a_n|}} = \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{1}{\sqrt[n]{n}} = \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{1}{e^{\frac{\ln n}{n}}} = 1.$$

Quindi la serie converge assolutamente e puntualmente in $I = (-1, 1)$, non è necessario analizzare la convergenza negli estremi perché è ovvio che in questi punti la serie non converga. La convergenza totale si ha per ogni intervallo $[a, b] \subset I$.

b) Raccogliendo una t otteniamo ciò che segue:

$$\sum_{n=1}^{+\infty} nt^n = \sum_{n=1}^{+\infty} t \cdot nt^{n-1} = t \sum_{n=1}^{+\infty} nt^{n-1} = t \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{d}{dt}(t^n)$$

Siccome è una serie di potenze, all'interno dell'intervallo $(-R, R)$ è possibile derivare termine a termine:

$$t \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{d}{dt}(t^n) = t \cdot \frac{d}{dt} \left[\sum_{n=1}^{+\infty} t^n \right] = t \cdot \frac{d}{dt} \left[\sum_{n=0}^{+\infty} t^n - 1 \right] = t \cdot \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{1-t} - 1 \right) = \frac{t}{(1-t)^2}$$

Si noti che tale somma della serie vale $\forall t \in I$.

c) Una possibile idea è ricondurre la serie data alla serie iniziale ed è possibile fare ciò ponendo $t = \frac{x-1}{x-2}$ e poi risolvendo un sistema di disequazioni fratte per adattare correttamente l'intervallo al cambiamento di variabili. Un'altra idea può essere ricondurre la serie data ad una generica serie di potenze tramite la sostituzione $\frac{1}{t} = x - 2, t \neq 0$ così da ottenere:

$$\sum_{n=1}^{+\infty} n \cdot \left(\frac{\frac{1}{t} + 1}{\frac{1}{t}} \right)^n = \sum_{n=1}^{+\infty} n \cdot (t+1)^n$$

Questa è una semplice serie di potenze centrata in $x_0 = -1$ che ha raggio di convergenza $R = 1$. Quindi converge assolutamente e puntualmente in $E = (-2, 0)$ (per gli estremi si può facilmente verificare che non converge, infatti in nessuno dei due casi il termine generale tende a 0 per $n \rightarrow +\infty$). Tornando alla variabile originale quindi abbiamo che la serie data converge $\forall x \in (-\infty, \frac{3}{2})$.

Esercizio 2.11. *Discutere la convergenza e determinare la somma di*
 $s := \sum_{n=1}^{+\infty} (x-5)^n \frac{(-7)^n}{n!}$.

Soluzione. a) Si tratta di una serie di potenze centrata in $x_0 = 5$, calcoliamo il raggio di convergenza:

$$R = \lim_{n \rightarrow +\infty} \left| \frac{a_n}{a_{n+1}} \right| = \lim_{n \rightarrow +\infty} \left| \frac{(-7)^n}{n!} \cdot \frac{(n+1)!}{(-7)^{n+1}} \right| = \lim_{n \rightarrow +\infty} \left| \frac{(-7)^n}{n!} \cdot \frac{n! \cdot (n+1)}{(-7)^n \cdot (-7)} \right| = \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{n+1}{7} = +\infty$$

Quindi la funzione converge assolutamente e puntualmente $\forall x \in \mathbb{R}$ e totalmente in ogni intervallo $[a, b] \subseteq \mathbb{R}$.

b) Compattando l'espressione della serie si ottiene:

$$s = \sum_{n=1}^{+\infty} (x-5)^n \frac{(-7)^n}{n!} = \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{(35-7x)^n}{n!}$$

Che è evidentemente molto simile allo sviluppo di Taylor di e^{35-7x} (lo si vede facilmente imponendo $t = 35 - 7x$), ma differisce da quest'ultimo per il fatto che in questa serie l'indice di partenza è $n = 1$ e non $n = 0$. Ci serve quindi di sottrarre il termine corrispondente a $n = 0$, che vale 1. Concludiamo che la somma della serie s è $s(x) = e^{35-7x} - 1$.

Esercizio 2.12. *Studiare la convergenza puntuale e totale di* $s = \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{x^{2n}}{5^n}$.

Soluzione. La serie data corrisponde alla serie:

$$\sum_{n=0}^{+\infty} \frac{t^n}{5^n} \quad \text{Per } t = x^2$$

Che è una serie di potenze centrata sull'origine, di cui possiamo facilmente calcolare il raggio di convergenza:

$$R = \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{1}{\sqrt[n]{|a_n|}} = \lim_{n \rightarrow +\infty} \sqrt[n]{5^n} = 5$$

Quindi abbiamo convergenza assoluta e puntuale per $t \in (-5, 5)$ (è facile vedere che per gli estremi la serie non converge nè assolutamente nè puntualmente in quanto il termine generale non è infinitesimo). La convergenza assoluta è verificata per $[a, b] \subset (-5, 5)$. Tornando quindi alla variabile iniziale si ha che la serie converge assolutamente e puntualmente $\forall x \in I := (-\sqrt{5}, \sqrt{5})$ e totalmente $\forall [a, b] \subset I$.

Esercizio 2.13. *Calcolare con un errore inferiore a 10^{-4} l'integrale $\int_0^1 \frac{\sin(x)}{x} dx$.*

Soluzione. La funzione integranda è nota per non avere una primitiva esprimibile in termini di funzioni elementari. Notiamo che $\frac{\sin(x)}{x} \xrightarrow{x \rightarrow 0} 1$ quindi possiamo pensare prolungare per continuità l'integranda, ponendo:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{\sin(x)}{x} & \text{se } x \neq 0 \\ 1 & \text{se } x = 0 \end{cases}$$

Ricordandoci lo sviluppo in serie del seno:

$$\sin(x) = \sum_{n=0}^{+\infty} (-1)^n \cdot \frac{x^{2n+1}}{(2n+1)!} \quad \forall x \in \mathbb{R}$$

Abbiamo che per $x \neq 0$:

$$f(x) = \frac{\sin(x)}{x} = \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{(-1)^n \cdot x^{2n}}{(2n+1)!}$$

Mentre per $x = 0$ provando con la stessa serie:

$$\sum_{n=0}^{+\infty} \frac{(-1)^n \cdot x^{2n}}{(2n+1)!} = \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{(-1)^n \cdot 0^{2n}}{(2n+1)!} = 1 + 0 + 0 + 0 + \dots = 1 = f(0)$$

Ma quindi $\forall x \in \mathbb{R}$:

$$f(x) = \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{(-1)^n \cdot x^{2n}}{(2n+1)!}$$

Cioè la convergenza è totale su $[a, b] \subset \mathbb{R}$ e in particolare lo è su $[0, 1]$ che è l'intervallo di integrazione che ci interessa. Dunque per il teorema di integrabilità termine a termine abbiamo che:

$$\begin{aligned} I = \int_0^1 f(x) dx &= \sum_{n=0}^{+\infty} \int_0^1 \frac{(-1)^n x^{2n}}{(2n+1)!} dx = \sum_{n=0}^{+\infty} (-1)^n \left[\frac{x^{2n+1}}{(2n+1)(2n+1)!} \right]_0^1 \\ &= 1 - \frac{1}{3 \cdot 3!} + \frac{1}{5 \cdot 5!} - \frac{1}{7 \cdot 7!} + \frac{1}{9 \cdot 9!} - \dots \end{aligned}$$

Ora si tratta di capire dove arrestarsi a calcolare i termini. Si può pensare di sfruttare il criterio di Leibniz e in particolare il risultato sulla stima del resto per serie alternanti. Il teorema afferma che se anzichè sommare infiniti termini ne vengono sommati $n-1$ allora l'errore rispetto al reale valore di convergenza della serie sarà in modulo minore rispetto al valore del termine n -esimo. Nello specifico calcolando qualche valore si ha che:

$$\frac{1}{5 \cdot 5!} = \frac{1}{5 \cdot 120} = \frac{1}{600} > 10^{-4}$$

$$\frac{1}{7 \cdot 7!} = \frac{1}{49 \cdot 6!} = \frac{1}{49 \cdot 720} < 10^{-4}$$

Quindi approssimando per eccesso si ha che:

$$I \approx 1 - \frac{1}{3 \cdot 3!} + \frac{1}{5 \cdot 5!} = \frac{1703}{1800} = 0.946\bar{1}$$

3 Serie trigonometriche e serie di Fourier

Esercizio 3.1. Data la funzione 2π -periodica $f(x) = \frac{1}{4}(x - |x|)^2 \quad \forall x \in (-\pi, \pi]$

a) Determinare il grafico su $(-2\pi, 2\pi)$

b) Determinare la serie di Fourier di f

c) Discutere la convergenza puntuale

Soluzione. a) Possiamo riscrivere f come la seguente funzione definita a tratti:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{4}(x + x)^2 = x^2 & \text{se } x \in (-\pi, 0) \\ 0 & \text{se } x \in [0, \pi] \end{cases}$$

Estendendo per periodicità f e rendendola una funzione 2π -periodica, otteniamo il grafico:

b) Ricordiamo che la serie di Fourier di f è:

$$s(x) = a_0 + \sum_{n=1}^{+\infty} (a_n \cos(nx) + b_n \sin(nx))$$

Iniziamo a calcolare i coefficienti:

$$a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) dx = \frac{1}{2\pi} \left(\int_{-\pi}^0 x^2 dx + \int_0^{\pi} 0 dx \right) = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{x^3}{3} \right]_{-\pi}^0 = \frac{\pi^2}{6}$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos(nx) dx = \int_{-\pi}^0 x^2 \cos(nx) dx$$

Calcoliamo una primitiva per parti:

$$\int x^2 \cos(nx) dx = \frac{x^2 \sin(nx)}{n} - \int \frac{2x \sin(nx)}{n} dx = \frac{x^2 \sin(nx)}{n} + \frac{2x \cos(nx)}{n^2} - \frac{2 \sin(nx)}{n^3}$$

Valutando tra gli estremi abbiamo che:

$$a_n = \frac{1}{\pi} \left[\frac{x^2 \sin(nx)}{n} + \frac{2x \cos(nx)}{n^2} - \frac{2 \sin(nx)}{n^3} \right]_{-\pi}^0 = \frac{2 \cdot (-1)^n}{n^2}$$

Passiamo a b_n :

$$\begin{aligned} b_n &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \sin(nx) dx = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^0 x^2 \sin(nx) dx = \\ &= \frac{1}{\pi} \left[\frac{2x \sin(nx)}{n^2} - \frac{x^2 \cos(nx)}{n} + \frac{2 \cos(nx)}{n^3} \right]_{-\pi}^0 = \frac{1}{\pi} \left(2 \cdot \frac{1 - (-1)^n}{n^3} + \frac{\pi^2 (-1)^n}{n} \right) = \\ &= 2 \cdot \frac{1 - (-1)^n}{\pi n^3} + \frac{\pi (-1)^n}{n} \end{aligned}$$

Concludiamo che la serie di Fourier di f è:

$$s(x) = \frac{\pi^2}{6} + \sum_{n=1}^{+\infty} \left\{ \frac{2(-1)^n}{n^2} \cos(nx) + \left[2 \cdot \frac{1 - (-1)^n}{\pi n^3} + \frac{\pi (-1)^n}{n} \right] \sin(nx) \right\}$$

c) Osserviamo che f è regolare a tratti nel suo intervallo di definizione. La teoria dunque

garantisce che la serie converga $\forall x \in \mathbb{R}$ e in particolare converga ad f nei punti in cui quest'ultima è continua, cioè per $x \neq \pi + 2k\pi$. Per ognuno di questi punti problematici invece la serie converge alla media tra limite destro e sinistro:

$$s(\pi + 2k\pi) = \frac{1}{2} \lim_{x \rightarrow \pi^-} f(x) + \frac{1}{2} \lim_{x \rightarrow \pi^+} f(x) = \frac{0 + \pi^2}{2} = \frac{\pi^2}{2}$$

Che non è uguale al valore che f assume in questi punti (0) per cui la serie converge ad $f \forall x \neq \pi + 2k\pi$.

Esercizio 3.2. Sia f dispari e 2π -periodica tale che

$$f(x) = \begin{cases} 1 & \text{se } x \in (0, \pi) \\ 0 & \text{se } x = 0 \vee x = \pi \end{cases}$$

- a) Disegnare il grafico di f e calcolarne la serie di Fourier
- b) Discutere la convergenza puntuale, totale e in media quadratica della serie di Fourier
- c) Dedurre il valore di $\sum_{n=0}^{+\infty} \frac{(-1)^n}{2n+1}$
- d) Dedurre il valore di $\sum_{n=0}^{+\infty} \frac{1}{(2n+1)^2}$

Soluzione. a) Considerando che f è dispari e 2π -periodica, il grafico di f è:

Stavolta il calcolo dei coefficienti di Fourier è leggermente più leggero per il fatto che la funzione considerata è dispari e quindi integrandola su un intervallo simmetrico si ottiene zero:

$$a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) dx = 0$$

Ora ricordiamoci che una funzione dispari moltiplicata per una dispari da una funzione pari, infatti siano f e g funzioni dispari allora:

$$h(-x) = f(-x)g(-x) = [-f(x)][-g(x)] = f(x)g(x) = h(x)$$

E che una funzione dispari moltiplicata per una funzione pari da una funzione dispari infatti sia f pari e g dispari:

$$h(-x) = f(-x)g(-x) = [-f(x)][g(x)] = -f(x)g(x) = -h(x)$$

Dunque tornando al calcolo dei nostri coefficienti:

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos(nx) dx = 0$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \sin(nx) dx = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} 1 \cdot \sin(nx) = \frac{2}{\pi} \left[-\frac{\cos(nx)}{n} \right]_0^{\pi} = 2 \cdot \frac{1 - (-1)^n}{n\pi}$$

Concludiamo che la serie di Fourier di f è:

$$s(x) = \sum_{n=1}^{+\infty} 2 \sin(nx) \cdot \frac{1 - (-1)^n}{n\pi}$$

b) Osserviamo che f è 2π -periodica e regolare a tratti in $[-\pi, \pi]$ quindi per la teoria converge in norma quadratica. Inoltre siccome f è regolare la serie di Fourier converge

$\forall x \in \mathbb{R}$. Dobbiamo tuttavia analizzare la convergenza della serie per i punti in cui f è discontinua ovvero per $x = k\pi$, per questi punti:

$$s(k\pi) = \frac{1}{2} \lim_{x \rightarrow 0^-} f(x) + \frac{1}{2} \lim_{x \rightarrow 0^+} f(x) = \frac{-1+1}{2} = 0 = f(k\pi) \quad \text{Per } k \text{ pari}$$

$$s(k\pi) = \frac{1}{2} \lim_{x \rightarrow \pi^-} f(x) + \frac{1}{2} \lim_{x \rightarrow \pi^+} f(x) = \frac{1-1}{2} = 0 = f(k\pi) \quad \text{Per } k \text{ dispari}$$

Quindi la serie converge precisamente ad $f \forall x \in \mathbb{R}$. Resta da verificare la convergenza totale della serie:

$$\sum \sup_{x \in \mathbb{R}} \left| 2 \sin(nx) \cdot \frac{1 - (-1)^n}{n\pi} \right| = \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{4}{n\pi} = \frac{4}{\pi} \cdot \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{1}{n}$$

Che diverge. Quindi la serie di Fourier di f non converge totalmente.

c) Facendo il cambio di variabile $n = 2m + 1$ la nostra serie di fourier diventa:

$$s(x) = \sum_{m=0}^{+\infty} 2 \sin[(2m+1)x] \cdot \frac{1 - (-1)^{2m+1}}{(2m+1)\pi} = \sum_{m=0}^{+\infty} \frac{4}{(2m+1)\pi} \cdot \sin[(2m+1)x]$$

Adesso notiamo che per $x = \pi/2$ quest'ultima diventa:

$$\sum_{m=0}^{+\infty} \frac{4}{(2m+1)\pi} \cdot (-1)^m = \frac{4}{\pi} \sum_{m=0}^{+\infty} \frac{(-1)^m}{2m+1}$$

Che è proprio la serie di cui stavamo cercando il valore di convergenza ma moltiplicata per un fattore $\frac{\pi}{4}$. Ma allora sapendo che la serie di Fourier converge ad f per $x = \frac{\pi}{2}$ possiamo concludere che:

$$\sum_{n=0}^{+\infty} \frac{(-1)^n}{2n+1} = f\left(\frac{\pi}{2}\right) \cdot \frac{\pi}{4} = 1 \cdot \frac{\pi}{4} = \frac{\pi}{4}$$

d) Siccome f è 2π -periodica e regolare a tratti su $[-\pi, \pi]$ vale l'identità di Bessel-Parseval:

$$2a_0^2 + \sum_{n=1}^{+\infty} (a_n^2 + b_n^2) = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} |f(x)|^2 dx$$

Nel nostro caso:

$$2a_0^2 + \sum_{n=1}^{+\infty} (a_n^2 + b_n^2) = \sum_{n=1}^{+\infty} b_n^2 = \sum_{m=0}^{+\infty} b_{m+1}^2 = \sum_{m=0}^{+\infty} \left[\frac{4}{\pi \cdot (2m+1)} \right]^2 = \frac{16}{\pi^2} \sum_{m=0}^{+\infty} \frac{1}{(2m+1)^2}$$

$$\frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} |f(x)|^2 dx = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} 1 dx = 2$$

Applicando l'identità:

$$\sum_{n=0}^{+\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} = 2 \cdot \frac{\pi^2}{16} = \frac{\pi^2}{8}$$

4 Calcolo differenziale per funzioni in più variabili

Esercizio 4.1. Stabilire se esiste e in tal caso calcolare $\lim_{(x,y) \rightarrow (0,0)} \frac{y^2}{x^2 + y^2}$.

Soluzione. Tentiamo prima di tutto qualche restrizione della funzione. Si può provare la restrizione all'asse y :

$$f(0, y) = \frac{y^2}{0^2 + y^2} = 1 \xrightarrow{y \rightarrow 0} 1 \implies \text{se il limite esiste, vale } 1.$$

Tentiamo ora una restrizione all'asse x :

$$f(x, 0) = \frac{0}{x^2} \xrightarrow{x \rightarrow 0} 0 \implies \text{se il limite esiste, vale } 0.$$

Abbiamo trovato due valori diversi per due direzioni diverse, quindi il limite non esiste.

Esercizio 4.2. Stabilire se esiste e in tal caso calcolare $\lim_{(x,y) \rightarrow (0,0)} \frac{1}{x^2 + y^4}$.

Soluzione. Si noti che questa non è una forma indeterminata in quanto il denominatore è sempre positivo e tende a zero quando $(x, y) \rightarrow (0, 0)$, quindi semplicemente:

$$\lim_{(x,y) \rightarrow (0,0)} \frac{1}{x^2 + y^4} = +\infty.$$

Esercizio 4.3. Stabilire se esiste e in tal caso calcolare $\lim_{(x,y) \rightarrow (1,0)} \frac{y^2 \ln(x)}{x^2 - 2x + 1 + y^2}$.

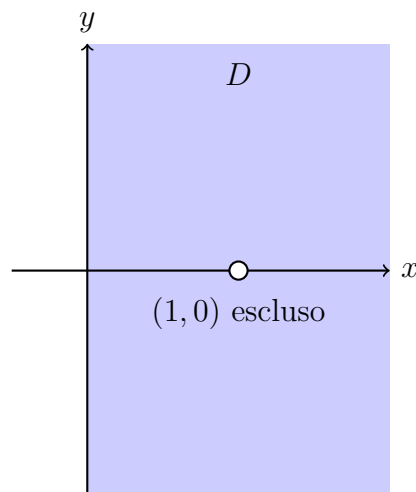
Soluzione. Ha senso innanzitutto chiedersi se ha senso il problema di calcolare il limite indicato. Il dominio della funzione è

$$D = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : x > 0\} \setminus \{(1, 0)\}$$

Infatti alla condizione che l'argomento del logaritmo sia strettamente maggiore di 0 bisogna aggiungere la condizione che il denominatore non si annulli.

$$x^2 - 2x + 1 + y^2 \neq 0 \leftrightarrow (x - 1)^2 + y^2 = 0 \leftrightarrow x \neq 1 \wedge y \neq 0$$

Il punto $(1, 0)$ è quindi di accumulazione per il dominio della nostra funzione e quindi ha senso voler calcolare il limite, che si presenta in forma indeterminata $\frac{0}{0}$.



Dominio della funzione: $D = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : x > 0\} \setminus \{(1, 0)\}$

Proviamo a fissare $x = 1$ e lasciare variare la y .

$$f(1, y) = \frac{y^2 \ln(1)}{y^2} = 0 \xrightarrow{(x,y) \rightarrow (1,0)} 0 \implies \text{se il limite esiste, vale } 0.$$

Si può anche provare a fissare la y a 0 e lasciar variare la x :

$$f(x, 0) = \frac{0 \ln(x)}{(x-1)^2} = 0 \xrightarrow{(x,y) \rightarrow (1,0)} 0 \implies \text{se il limite esiste, vale } 0.$$

Tentando anche percorsi alternativi si arriva sempre alla stessa conclusione. Questo significa che abbiamo trovato un candidato limite. Per verificare che $l = 0$ sia effettivamente il limite della funzione, applichiamo il teorema del confronto. L'idea in generale è che se vogliamo mostrare:

$$\lim_{(x,y) \rightarrow (0,0)} f(x, y) = 0.$$

Basta trovare una funzione $g(x, y) \geq 0$ tale che:

$$|f(x, y)| \leq g(x, y), \quad \lim_{(x,y) \rightarrow (0,0)} g(x, y) = 0$$

Allora possiamo scrivere immediatamente:

$$-g(x, y) \leq f(x, y) \leq g(x, y)$$

E quindi per il teorema del confronto:

$$0 = \lim_{(x,y) \rightarrow (0,0)} -g(x, y) \leq \lim_{(x,y) \rightarrow (0,0)} f(x, y) \leq \lim_{(x,y) \rightarrow (0,0)} g(x, y) = 0 \implies \lim_{(x,y) \rightarrow (0,0)} f(x, y) = 0$$

In questo caso si può pensare di scegliere $g(x, y) = |f(x, y)|$ e quindi se si riuscisse a dimostrare che $\lim_{(x,y) \rightarrow (0,0)} |f(x, y)| = 0$ sarebbe dimostrato che $\lim_{(x,y) \rightarrow (0,0)} f(x, y) = 0$. Iterando questo ragionamento si ha che:

$$0 \leq |f(x, y)| = \frac{y^2 |\ln(x)|}{(x-1)^2 + y^2} \leq \frac{y^2 |\ln(x)|}{y^2} \xrightarrow{(x,y) \rightarrow (1,0)} 0$$

E quindi per confronto:

$$|f(x, y)| \xrightarrow{(x,y) \rightarrow (1,0)} 0$$

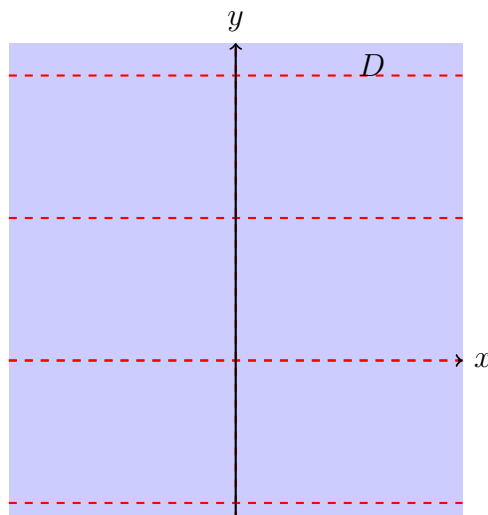
Da cui si conclude:

$$f(x, y) \xrightarrow{(x,y) \rightarrow (1,0)} 0$$

Esercizio 4.4. Stabilire se esiste e in tal caso calcolare $\lim_{(x,y) \rightarrow (0,0)} \frac{|x| + y^2}{x^2 \sin(|y|)}$. Precisare il dominio della funzione, verificando che il problema di stabilire il limite abbia senso.

Soluzione. L'unica condizione da imporre per il dominio è che il denominatore non si annulli, così facendo otteniamo:

$$D = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : x \neq 0, y \neq k\pi \quad \forall k \in \mathbb{Z}\}$$



Dominio della funzione: $D = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : x \neq 0, y \neq k\pi \ \forall k \in \mathbb{Z}\}$

Il dominio D in particolare è aperto, non è chiuso, non è limitato e non è connesso per archi. L'origine è un punto di accumulazione per D per cui ha perfettamente senso il problema del calcolo del limite. Proviamo a restringere la funzione alla bisettrice $y = x$:

$$f(x, x) = \frac{|x| + x^2}{x^2 \sin(|x|)} \underset{(x,y) \rightarrow (0,0)}{\sim} \frac{|x|}{x^2 |x|} \xrightarrow{(x,y) \rightarrow (0,0)} +\infty \implies \text{se il limite esiste, vale } +\infty$$

Per verificare che questo candidato sia l'effettivo limite, possiamo procedere applicando il teorema del confronto tramite una minorazione ad esempio così:

$$f(x, y) = \frac{|x| + y^2}{x^2 \sin(|y|)} \geq \frac{|x|}{x^2 \sin(|y|)} = \frac{1}{|x| \sin |y|} \xrightarrow{(x,y) \rightarrow (0,0)} +\infty$$

Quindi per confronto possiamo concludere che $f(x, y) \xrightarrow{(x,y) \rightarrow (0,0)} +\infty$

Esercizio 4.5. Calcolare se possibile $\lim_{(x,y) \rightarrow (0,0)} \sin(\frac{1}{x} + y)$

Soluzione. Il dominio della funzione è $D = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : x \neq 0\}$ quindi $(0, 0)$ è punto di accumulazione, approcciando questo punto dall'asse x si ha:

$$f(x, 0) = \sin\left(\frac{1}{x}\right)$$

Che non ammette limite per $(x, y) \rightarrow (0, 0)$, ma allora possiamo già concludere che il limite non esiste, in quanto se esistesse dovrebbe essere lo stesso per ogni direzione ma ne abbiamo trovata una per cui non esiste.

Esercizio 4.6. Sia:

$$f(x, y) = \begin{cases} \frac{y^4}{x^2 + y^2} & \text{se } (x, y) \neq (0, 0) \\ 0 & \text{se } (x, y) = (0, 0) \end{cases}$$

- Stabilire se f è continua sul suo dominio
- Stabilire se f è derivabile sul suo dominio ed eventualmente calcolare le derivate
- Stabilire se f è differenziabile sul dominio
- Determinare le derivate direzionali massima e minima e l'equazione del piano tangente relative al punto $(1, 1)$

Soluzione. a) Il dominio della funzione è $D = \mathbb{R}^2$, per $(x, y) \neq (0, 0)$ sicuramente la funzione è continua in quanto è data da un rapporto di funzioni continue. È necessario studiare la continuità nell'origine, per farlo applichiamo la definizione di continuità per una funzione in due variabili:

$$f \text{ è continua in } (x_0, y_0) \iff \lim_{(x,y) \rightarrow (x_0,y_0)} f(x, y) = f(x_0, y_0)$$

Quindi nel nostro caso ciò si traduce nella risoluzione del limite:

$$\lim_{(x,y) \rightarrow (0,0)} \frac{y^4}{x^2 + y^2}$$

Possiamo confermare che 0 è un candidato limite tramite la restrizione $y = x$:

$$f(x, x) = \frac{x^4}{2x^2} = \frac{x^2}{2} \xrightarrow{(x,y) \rightarrow (0,0)} 0$$

A questo punto proviamo ad effettuare la seguente maggiorazione:

$$0 \leq |f(x, y)| = f(x, y) = \frac{y^4}{x^2 + y^2} \leq \frac{y^4}{y^2} = y^2 \xrightarrow{(x,y) \rightarrow (0,0)} 0$$

Da cui si conclude che $\lim_{(x,y) \rightarrow (0,0)} \frac{y^4}{x^2 + y^2} = 0$ e che dunque f è continua in $(0,0)$ e di conseguenza su tutto il suo dominio.

b) Possiamo subito dire che f è derivabile ovunque all'infuori dell'origine in quanto composizione di funzioni derivabili. Per $(x, y) \neq (0,0)$ risulta:

$$\begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial x} &= \frac{\partial}{\partial x} \frac{y^4}{x^2 + y^2} = \frac{-2xy^4}{(x^2 + y^2)^2} \\ \frac{\partial f}{\partial y} &= \frac{\partial}{\partial y} \frac{y^4}{x^2 + y^2} = \frac{2y^5 + 4x^2y^3}{(x^2 + y^2)^2} \end{aligned}$$

Per poter affermare che f sia derivabile nell'origine dobbiamo dimostrare che lì esistono entrambe le derivate parziali:

$$\begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial x} &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(0 + h, 0) - f(0, 0)}{h} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\frac{0}{h} - 0}{h} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{0}{h} = 0 \\ \frac{\partial f}{\partial y} &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(0, 0 + h) - f(0, 0)}{h} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\frac{h^4}{h^2} - 0}{h} = \lim_{h \rightarrow 0} h = 0 \end{aligned}$$

Poichè entrambe le derivate parziali esistono nell'origine, la funzione è derivabile in $(0,0)$ e quindi in tutto il dominio.

c) Se riuscissimo a dimostrare che le derivate parziali di f sono continue, ovvero che $f \in C^1$ allora per il teorema del differenziale totale avremmo dimostrato che f è differenziabile.

$$\frac{\partial f}{\partial x}(x, y) = \begin{cases} \frac{-2xy^4}{(x^2 + y^2)^2} & \text{se } (x, y) \neq (0, 0) \\ 0 & \text{se } (x, y) = (0, 0) \end{cases}$$

Come prima possiamo affermare che sicuramente $\frac{\partial f}{\partial x}$ è continua per $(x, y) \neq (0, 0)$, studiamo la continuità nell'origine tramite la definizione. Possiamo quindi effettuare la maggiorazione:

$$0 \leq |f(x, y)| = \frac{2|x|y^4}{(x^2 + y^2)^2} \leq \frac{2|x|y^4}{(0 + y^2)^2} = 2|x| \xrightarrow{(x,y) \rightarrow (0,0)} 0$$

Per cui $\frac{\partial f}{\partial x}(x, y) \xrightarrow{(x,y) \rightarrow (0,0)} 0 = \frac{\partial f}{\partial x}(0, 0) \implies \frac{\partial f}{\partial x}$ è continua in $(0, 0)$

Ora proviamo a fare lo stesso con l'altra derivata parziale:

$$\frac{\partial f}{\partial y}(x, y) = \begin{cases} \frac{2y^5 + 4x^2y^3}{(x^2 + y^2)^2} & \text{se } (x, y) \neq (0, 0) \\ 0 & \text{se } (x, y) = (0, 0) \end{cases}$$

Tentiamo una maggiorazione:

$$0 \leq |f(x, y)| = \frac{|2y^5 + 4x^2y^3|}{(x^2 + y^2)^2} \leq \frac{2|y^5|}{(x^2 + y^2)^2} + \frac{4x^2|y^3|}{(x^2 + y^2)^2} \xrightarrow{(x,y) \rightarrow (0,0)} 0$$

Infatti:

$$0 \leq \frac{2|y^5|}{(x^2 + y^2)^2} \leq \frac{2|y^5|}{(0 + y^2)^2} = \frac{2|y^5|}{y^4} = 2|y| \xrightarrow{(x,y) \rightarrow (0,0)} 0$$

E per verificare che $\frac{4x^2|y^3|}{(x^2 + y^2)^2} \xrightarrow{(x,y) \rightarrow (0,0)} 0$ possiamo in coordinate polari imponendo:

$$\begin{cases} x = \rho \cos(\theta) \\ y = \rho \sin(\theta) \end{cases}$$

Che porta a:

$$\frac{4\rho^2 \cos^2(\theta) \rho^3 |\sin(\theta)|^3}{\rho^4} = 4\rho \cos^2(\theta) |\sin(\theta)|^3 \leq 4\rho \xrightarrow{\rho \rightarrow 0} 0$$

Per cui: $\frac{\partial f}{\partial y}(x, y) \xrightarrow{(x,y) \rightarrow (0,0)} 0 = \frac{\partial f}{\partial y}(0, 0) \implies \frac{\partial f}{\partial y}$ è continua in $(0, 0)$. Si conclude che $f \in C^1(\mathbb{R}^2)$ e che quindi f è differenziabile.

d) Calcoliamo innanzitutto le derivate parziali in $(1, 1)$:

$$\frac{\partial f}{\partial x}(1, 1) = -\frac{2}{2^2} = -\frac{1}{2}, \quad \frac{\partial f}{\partial y}(1, 1) = \frac{2+4}{2^2} = \frac{3}{2}$$

Il piano tangente esiste in quanto f è differenziabile, la sua equazione è data da:

$$z = f(1, 1) + \frac{\partial f}{\partial x}(1, 1)(x - 1) + \frac{\partial f}{\partial y}(1, 1)(y - 1) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2}(x - 1) + \frac{3}{2}(y - 1)$$

Siccome f è differenziabile in $(1, 1)$ la derivata direzionale massima si trova nella direzione del gradiente:

$$\nabla f(1, 1) = \left(\frac{\partial f}{\partial x}(1, 1), \frac{\partial f}{\partial y}(1, 1) \right) = \left(-\frac{1}{2}, \frac{3}{2} \right)$$

Troviamo il versore corrispondente dividendo questo vettore per la norma:

$$\|\nabla f\| = \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{9}{4}} = \frac{\sqrt{10}}{2}$$

Quindi il versore corrispondente è:

$$\vec{v} = \left(\frac{-\frac{1}{2}}{\frac{\sqrt{10}}{2}}, \frac{\frac{3}{2}}{\frac{\sqrt{10}}{2}} \right) = \left(-\frac{1}{\sqrt{10}}, \frac{3}{\sqrt{10}} \right)$$

Dunque la derivata direzionale massima è:

$$D_{\vec{v}}f(1,1) = \nabla f(1,1) \cdot \vec{v} = \left(-\frac{1}{2}, \frac{3}{2} \right) \cdot \left(\frac{-1}{\sqrt{10}}, \frac{3}{\sqrt{10}} \right) = \frac{\sqrt{10}}{2} = \|\nabla f(1,1)\|$$

E la derivata direzionale minima è semplicemente:

$$D_{\vec{v}}f(1,1) = \nabla f(1,1) \cdot -\vec{v} = -\frac{\sqrt{10}}{2}$$

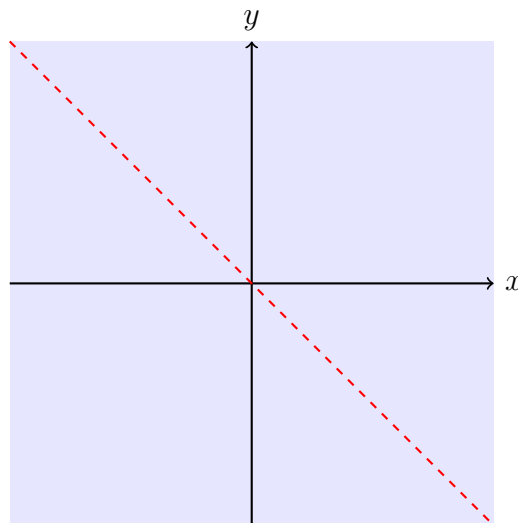
Esercizio 4.7. Se possibile calcolare i limiti nell'origine di:

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

$$b) g(x, y) = \frac{xy}{x+y}$$

Soluzione. Per entrambe le funzioni il dominio è:

$$D = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : y \neq -x\}$$



Dominio delle funzioni

Si vede subito che $(0,0)$ è punto di accumulazione per il dominio quindi ha senso porsi il problema del limite nell'origine.

a) Provando ad avvicinarsi al punto da una generica retta $y = mx$ si ha che:

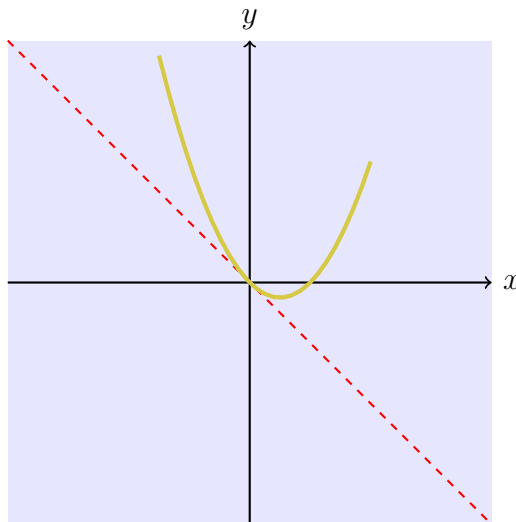
$$f(x, mx) = \frac{mx^2}{(x+mx)^2} = \frac{mx^2}{x^2 + m^2x^2 + 2mx^2} = \frac{1}{1+m^2+2m} = \frac{1}{(1+m)^2}$$

Ma quindi variando il coefficiente angolare ho un valore del limite diverso ogni volta. Si conclude che il limite nell'origine di $f(x, y)$ non esiste.

b) Tentando di avvicinarsi all'origine dalla bisettrice $y = x$ si ha che:

$$g(x, x) = \frac{x^2}{2x} = \frac{x}{2} \xrightarrow{(x,y) \rightarrow 0} 0 \implies \text{se il limite esiste, vale } 0$$

Provando con altri cammini classici si arriva sempre alla stessa conclusione. Un'idea è notare che siccome la funzione ha un problema sulla bisettrice potrebbe essere utile provare con qualche curva tangente alla bisettrice come ad esempio $y = -x + x^2$:



Così facendo si ha:

$$g(x, -x + x^2) = \frac{-x^2 + x^3}{x^2} = -1 + x \xrightarrow{(x,y) \rightarrow (0,0)} -1 \implies \text{se il limite esiste, vale } -1$$

Quindi possiamo concludere che il limite non esiste.

Esercizio 4.8. Sia:

$$f(x, y) = \begin{cases} \frac{x^2 y^2}{x^2 + y^4} & \text{se } (x, y) \neq (0, 0) \\ 0 & \text{se } (x, y) = (0, 0) \end{cases}$$

a) Studiare nell'origine continuità, derivabilità con continuità e differenziabilità

b) Calcolare tutte le derivate direzionali esistenti in $(0, 0)$

Soluzione. a) Come prima, verifichiamo la continuità nell'origine (altrove è automaticamente verificata) applicando la definizione. Tramite una maggiorazione possiamo subito dire che:

$$0 \leq |f(x, y)| = f(x, y) \leq \frac{x^2 y^2}{x^2} = y^2 \xrightarrow{(x,y) \rightarrow (0,0)} 0 = f(0, 0)$$

Quindi f è continua in $(0, 0)$. Verifichiamo ora che sia derivabile controllando se esistono le due derivate parziali nell'origine:

$$\frac{\partial f}{\partial x}(0, 0) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(0 + h, 0) - f(0, 0)}{h} = \frac{0}{h} = 0 \xrightarrow{h \rightarrow 0} 0$$

$$\frac{\partial f}{\partial y}(0, 0) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(0, 0 + h) - f(0, 0)}{h} = \frac{0}{h} = 0 \xrightarrow{h \rightarrow 0} 0$$

Quindi f è derivabile nell'origine. Vediamo se lo è con continuità verificando la continuità nell'origine delle derivate parziali:

$$\left. \frac{\partial f}{\partial x}(x, y) \right|_{(x,y) \neq (0,0)} = \frac{2xy^6}{(x^2 + y^4)^2}$$

Con la restrizione $x = y^2$ vediamo subito che:

$$\left. \frac{\partial f}{\partial x}(y^2, y) \right|_{(x,y) \neq (0,0)} = \frac{2y^8}{4y^8} = \frac{1}{2} \xrightarrow{(x,y) \rightarrow (0,0)} \frac{1}{2} \neq 0 = \frac{\partial f}{\partial x}(0, 0)$$

Quindi non è neanche necessario controllare la continuità dell'altra derivata nell'origine, possiamo già concludere che f non è derivabile con continuità siccome una delle due derivate non è continua. Per stabilire se f è differenziabile nell'origine calcoliamo il limite:

$$c(x, y) = \frac{f(x, y) - [f(0, 0) + f_x(0, 0)(x - 0) + f_y(0, 0)(y - 0)]}{\|(x - y) - (0, 0)\|} = \frac{f(x, y) - 0}{\sqrt{x^2 + y^2}} = \frac{x^2 y^2}{(x^2 + y^4)\sqrt{x^2 + y^2}}$$

Se questa funzione tendesse a 0 per $(x, y) \rightarrow 0$ allora f sarebbe differenziabile nell'origine.

$$0 \leq c(x, y) \leq \frac{x^2 y^2}{x^2 \sqrt{y^2}} = \frac{y^2}{\sqrt{y^2}} = |y| \xrightarrow{(x,y) \rightarrow (0,0)} 0$$

Quindi f è differenziabile nell'origine.

b) Siccome f è differenziabile possiamo dire che esistono tutte le derivate direzionali nell'origine, che al variare del versore \vec{v} saranno date da:

$$D_{\vec{v}}f(0, 0) = \nabla f(0, 0) \cdot \vec{v} = (0, 0) \cdot \vec{v} = 0$$

Cioè tutte le derivate direzionali sono nulle nell'origine.

Esercizio 4.9. Stabilire se la funzione $f(x, y) = (x^2 + y^2)^{\frac{2}{3}}$ è differenziabile sul suo dominio naturale e in tal caso calcolare l'equazione del piano tangente all'origine.

Soluzione. Il dominio naturale di f è senza dubbio \mathbb{R}^2 infatti non abbiamo nessun problema di definizione. Cerchiamo di stabilire dove questa funzione è derivabile, calcolando le derivate parziali:

$$\begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial x} &= \frac{4x}{3(x^2 + y^2)^{\frac{1}{3}}} \text{ per } (x, y) \neq (0, 0) \\ \frac{\partial f}{\partial y} &= \frac{4y}{3(x^2 + y^2)^{\frac{1}{3}}} \text{ per } (x, y) \neq (0, 0) \end{aligned}$$

Adesso cerchiamo di stabilire con la definizione se f è derivabile nell'origine o meno:

$$\begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial x}(0, 0) &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(0 + h, 0) - f(0, 0)}{h} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{h^{\frac{4}{3}}}{h} = 0 \\ \frac{\partial f}{\partial y}(0, 0) &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(0, 0 + h) - f(0, 0)}{h} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{h^{\frac{4}{3}}}{h} = 0 \end{aligned}$$

Quindi la funzione è derivabile nell'origine e la sua derivata vale 0. Se riuscissimo a verificare che le derivate sono continue nell'origine avremmo verificato che $f \in C^1$ e

quindi potremmo concludere che f è differenziabile. Cerchiamo di farlo applicando la definizione di continuità alle derivate. Si tratta quindi di valutare i limiti:

$$\lim_{(x,y) \rightarrow (0,0)} \frac{4x}{3(x^2 + y^2)^{\frac{1}{3}}} \quad , \quad \lim_{(x,y) \rightarrow (0,0)} \frac{4y}{3(x^2 + y^2)^{\frac{1}{3}}}$$

Prendendo ad esempio il primo possiamo passare in coordinate polari e poi effettuare una maggiorazione rispetto al modulo come segue:

$$\begin{aligned} |f(\rho, \theta)| &= \left| \frac{4\rho \cos(\theta)}{3[\rho^2(\cos^2(\theta) + \sin^2(\theta))]^{\frac{1}{3}}} \right| \\ &= \left| \frac{4\rho \cos(\theta)}{3\rho^{\frac{2}{3}}} \right| \\ &= \frac{4|\rho| \cdot |\cos(\theta)|}{3|\rho|^{\frac{2}{3}}} \\ &= \frac{4}{3} |\cos(\theta)| \frac{\rho}{\rho^{\frac{2}{3}}} \\ &= \frac{4}{3} |\cos(\theta)| \rho^{1-\frac{2}{3}} \\ &= \frac{4}{3} |\cos(\theta)| \rho^{\frac{1}{3}} \leq \frac{4}{3} \rho^{\frac{1}{3}} \xrightarrow{\rho \rightarrow 0} 0 \end{aligned}$$

Per cui i due limiti sopra esistono e sono entrambi pari a 0 (per il secondo può essere applicato lo stesso esatto procedimento che per il primo). Questo dimostra che la funzione è derivabile con continuità e quindi differenziabile sul proprio dominio. L'equazione del piano tangente nell'origine è data da:

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

Che nel nostro caso si riduce semplicemente a $z = 0$.

Esercizio 4.10. Sia $f(x, y) = e^x \cos(y)$:

- Verificare che f è differenziabile e in particolare di classe C^2 in un intorno di $(0, 0)$
- Calcolare il polinomio di Taylor di ordine 2 centrato in $(0, 0)$

Soluzione. a) La funzione è una composizione di funzioni elementari di classe C^∞ su \mathbb{R} quindi f stessa è di classe C^∞ e in particolare di classe C^2 in ogni punto compresa l'origine.

- Iniziamo calcolando tutte le derivate parziali prime:

$$\frac{\partial f}{\partial x} = e^x \cos(y) \quad \frac{\partial f}{\partial y} = -e^x \sin(y)$$

Poi le derivate seconde:

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} = e^x \cos(y) \quad \frac{\partial^2 f}{\partial y \partial x} = -e^x \sin(y) \quad \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} = -e^x \cos(y) \quad \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} = -e^x \sin(y)$$

A questo possiamo calcolare il polinomio di Taylor centrato nell'origine tramite l'espressione:

$$T_2(x, y) = f(x_0, y_0) + \left(\frac{\partial f}{\partial x}(x_0, y_0)(x - x_0) + \frac{\partial f}{\partial y}(x_0, y_0)(y - y_0) \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 f}{\partial x^2}(x_0, y_0)(x - x_0)^2 + 2 \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y}(x_0, y_0)(x - x_0)(y - y_0) + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2}(x_0, y_0)(y - y_0)^2 \right)$$

Che nel nostro caso corrisponde a:

$$T_2(x, y) = 1 + x + \frac{1}{2}x^2 - \frac{1}{2}y^2$$

Esercizio 4.11. Sia:

$$f(x, y) = \begin{cases} \frac{x^2}{y} & \text{se } y \neq 0 \\ 0 & \text{se } y = 0 \end{cases}$$

a) Stabilire se f è continua, derivabile, differenziabile nell'origine.

b) Precisare se f ammette altre derivate direzionali nell'origine oltre a f_x ed f_y

c) Si supponga di non sapere che f è discontinua nell'origine, cosa si potrebbe dedurre dai valori delle derivate direzionali?

Soluzione. Il dominio della funzione è \mathbb{R}^2 , affinché f sia continua nell'origine occorrerebbe dimostrare che $f \xrightarrow{(x,y) \rightarrow 0} 0$ ma si verifica facilmente che non è così tramite ad esempio la restrizione:

$$f(x, x^2) = \frac{x^2}{x^2} = 1 \xrightarrow{(x,y) \rightarrow (0,0)} 1$$

Quindi il limite non esiste e se ne deduce che f non è continua nell'origine. Siccome f non è continua nell'origine non può essere differenziabile nell'origine. Cerchiamo di calcolare le derivate nell'origine:

$$\begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial x}(0, 0) &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(h, 0) - f(0, 0)}{h} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{0 - 0}{h} = 0 \\ \frac{\partial f}{\partial y}(0, 0) &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(0, h) - f(0, 0)}{h} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{0 - 0}{h} = 0 \end{aligned}$$

Entrambe le derivate parziali esistono finite nel punto quindi f è derivabile nell'origine.

b) Sia $\vec{v} = (a, b)$ un generico vettore tale che $\|\vec{v}\| = \sqrt{a^2 + b^2} = 1$ con $a, b \neq 0$. Calcoliamo la generica derivata direzionale nel punto come:

$$\lim_{t \rightarrow 0} \frac{f(x_0 + ta, y_0 + tb) - f(x_0, y_0)}{t} = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{f(ta, tb)}{t} = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{t^2 a^2}{t^2 b} = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{a^2}{b} = \frac{a^2}{b}$$

Quindi esiste la generica derivata direzionale relativa al versore \vec{v} e vale $\frac{a^2}{b}$.

c) Anche senza sapere che f è discontinua avremmo potuto concludere che f non è differenziabile nell'origine, infatti se lo fosse varrebbe la formula del gradiente:

$$D_{\vec{v}} = \nabla f(0, 0) \cdot \vec{v} = (0, 0) \cdot \vec{v} = 0$$

Ma in realtà noi sappiamo che per \vec{v} generico la derivata direzionale vale sempre $\frac{a^2}{b}$. Da questo assurdo avremmo potuto dedurre che f non è differenziabile nell'origine.

Esercizio 4.12. Sia:

$$f(x, y) = \begin{cases} \sqrt[3]{y} \cdot e^{-\frac{y^2}{x^4}} & \text{se } x \neq 0 \\ 0 & \text{se } x = 0 \end{cases}$$

Stabilire se nell'origine se:

- a) f è continua
- b) f ammette derivate direzionali precisando eventualmente in quali direzioni
- c) Vale la formula del gradiente
- d) f è differenziabile

Soluzione. a) Verifichiamo la continuità tramite la definizione applicando una maggiorazione al modulo della funzione per $x \neq 0$:

$$|f(x, y)| = |y|^{\frac{1}{3}} \cdot e^{-\frac{y^2}{x^4}} \leq |y|^{\frac{1}{3}} \xrightarrow{(x,y) \rightarrow 0} 0$$

Quindi la funzione è continua nell'origine.

b) Sia $\vec{v} = (a, b)$ un generico vettore tale che $\|\vec{v}\| = \sqrt{a^2 + b^2} = 1$ con $a, b \neq 0$. Calcoliamo la generica derivata direzionale nel punto come:

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow 0} \frac{f(x_0 + ta, y_0 + tb) - f(x_0, y_0)}{t} &= \lim_{t \rightarrow 0} \frac{f(ta, tb)}{t} = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{\sqrt[3]{tb} e^{-\frac{t^2 b^2}{t^4 a^4}}}{t} \\ &= \lim_{t \rightarrow 0} \sqrt[3]{b} \frac{e^{-\frac{t^2 b^2}{t^4 a^4}}}{t^{2/3}} \quad \text{Per } a \neq 0 \end{aligned}$$

Adesso se $b = 0$ (che equivale ad imporre di calcolare la derivata parziale rispetto a x) allora l'intera espressione va a 0, da cui si deduce $\frac{\partial f}{\partial x}(0, 0) = 0$. Mentre se $b \neq 0$:

$$\lim_{t \rightarrow 0} \sqrt[3]{b} \frac{e^{-\frac{t^2 b^2}{t^4 a^4}}}{t^{2/3}} \underset{u=1/t^2}{=} \lim_{u \rightarrow +\infty} \sqrt[3]{b} \frac{u^{1/3}}{e^{\frac{b^2}{a^4} u}} = 0$$

Quindi $D_{\vec{v}}f(0, 0) = 0$ se $a, b \neq 0$. Mentre se $a = 0$ e di conseguenza $b = \pm 1$ per rispettare la condizione di versore di \vec{v} :

$$\lim_{t \rightarrow 0} \frac{f(x_0 + ta, y_0 + tb) - f(x_0, y_0)}{t} = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{f(0, \pm t) - f(0, 0)}{t} = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{0 - 0}{t} = 0$$

Possiamo quindi concludere che $D_{\vec{v}}f(0, 0) = 0 \quad \forall \vec{v}$.

c) La formula del gradiente è valida infatti:

$$\nabla f(0, 0) \cdot \vec{v} = (0, 0) \cdot \vec{v} = 0 = D_{\vec{v}}f(0, 0) \quad \forall \vec{v}$$

d) Verifichiamo che f sia differenziabile nell'origine con la definizione. Consideriamo:

$$c(x, y) = \frac{f(x, y) - f(0, 0) - \nabla f(0, 0) \cdot (x, y)}{\sqrt{x^2 + y^2}} = \frac{f(x, y)}{\sqrt{x^2 + y^2}}$$

Considerando la restrizione $y = x^2$ si ottiene:

$$\frac{f(x, x^2)}{\sqrt{x^2 + y^2}} = \frac{x^{\frac{2}{3}}}{e \cdot \sqrt{x^2 + x^4}} = \frac{x^{\frac{2}{3}}}{e \cdot \sqrt{x^2 + x^4}} \underset{x \rightarrow 0}{\sim} \frac{x^{\frac{2}{3}}}{e \cdot |x|} = \frac{1}{e \cdot |x|^{\frac{1}{3}}} \xrightarrow{(x,y) \rightarrow 0} +\infty$$

Per cui non è vero che $c(x, y) \xrightarrow{(x,y) \rightarrow 0} 0$ e quindi si conclude che f non è differenziabile nell'origine.

Esercizio 4.13. Sia $f(x, y) = e^{\sin(x^2+y^4)}$

a) Calcolare la derivata direzionale di f in $(\sqrt{\pi}, 0)$ nella direzione parallela alla retta $y = 3x + 1$ nel verso delle ascisse crescenti.

b) Calcolare il valore della derivata direzionale massima in $(\sqrt{\pi}, 0)$

c) Calcolare il piano tangente in $(\sqrt{\pi}, 0)$

d) Se possibile, scrivere l'equazione della tangente alla linea di livello di f passante dal punto

Soluzione. a) Possiamo trovare la direzione della retta (a, b) risolvendo il sistema:

$$\begin{cases} m = 3 = \tan(\theta) = \frac{b}{a} \\ a^2 + b^2 = 1 \end{cases}$$

Risolvendo si ottiene che la direzione della retta è data dal versore $(\frac{1}{\sqrt{10}}, \frac{3}{\sqrt{10}})$. A questo punto prima di calcolare la derivata direzionale occorre verificare che f sia differenziabile nel punto, ma questo è automaticamente verificato dal fatto che f è di classe C^∞ (e in particolare C^1) in quanto composizione di funzioni C^∞ . Calcoliamo quindi la derivata nel punto relativa alla direzione trovata con la formula del gradiente:

$$f_x(x, y) = 2x \cos(x^2 + y^4) \cdot e^{\sin(x^2+y^4)} \implies f_x(\sqrt{\pi}, 0) = -2\sqrt{\pi}$$

$$f_y(x, y) = 4y^3 \cos(x^2 + y^4) \cdot e^{\sin(x^2+y^4)} \implies f_y(\sqrt{\pi}, 0) = 0$$

$$D_{\vec{v}}f(\sqrt{\pi}, 0) = (-2\sqrt{\pi}, 0) \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{10}}, \frac{3}{\sqrt{10}} \right) = -2\sqrt{\frac{\pi}{10}}$$

b Il valore della derivata direzionale massima in $(\sqrt{\pi}, 0)$ vale $\|\nabla f(\sqrt{\pi}, 0)\| = \sqrt{4\pi} = 2\sqrt{\pi}$

c) Siccome f è differenziabile, troviamo l'equazione del piano tangente semplicemente come:

$$z = f(x_0, y_0) + f_x(x_0, y_0)(x - x_0) + f_y(x_0, y_0)(y - y_0) = 1 - 2\sqrt{\pi}(x - \sqrt{\pi})$$

d) Questo ultimo punto è sicuramente più complesso. Partiamo dal definire l'insieme di livello relativo al punto $(\sqrt{\pi}, 0)$. Possiamo trovare la sua equazione per definizione di insieme di livello come $f(x, y) = f(x_0, y_0)$ ovvero nel nostro caso $e^{\sin(x^2+y^4)} = 1$. L'obiettivo è calcolare la derivata di questa curva di livello nel punto $(\sqrt{\pi}, 0)$ in modo da poter ricavare l'espressione della retta tangente. Tuttavia questa non è una funzione nel piano xy e non è possibile esplicitare y . Siccome però questa funzione è di classe C^1 cioè differenziabile e il gradiente valutato nel punto di nostro interesse è diverso dal vettore nullo,

per il teorema del Dini (teorema delle funzioni implicite) possiamo calcolare la derivata implicita della funzione nel punto come:

$$\frac{dy}{dx} = -\frac{f_x}{f_y}(\sqrt{\pi}, 0) = -\frac{2\sqrt{\pi}}{0}$$

Questo suggerisce che la pendenza sia infinita cioè la retta tangente al punto sia verticale. Ma allora stiamo cercando una retta verticale che passi per il punto $(\sqrt{\pi}, 0)$ che quindi sarà $x = \sqrt{\pi}$.

5 Ottimizzazione libera e vincolata

Esercizio 5.1. Sia $f(x, y) = 2xy - x^2 - 4 \ln(1 + y^2)$. Determinare tutti gli eventuali punti critici di f sul suo dominio e classificarli. Nel caso di massimi e minimi specificare se sono relativi o assoluti.

Soluzione. Il dominio della funzione è \mathbb{R}^2 e i punti critici o stazionari sono i punti in cui la funzione f è derivabile e il gradiente si annulla. Nel nostro caso f è di classe $C^\infty(\mathbb{R}^2)$. Calcoliamo le derivate parziali:

$$f_x(x, y) = 2y - 2x = 2(y - x) \quad f_y(x, y) = 2x - \frac{8y}{1 + y^2}$$

Imponiamo che il gradiente si annulli:

$$\begin{aligned} \nabla f(x, y) = 0 &\iff \begin{cases} y - x = 0 \\ x - \frac{4y}{1 + y^2} = 0 \end{cases} \\ &\iff \begin{cases} x = 0 \\ y = 0 \end{cases} \vee \begin{cases} x = \sqrt{3} \\ y = \sqrt{3} \end{cases} \vee \begin{cases} x = -\sqrt{3} \\ y = -\sqrt{3} \end{cases} \end{aligned}$$

Dunque i tre punti critici sono $(0, 0)$, $(\sqrt{3}, \sqrt{3})$, $(-\sqrt{3}, -\sqrt{3})$. Calcoliamo le derivate parziali seconde pure e miste:

$$f_{xx}(x, y) = -2 \quad f_{xy}(x, y) = f_{yx}(x, y) = 2 \quad f_{yy}(x, y) = \frac{8y^2 - 8}{(1 + y^2)^2}$$

Abbiamo la garanzia che le derivate seconde miste siano uguali dal teorema di Schwarz. Per classificare ogni punto critico proviamo ad usare il criterio della matrice hessiana, iniziamo a calcolarla per $(0, 0)$:

$$H_f(0, 0) = \begin{pmatrix} -2 & 2 \\ 2 & -8 \end{pmatrix}$$

$\det(H_f(0, 0)) = 12 > 0$, ci resta da controllare il segno di una delle due derivate seconde pure calcolate nel punto critico (il segno sarà lo stesso per entrambe siccome il determinante è positivo). In questo caso il segno è negativo, se ne conclude che $(0, 0)$ è un punto di massimo relativo. Gli altri due punti critici possono essere analizzati contemporaneamente, infatti producono la stessa matrice hessiana:

$$H_f(\pm 1\sqrt{3}, \pm 1\sqrt{3}) = \begin{pmatrix} -2 & 2 \\ 2 & 1 \end{pmatrix}$$

$\det(H_f(\pm 1\sqrt{3}, \pm 1\sqrt{3})) = -6 < 0$ dunque concludiamo subito che $(\sqrt{3}, \sqrt{3})$, $(-\sqrt{3}, -\sqrt{3})$ sono punti di sella. Ci manca da stabilire se $(0, 0)$ sia un massimo assoluto oltre che relativo ma se analizziamo ad esempio la restrizione:

$$f(x, x) = 2x^2 - x^2 - 4 \ln(1 + x^2) = x^2 - 4 \ln(1 + x^2) \underset{x \rightarrow +\infty}{\sim} x^2 \xrightarrow{x \rightarrow +\infty} +\infty$$

Questo dimostra che f non è superiormente limitata e quindi il punto non può essere si massimo assoluto, in quanto non esiste un massimo assoluto.

Esercizio 5.2. Sia $f(x, y) = x^2 + (1 - x)^3 \cdot y^2$. Determinare tutti gli eventuali estremanti di f , specificando se relativi o assoluti.

Soluzione. Il dominio di f è \mathbb{R}^2 e in più $f \in C^\infty(\mathbb{R}^2)$. Essendo f derivabile sul suo dominio che è un insieme aperto, per il teorema di Fermat eventuali estremanti devono essere punti critici. Questo è fondamentale perché permette di trovare massimi e minimi senza dover analizzare qualsiasi punto del dominio, ma solo quelli in cui il gradiente si annulla. Risolviamo dunque:

$$\begin{aligned} \nabla f(x, y) = 0 &\iff \begin{cases} f_x(x, y) = 2x - 3(1 - x)^2 \cdot y^2 = 0 \\ f_y(x, y) = 2(1 - x)^3 \cdot y = 0 \end{cases} \\ &\iff \begin{cases} x = 1 \\ 2 = 0 \end{cases} \vee \begin{cases} x = 0 \\ y = 0 \end{cases} \end{aligned}$$

Da cui vediamo che l'unico punto critico è $(0, 0)$. Proviamo a stabilirne la natura col criterio della matrice hessiana:

$$H_f(0, 0) = \begin{pmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 2 \end{pmatrix}$$

$\det(H_f(0, 0)) = 4 > 0$ e $f_x(0, 0) > 0$ bastano queste due informazioni per concludere che l'origine è un punto di minimo relativo. Come nell'esercizio precedente si mostra facilmente che non è un minimo assoluto in quanto prendendo la restrizione:

$$f(2, y) = 4 - y^2 \xrightarrow{y \rightarrow \pm\infty} -\infty$$

Ciò dimostra che f non è inferiormente limitata per cui il punto di minimo non è assoluto ma solo relativo.

Esercizio 5.3. Sia $f(x, y) = \alpha x - \beta y - 2 + 2xy + \gamma x^2 - y^2$ con $\alpha, \beta, \gamma \in \mathbb{R}$. Stabilire per quali α, β, γ f ha un massimo nell'origine.

Soluzione. Notiamo che f a prescindere dai parametri è di classe $C^\infty(\mathbb{R}^2)$. Imponiamo che il gradiente nell'origine sia pari al vettore nullo:

$$\nabla f(0, 0) = 0 \iff \begin{cases} f_x(0, 0) = \alpha = 0 \\ f_y(0, 0) = -\beta = 0 \end{cases}$$

Le due condizioni sono ovviamente soddisfatte solo se $\alpha = 0 \wedge \beta = 0$. Dal calcolo delle derivate seconde pure e miste che è molto semplice scopriamo che l'hessiana nell'origine è:

$$H_f(0, 0) = \begin{pmatrix} 2\gamma & 2 \\ 2 & -2 \end{pmatrix}$$

Imponendo che il determinante dell'hessiana sia maggiore di 0, otteniamo $-4\gamma - 4 > 0$ che si risolve in $\gamma < -1$, questo intervallo di valori di γ soddisfa anche il requisito che le derivate seconde pure abbiano segno negativo nell'origine (e ovunque in realtà). Quindi f ha massimo nell'origine per $\alpha = 0, \beta = 0, \gamma < -1$.

Esercizio 5.4. *Trovare e classificare eventuali estremanti di:*

a) $f(x, y) = x^4 - y^4$

b) $g(x, y) = x^4 + y^4$

Soluzione. Notiamo che $f, g \in C^\infty(\mathbb{R}^2)$ per cui per il teorema di Fermat eventuali estremanti sono punti stazionari.

a) Imponiamo che il gradiente si annulli:

$$\nabla f(0, 0) = 0 \iff \begin{cases} f_x(x, y) = 4x^3 = 0 \\ f_y(0, 0) = -4y^3 = 0 \end{cases}$$

Ne deduciamo che l'unico punto stazionario di f è l'origine in cui la matrice hessiana è nulla. Il determinante dell'hessiana è quindi nullo anch'esso, per cui il criterio della matrice hessiana non fornisce informazioni. Cerchiamo di capire come si comporta la funzione avvicinandosi da direzioni diverse, proviamo le restrizioni più semplici:

$$f(x, 0) = x^4 \quad f(0, y) = -y^4$$

Notiamo che quindi in una direzione avvicinandosi a 0 troviamo valori sempre positivi e maggiori di 0, mentre nell'altra direzione valori sempre negativi e minori di 0. Questo indica che l'origine non è nè un punto di massimo nè di minimo, ma di sella.

b) Imponendo che il gradiente si annulli per g porta evidentemente allo stesso risultato che per f , ovvero l'unico punto stazionario è l'origine. Per g è evidente che l'origine sia un punto di minimo locale (e assoluto) in quanto la funzione è costituita da una somma di quadrati che è non-negativa e che nel caso peggiore.

Esercizio 5.5. *Siano $f(x, y) = x^2 + 3y^2 - xy - y$ e $\{Q = (x, y) \in \mathbb{R}^2 : 0 \leq x \leq 1, 0 \leq y \leq 1\}$*

a) *Determinare se possibile gli estremi assoluti di f su Q*

b) *Stabilire se f ammette massimo o minimo assoluti sul suo dominio naturale*

Soluzione. a) La funzione è un polinomio e quindi è continua su \mathbb{R}^2 e in particolare su Q . L'insieme Q è compatto, cioè chiuso e limitato quindi per il teorema di Weierstrass f ammette massimo e minimo assoluti su Q . Gli estremi assoluti potrebbero trovarsi sul bordo o essere interni a Q . In questo secondo caso per il teorema di Fermat dovrebbero essere punti stazionari. Iniziamo ad imporre che il gradiente sia nullo:

$$\begin{cases} f_x(x, y) = 2x - y = 0 \\ f_y(x, y) = 6y - x - 1 = 0 \end{cases} \iff \begin{cases} x = \frac{1}{11} \\ y = \frac{2}{11} \end{cases}$$

Quindi c'è un solo punto stazionario intero a Q ed è $P = \left(\frac{1}{11}, \frac{2}{11}\right)$. Notiamo che il vincolo è un quadrato, studiamo le derivate parziali sul bordo tramite delle restrizioni, considerando un lato alla volta:

$$f_y(0, y) = 6y - 1 \geq 0 \iff y \geq \frac{1}{6}$$

$$f_x(x, 1) = 2x - 1 \geq 0 \iff x \geq \frac{1}{2}$$

$$f_y(1, y) = 6y - 2 \geq 0 \iff y \geq \frac{1}{3}$$

$$f_x(x, 0) = 2x \geq 0 \iff x \geq 0$$

Seguendo quindi le direzioni di crescita sul quadrato ne deduciamo che per f vincolata a ∂Q $(0, \frac{1}{6})$, $(1, \frac{1}{3})$, $(\frac{1}{2}, 1)$ sono sicuramente punti di minimo locale mentre $(1, 0)$, $(1, 1)$, $(0, 1)$ sono sicuramente punti di massimo locale. Per vedere quali tra questi sono estremi assoluti è sufficiente confrontare le immagini:

$$\begin{aligned} f(1, 0) &= 1 & f(1, 1) &= 2 & f(0, 1) &= 2 \\ f\left(0, \frac{1}{6}\right) &= 3 \cdot \frac{1}{36} - \frac{1}{6} = -\frac{1}{12} & f\left(1, \frac{1}{3}\right) &= 1 + 3 \cdot \frac{1}{9} - \frac{1}{3} = \frac{2}{3} \\ f\left(\frac{1}{2}, 1\right) &= \frac{1}{4} + 3 - \frac{1}{2} - 1 = \frac{7}{4} \end{aligned}$$

Quindi per f ristretta al bordo abbiamo $\max_{\partial Q} f = f(1, 1) = f(0, 1) = 2$ e $\min_{\partial Q} f = f\left(0, \frac{1}{6}\right) = -\frac{1}{12}$. Vediamo invece l'immagine del punto stazionario interno che abbiamo trovato:

$$f(P) = \frac{1}{11^2} + \frac{12}{11^2} - \frac{2}{11^2} - \frac{22}{11^2} = -\frac{11}{11^2} = -\frac{1}{11} < -\frac{1}{12}$$

Ne segue che il punto di minimo assoluto di f su Q è P mentre il punto di massimo assoluto vale 2 ed è in $(1, 1)$ e in $(0, 1)$.

b) Il dominio naturale di f è \mathbb{R}^2 che non è limitato per cui non potendo applicare il teorema di Weierstrass non possiamo dire se ci sono massimi o minimi assoluti. Tuttavia continua a valere Fermat per cui se ci sono punti di massimo assoluto allora sono anche punti di massimo relativo e quindi lì il gradiente è nullo. Per cui l'unico candidato è proprio P . Calcoliamo le derivate seconde nel punto per calcolare convessità e concavità:

$$f_{xy}(x, y) = -1 = f_{yx}(x, y)$$

$$f_{yy}(x, y) = \partial_y(6y - x - 1) = 6$$

L'hessiana quindi risulta per ogni punto:

$$H_f(x, y) = \begin{pmatrix} 2 & -1 \\ -1 & 6 \end{pmatrix} \quad \begin{cases} \det H_f = 11 > 0 \\ f_{xx}(x, y) = 2 > 0 \end{cases}$$

Concludiamo che f è convessa su tutto il dominio e che quindi P è punto di minimo assoluto e unico punto estremaale assoluto sul dominio naturale di f .

Esercizio 5.6. Sia $f(x, y) = y^2 + (e^{x^2} - 1)y + 1$

a) Determinare tutti gli eventuali estremanti di f

b) Determinare gli estremi assoluti di f sul triangolo T di vertici $(0, 0)$, $(1, 1)$, $(0, 1)$.

Soluzione. a) Per Fermat eventuali punti di estremi sono stazionari, imponiamo quindi che il gradiente si annulli:

$$\begin{cases} f_x = 2xye^{x^2} = 0 \\ f_y = 2y + e^{x^2} - 1 = 0 \end{cases} \iff \begin{cases} x = 0 \\ y = 0 \end{cases}$$

L'origine è quindi l'unico punto stazionario. Calcoliamo le derivate seconde e l'hessiana nell'origine:

$$f_{xx} = 2ye^{x^2}(1 + 2x^2) \quad f_{yy} = 2 \quad f_{xy} = f_{yx} = 2xe^{x^2}$$

$$H_f(0,0) = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 2 \end{pmatrix}, \quad \det(H_f(0,0)) = 0$$

Siccome il determinante dell'Hessiana è nullo, non riusciamo a stabilire immediatamente la convessità o concavità nel punto, ci serve un'analisi più approfondita. Possiamo analizzare la differenza tra la funzione e il punto in prossimità del punto stesso. In tal caso se $\Delta f > 0$ ovunque intorno al punto, il punto è certamente un minimo locale in quanto per "spostarci" dobbiamo salire, rispettivamente è un minimo locale se $\Delta f < 0$ ovunque. Se invece non c'è un segno univoco il punto sarà un punto di sella.

$$\Delta f(x, y) = f(x, y) - f(0, 0) = y^2 + (e^{x^2} - 1)y + 1 - 1 = y(y + e^{x^2} - 1)$$

Quindi $y > 0 \wedge y > 1 - e^{x^2} \implies \Delta(x, y) > 0$ mentre $y < 0 \wedge y > 1 - e^{x^2} \implies \Delta(x, y) < 0$. Questo dimostra che l'origine è un punto di sella. Si conclude quindi che f non ha estremanti.

b) T è un insieme chiuso e limitato su cui f è continua. Per il teorema di Weierstrass esistono massimo e minimo assoluti. Tuttavia abbiamo appena verificato che non ci sono punti stazionari interni quindi per Fermat gli estremi sono necessariamente sul bordo. Studiamo il segno delle derivate parziali lungo i lati del triangolo per individuare le direzioni di crescita, iniziamo dal lato verticale e da quello orizzontale:

$$f_y(0, y) = 2y > 0 \quad \forall y > 0$$

$$f_x(x, 1) = 2xe^{x^2} \quad \forall x > 0$$

Notiamo poi che il lato obliquo è lungo la bisettrice $y = x$ quindi restringiamo la funzione a questa retta e calcoliamone la derivata:

$$g(x) := f(x, x) = x^2 + x(e^{x^2} - 1) + 1 \quad g'(x) = 2x + 2x^2 e^{x^2} + e^{x^2} - 1$$

Si verifica facilmente che $g'(x) > 0 \quad \forall x \in (0, 1]$. A questo punto unendo le informazioni sulle direzioni di crescita concludiamo che $\min_T f = f(0, 0) = 1$ e $\max_T f = f(1, 1) = e + 1$.

Esercizio 5.7. Sia $f(x, y) = 2\sqrt{x^2 + y^2} + x^4 - y^4$:

- a) Determinare tutti gli eventuali punti critici di f sul dominio e classificarli
- b) Determinare gli eventuali estremi assoluti di f su $E = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : x^2 + y^2 \leq 1\}$
- c) Determinare tutti gli eventuali punti di estremo libero di f sia relativi che assoluti.

Soluzione. a) Iniziamo a calcolare le derivate parziali imponendo che il gradiente di annulli:

$$\begin{cases} f_x = \frac{2x}{\sqrt{x^2 + y^2}} + 4x^3 = 0 \\ f_y = \frac{2y}{\sqrt{x^2 + y^2}} - 4y^3 = 0 \end{cases} \quad \text{Per } (x, y) \neq (0, 0) \iff \begin{cases} x = 0 \\ \frac{2y}{|y|} - 4y^3 = 0 \end{cases} \iff \begin{cases} x = 0 \\ y = \pm \sqrt[3]{\frac{1}{2}} \end{cases}$$

Verifichiamo anche la derivabilità sull'origine con la definizione:

$$f_x(0, 0) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(h, 0) - f(0, 0)}{h} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{2|h| + h^4}{h} \xrightarrow{x \rightarrow 0^\pm} \pm 2$$

Per cui f non è derivabile rispetto a x nell'origine e ciò è sufficiente a dire che f non è derivabile nell'origine. Gli unici punti critici di f sono dunque $(0, \pm \frac{1}{2})$. Per classificarli ci servono le derivate seconde:

$$f_{xx} = \frac{2y^2}{(x^2 + y^2)^{\frac{3}{2}}} + 12x^2 \quad f_{yy} = \frac{2x^2}{(x^2 + y^2)^{\frac{3}{2}}} - 12y^2$$

Adesso, prima di calcolare le derivate miste, calcoliamo il valore delle derivate parziali nei punti critici $P_1 = (0, \sqrt[3]{\frac{1}{2}})$ e $P_2 = (0, -\sqrt[3]{\frac{1}{2}})$:

$$f_{xx}(0, y) = \frac{2}{|y|} \implies f_{xx}(P_1) > 0 \wedge f_{xx}(P_2) > 0$$

$$f_{yy}(0, y) = -12y^2 \implies f_{yy}(P_1) < 0 \wedge f_{yy}(P_2) < 0$$

Ma allora non serve neanche calcolare le derivate miste, infatti si può ragionare così: analizzando il determinante dell'hessiana abbiamo scoperto che il prodotto sulla diagonale è negativo, a questo prodotto andrà sottratto il prodotto sull'antidiagonale che però sarà sicuramente positivo in quanto per il teorema di Schwarz le derivate miste sono uguali (la funzione è C^2 ovunque tranne che nell'origine), il determinante sarà quindi sicuramente negativo. Senza ulteriori calcoli concludiamo che $f(P_1)$ e $f(P_2)$ sono punti di sella.

b) $E = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : x^2 + y^2 \leq 1\}$ è un insieme chiuso e limitato ed f è continua su \mathbb{R}^2 e in particolare su E . Quindi per il teorema di Weierstrass esistono gli estremi assoluti di f su E . Se i punti di estremo sono interni ad E o sono punti stazionari o sono punti di non derivabilità. Se invece i punti sono sul bordo di E , possiamo trovarli con i moltiplicatori di Lagrange o per parametrizzazione. In questo caso in vincolo è una circonferenza quindi è più facile procedere per parametrizzazione:

$$\begin{cases} x(t) = \cos(t) \\ y(t) = \sin(t) \end{cases} \quad \text{Per } t \in [0, 2\pi]$$

Otteniamo:

$$\begin{aligned} z(t) &= 2 + \cos^4(t) - \sin^4(t) = 2 + (\cos^2(t) - \sin^2(t)) \cdot (\cos^2(t) + \sin^2(t)) = \\ &= 2 + \cos^2(t) - \sin^2(t) = 2 + \cos(2t) \end{aligned}$$

Per cui la curva che rappresenta l'immagine dei punti sul bordo del vincolo in f è:

$$r(t) = \begin{cases} x = \cos(t) \\ y = \sin(t) \\ z = 2 + \cos(2t) \end{cases}$$

Per trovare i punti di massimo e minimo sul bordo non ci interessas derivare l'intero vettore posizione $r(t)$ perché in questo modo otterremmo la velocità di percorrenza e porre $r'(t) = 0$ significherebbe cercare punti in cui ci fermiamo nel percorrere la curva (punti singolari o cuspidi). Noi stiamo cercando i punti in cui $z'(t) = 0$ cioè i punti in cui durante la percorrenza della curva nè si sale nè si scende. Anche senza calcolare esplicitamente $z'(t)$ si vede ad occhio che per $t \in [0, 2\pi]$ avremo un massimo quando $\cos(2t) = 1 \iff t = 0 \vee t = \pi$ e un minimo quando $\cos(2t) = -1 \iff t = \frac{\pi}{2} \vee t = \frac{3\pi}{2}$.

Tornando alle variabili originali si ottengono i punti $(1, 0), (-1, 0)$ in corrispondenza dei quali c'è un massimo sul bordo e $(0, 1), (0, -1)$ in corrispondenza dei quali c'è un minimo. A questo punto valutiamo le immagini di f su tutti i candidati che abbiamo trovato: punti sul bordo, punti interni e punti di non derivabilità:

$$f(0, 0) = 0 \quad f(0, \pm 1) = 2 - 1 = 1 \quad f(\pm 1, 0) = 3 \quad f\left(0, \pm \sqrt[3]{\frac{1}{2}}\right) = \frac{3}{2^{\frac{4}{3}}} < 3$$

Dai valori e dal fatto che esistono massimi e minimi assoluti si deduce che $\max_E f = f(\pm 1, 0) = 3$ e $\min_E f = f(0, 0) = 0$.

c) Questa ultima richiesta non coincide con la prima, infatti gli eventuali punti di estremo libero potrebbero essere punti stazionari o di non derivabilità. L'origine è punto di non derivabilità e minimo per f vincolata ad E , quindi è anche punto di minimo locale per f sul suo dominio. Possiamo chiederci se sia anche di minimo assoluto.

$$f(0, y) = 2|y| - y^4 \underset{y \rightarrow \pm\infty}{\sim} -y^4 \xrightarrow{y \rightarrow \pm\infty} -\infty$$

Questo dimostra che f non è inferiormente limitata, per cui l'origine non è punto di minimo assoluto. Al contempo non ci possono essere altri punti di estremo perché gli unici punti stazionari sono di sella.

Esercizio 5.8. Sia $g(x, y) = x^2 - y^2$ e sia $D = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : x^2 + 2y^2 \leq 1\}$. Determinare massimo e minimo assoluto di g in D .

Soluzione. Siccome g è continua su D che è chiuso e limitato, massimo e minimo assoluto esistono per il teorema di Weierstrass. Iniziamo trovando i punti critici di g , che è di classe C^1 imponendo che il gradiente si annulli:

$$\nabla g(x, y) = 0 \iff \begin{cases} g_x(x, y) = 2x = 0 \\ g_y(x, y) = -2y = 0 \end{cases} \iff \begin{cases} x = 0 \\ y = 0 \end{cases}$$

L'unico punto critico di f è l'origine che si trova dentro il vincolo. Notiamo che il bordo dell'insieme D è costituito da:

$$\{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : h(x, y) = x^2 + 2y^2 - 1 = 0\}$$

Siccome $g, h \in C^1$ e $\nabla h(x, y) \neq 0$ per $(x, y) \neq (0, 0)$ che non è sul bordo del vincolo, possiamo usare il metodo dei moltiplicatori di Lagrange per trovare i candidati massimi e minimi assoluti sul bordo. Impostiamo il sistema:

$$\begin{cases} \frac{\partial g}{\partial x}(x, y) = \lambda \frac{\partial h}{\partial x}(x, y) \\ \frac{\partial g}{\partial y}(x, y) = \lambda \frac{\partial h}{\partial y}(x, y) \\ h(x, y) = 0 \end{cases} \iff \begin{cases} 2x - 2\lambda x = 0 \\ -2y - 4\lambda y = 0 \\ x^2 + 2y^2 - 1 = 0 \end{cases}$$

Da cui si ottiene:

$$x = 0, y = \pm \frac{1}{\sqrt{2}}, \lambda = -1/2$$

$$x = \pm 1, y = 0, \lambda = 1$$

Non ci resta che controllare l'immagine della funzione g in ognuno dei punti trovati:

$$g(0, 1/\sqrt{2}) = -1/2 \quad g(0, -1/\sqrt{2}) = -1/2$$

$$g(1, 0) = 1 \quad g(-1, 0) = 1 \quad g(0, 0) = 0$$

Possiamo concludere che $\max_D g = g(1, 0) = g(-1, 0) = 1$ e $\min_D g = g(0, \pm 1/\sqrt{2}) = -1/2$

Esercizio 5.9. *Trovare i punti stazionari della funzione $f(x, y) = x - y$ vincolati alla regione $A = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : \arctan(x^2 + y^2 - 2) = 2 - x + y\}$.*

Soluzione. Si vede subito che non ci sono punti stazionari liberi; infatti, imporre che il gradiente di f sia nullo risulta in due equazioni impossibili ($1 = 0, -1 = 0$). Trovare i punti stazionari vincolati significa trovare i candidati per essere minimi o massimi assoluti sul bordo. Definendo il vincolo come:

$$h(x, y) = \arctan(x^2 + y^2 - 2) - 2 + x - y = 0$$

Notiamo che $f, h \in C^1$. Calcoliamo le derivate parziali di $h(x, y)$. Poniamo per comodità $D = 1 + (x^2 + y^2 - 2)^2$, che è strettamente positivo ($D \geq 1$):

$$\frac{\partial h}{\partial x} = \frac{2x}{D} + 1, \quad \frac{\partial h}{\partial y} = \frac{2y}{D} - 1$$

1. Regolarità del vincolo Verifichiamo che non ci siano punti singolari sul vincolo ($\nabla h = 0$ con $h = 0$).

$$\nabla h(x, y) = 0 \iff \begin{cases} \frac{2x}{D} = -1 \\ \frac{2y}{D} = 1 \end{cases}$$

Sommando le due equazioni si ottiene $\frac{2(x+y)}{D} = 0 \implies y = -x$. Sostituendo $y = -x$ nella prima equazione del gradiente, avremmo $2x = -D = -[1 + (2x^2 - 2)^2]$. Se sostituiamo queste condizioni nell'equazione del vincolo $h(x, y) = 0$ (con $y = -x$):

$$\arctan(2x^2 - 2) = 2 - 2x$$

Sostituendo il valore di $2x$ trovato dal gradiente:

$$\arctan(2x^2 - 2) = 2 - (-[1 + (2x^2 - 2)^2]) = 3 + (2x^2 - 2)^2$$

Questa è una contraddizione: l'arcotangente è limitata superiormente da $\pi/2 \approx 1.57$, mentre il membro destro è ≥ 3 . Il gradiente non si annulla mai sul vincolo.

2. Moltiplicatori di Lagrange Impostiamo il sistema $\nabla f = \lambda \nabla h$:

$$\begin{cases} 1 = \lambda \left(\frac{2x}{D} + 1 \right) \\ -1 = \lambda \left(\frac{2y}{D} - 1 \right) \\ h(x, y) = 0 \end{cases}$$

Sommiamo le prime due equazioni membro a membro:

$$0 = \lambda \left(\frac{2x}{D} + 1 + \frac{2y}{D} - 1 \right) \implies \lambda \frac{2(x+y)}{D} = 0$$

Poiché $\lambda \neq 0$ (altrimenti la prima equazione sarebbe $1 = 0$), deve essere $x + y = 0 \implies y = -x$.

Sostituendo nel vincolo otteniamo l'equazione trascendente:

$$\arctan(2y^2 - 2) = 2 + 2y$$

Si verifica per ispezione che $y = -1$ è una soluzione (infatti $\arctan(0) = 0$). Per confermare l'unicità, studiamo la funzione ausiliaria $g(y) = \arctan(2y^2 - 2) - (2 + 2y)$. La sua derivata è:

$$g'(y) = \frac{4y}{1 + (2y^2 - 2)^2} - 2$$

Poiché per soddisfare l'equazione deve essere $y < 0$ (altrimenti il membro destro $2 + 2y \geq 2$ supera il massimo dell'arcotangente), analizziamo la derivata per $y < 0$. Il termine $\frac{4y}{1 + (\dots)}$ è negativo, quindi $g'(y) < -2$. Essendo la funzione strettamente decrescente, interseca l'asse zero al massimo una volta.

L'unico punto stazionario vincolato è $P(1, -1)$.

Esercizio 5.10. Calcolare massimo e minimo assoluti di $f(x, y) = x^2y$ nell'insieme $A = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : x \geq 0, y \geq 0, 2x^2 + y^2 \leq 4\}$

Soluzione. La funzione f è continua ovunque e in particolare sull'insieme A che è chiuso e limitato. Per Weierstrass esistono massimo e minimo assoluti. Calcoliamo le derivate parziali e imponiamole pari a 0:

$$\nabla f(x, y) = 0 \iff \begin{cases} f_x = 2xy = 0 \\ f_y = x^2 = 0 \end{cases}$$

Non c'è nessun punto stazionario all'interno di A , quindi concentriamoci direttamente sul bordo. Il bordo è l'unione di un segmento orizzontale, uno verticale e un arco di ellisse. In particolare partendo da quest'ultimo abbiamo che la sua equazione è:

$$2x^2 + y^2 = 4 \iff y = \pm\sqrt{4 - 2x^2}$$

Ma siccome siamo nel primo quadrante prendiamo solo l'arco superiore ignorando quello inferiore che è fuori dal vincolo quindi $y = +\sqrt{4 - 2x^2}$. Studiamo la restrizione di f lungo questo arco:

$$h(x) = f(x, \sqrt{4 - 2x^2}) = x^2\sqrt{4 - 2x^2}$$

$$h'(x) = -\frac{4x^3}{2\sqrt{4 - 2x^2}} + 2x\sqrt{4 - 2x^2}$$

Mettiamo l'espressione a denominatore comune:

$$\frac{-2x^3 + 2x(4 - 2x^2)}{\sqrt{4 - 2x^2}} = \frac{8x - 6x^3}{\sqrt{4 - 2x^2}} = \frac{x(8 - 6x^2)}{\sqrt{4 - 2x^2}}$$

Il denominatore è sempre non negativo. Analizzando il numeratore si scopre quindi che questa derivata è positiva (e quindi la funzione cresce sull'arco di ellisse) per $0 < x < 2/\sqrt{3}$ mentre è negativa per $2/\sqrt{3} < x < \sqrt{2}$. $\sqrt{2}$ è infatti il massimo valore che x assume nel nostro vincolo. Abbiamo quindi un massimo relativo in $(2/\sqrt{3}, 2/\sqrt{3})$ che ha immagine corrispondente $f(2/\sqrt{3}, 2/\sqrt{3}) = \frac{8}{3\sqrt{3}}$. Analizziamo la monotonia nelle restrizioni di f sugli altri due lati:

$$f_y(0, y) = 0 \quad f_x(x, 0) = 0$$

Quindi sul lato orizzontale e su quello verticale del vincolo f è identicamente nulla. Non possiamo che concludere che:

$$\max_A f = \frac{8}{3\sqrt{3}} \quad \min_A f = 0$$

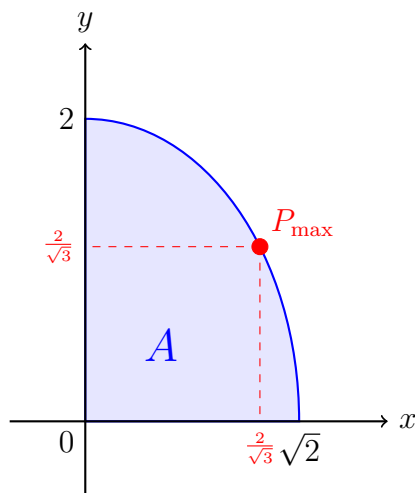


Figure 2: Il dominio A con il punto di massimo assoluto evidenziato.

Esercizio 5.11. *Determinare l'insieme di definizione e i massimi e minimi assoluti di $f(x, y) = \cos(\sqrt{xy})$.*

Soluzione. L'insieme di definizione è dato da:

$$D = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : xy \geq 0\}$$

Il coseno è una funzione limitata che oscilla tra -1 e 1. Questo significa che siccome l'insieme di definizione non è limitato avremo infiniti massimi assoluti che valgono 1 e infiniti minimi assoluti che valgono -1. Dobbiamo solo trovare i punti nel dominio che corrispondono a massimi e minimi:

$$\cos(\sqrt{xy}) = 1 \iff x_M y_M = (2k\pi)^2 \quad \text{Per } k \in \mathbb{N} \cup 0$$

Abbiamo quindi infiniti punti nel dominio la cui immagine è un massimo assoluto per f che corrispondono ad una famiglia di iperboli. Per i punti di minimo facciamo lo stesso ragionamento:

$$\cos(\sqrt{xy}) = -1 \iff y_m x_m = [\pi(2k+1)]^2 \quad \text{Per } k \in \mathbb{N} \cup 0$$

Che costituiscono un'altra famiglia di iperboli.

Esercizio 5.12. *Siano f e g le funzioni $f(x, y) = x^2 + y^2$, $g(x, y) = e^x + e^y - 4 \forall (x, y) \in \mathbb{R}^2$. Calcolare il gradiente di ciascuna funzione e spiegare perché sono differenziabili in \mathbb{R}^2 . Trovare il massimo di $f(x, y)$ soggetta al vincolo $g(x, y) = 0$ utilizzando i moltiplicatori di Lagrange.*

Soluzione. I gradienti di f e di g sono:

$$\nabla f(x, y) = \begin{bmatrix} 2x \\ 2y \end{bmatrix}, \quad \nabla g(x, y) = \begin{bmatrix} 2xe^x \\ 2ye^y \end{bmatrix}$$

Le funzioni f e g sono differenziabili in tutto \mathbb{R}^2 in quanto composizione e somma di funzioni elementari di classe C^∞ (polinomi ed esponenziali).

Per applicare il metodo dei moltiplicatori di Lagrange verifichiamo la regolarità del vincolo. Il gradiente ∇g si annulla solo in $(0, 0)$, ma l'origine non appartiene al vincolo (infatti $e^0 + e^0 - 4 = -2 \neq 0$). Dunque il vincolo è regolare ovunque. Essendo il vincolo un insieme chiuso e limitato (gli esponenziali crescono all'infinito, quindi x e y devono essere limitati), per Weierstrass esistono massimo e minimo assoluti.

Impostiamo il sistema $\nabla f = \lambda \nabla g$:

$$\begin{cases} 2x - 2\lambda x e^{x^2} = 0 \\ 2y - 2\lambda y e^{y^2} = 0 \\ e^{x^2} + e^{y^2} = 4 \end{cases} \iff \begin{cases} 2x(1 - \lambda e^{x^2}) = 0 \\ 2y(1 - \lambda e^{y^2}) = 0 \\ e^{x^2} + e^{y^2} = 4 \end{cases}$$

Analizziamo i casi:

1. Caso $x = 0$ Sostituendo nella terza equazione troviamo $1 + e^{y^2} = 4 \implies e^{y^2} = 3 \implies y = \pm\sqrt{\log(3)}$. Otteniamo i punti $P_{1,2} = (0, \pm\sqrt{\log(3)})$.

2. Caso $y = 0$ Sostituendo nella terza equazione troviamo $e^{x^2} + 1 = 4 \implies x = \pm\sqrt{\log(3)}$. Otteniamo i punti $P_{3,4} = (\pm\sqrt{\log(3)}, 0)$.

3. Caso $x \neq 0 \wedge y \neq 0$ Dalle prime due equazioni ricaviamo $e^{x^2} = 1/\lambda$ e $e^{y^2} = 1/\lambda$, il che implica $x^2 = y^2$. Sostituendo nel vincolo:

$$2e^{x^2} = 4 \implies e^{x^2} = 2 \implies x = \pm\sqrt{\log(2)}$$

Poiché $y^2 = x^2$, anche $y = \pm\sqrt{\log(2)}$. Otteniamo 4 punti: $(\sqrt{\log(2)}, \sqrt{\log(2)})$, $(\sqrt{\log(2)}, -\sqrt{\log(2)})$, $(-\sqrt{\log(2)}, -\sqrt{\log(2)})$, $(-\sqrt{\log(2)}, \sqrt{\log(2)})$.

Conclusione Calcoliamo il valore di $f(x, y) = x^2 + y^2$ nei punti trovati:

- Nei casi 1 e 2 ($P_{1,4}$): $f = 0 + \log(3) = \log(3)$.
- Nel caso 3: $f = \log(2) + \log(2) = 2\log(2) = \log(4)$.

Poiché $\log(4) > \log(3)$, concludiamo che:

$$\max_{g(x,y)=0} f = \log(4)$$

6 Calcolo integrale per funzioni di più variabili

Esercizio 6.1. Sia $f(x, y) = e^{y^2} + e^x$ e sia T il triangolo di vertici $(0, 0)$, $(0, 1)$, $(2, 1)$. Per f su T calcolare il valore massimo, minimo e medio.

Soluzione. T è un insieme chiuso e limitato su cui f è continua, quindi per Weierstrass esistono massimi e minimi assoluti. Imponendo nullo il gradiente di f otteniamo:

$$\nabla f(x, y) = (0, 0) \iff \begin{cases} f_x(x, y) = e^x = 0 \\ f_y(x, y) = 2ye^{y^2} = 0 \end{cases}$$

Che è impossibile. Procediamo con lo studio delle derivate della funzione ristretta a ciascun lato del bordo:

$$f_y(0, y) = 2ye^{y^2} \geq 0 \iff y \geq 0$$

$$f_x(x, 1) = e^x \geq 0 \quad \forall x \in [0, 2]$$

$$h(x) = f\left(x, \frac{x}{2}\right) = e^{\frac{x^2}{4}} + e^x \implies h'(x) = \frac{1}{2}x \cdot e^{\frac{x^2}{4}} + e^x \geq 0 \quad \forall x \in [0, 2]$$

Ma allora avremo per forza che $\min_T f = f(0, 0) = 2$ e $\max_T f = f(2, 1) = e + e^2$.

Il valor medio M è definito come l'integrale della funzione diviso la misura dell'insieme:

$$M = \frac{\int_T f(x, y) \, dx dy}{Area(T)} = \int_T f(x, y) \, dx dy$$

Infatti in questo caso si trova facilmente che l'area del triangolo è unitaria. Svolgiamo l'integrale doppio, avendo riconosciuto T come insieme xy -semplice, in quanto intersecando l'insieme con rette orizzontali o verticali si ottengono dei segmenti, uno per ogni retta. Identificandolo come y -semplice otteniamo:

$$T = \left\{ (x, y) \in \mathbb{R}^2 : 0 \leq x \leq 2, \frac{x}{2} \leq y \leq 1 \right\}$$

$$\int_T f(x, y) \, dx dy = \int_0^2 \int_{\frac{x}{2}}^1 f(x, y) \, dy dx = \int_0^2 \int_{\frac{x}{2}}^1 e^{y^2} + e^x \, dy dx$$

Questo integrale non è risolvibile in quanto e^{y^2} non ammette primitiva in termini di funzioni elementari. Proviamo allora a trattare l'insieme come x -semplice:

$$T = \left\{ (x, y) \in \mathbb{R}^2 : 0 \leq y \leq 1, 0 \leq x \leq 2y \right\}$$

$$\begin{aligned} \int_T f(x, y) \, dx dy &= \int_0^1 \int_0^{2y} f(x, y) \, dx dy = \int_0^1 \int_0^{2y} e^{y^2} + e^x \, dx dy = \\ &= \int_0^1 \left[xe^{y^2} + e^x \right]_{x=0}^{x=2y} dx dy = \int_0^1 2ye^{y^2} + e^{2y} - 1 \, dy = \\ &= \left[e^{y^2} + \frac{e^{2y}}{2} - y \right]_0^1 = e + \frac{e^2}{2} - 1 - 1 - \frac{1}{2} = e + \frac{e^2}{2} - \frac{5}{2} \end{aligned}$$

Quindi concludiamo che il valor medio è $e + \frac{e^2}{2} - \frac{5}{2}$ che infatti sta proprio tra il massimo e il minimo.

Esercizio 6.2. Calcolare le coordinate del baricentro di una lamina piana di densità $\delta(x, y) = 3 - x$ che occupa la regione $D = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : 2x^2 \leq y \leq x^2 + 1\}$.

Soluzione. L'insieme D è la regione compresa tra due parabole. Per determinare l'intervallo di variazione della x (proiezione sull'asse orizzontale), intersechiamo le curve:

$$2x^2 \leq x^2 + 1 \iff x^2 \leq 1 \iff -1 \leq x \leq 1$$

L'insieme è y -semplice (normale rispetto all'asse x):

$$D = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : -1 \leq x \leq 1, \quad 2x^2 \leq y \leq x^2 + 1\}$$

Le coordinate del baricentro (x_b, y_b) sono date da:

$$x_b = \frac{1}{M} \iint_D x \delta(x, y) dx dy, \quad y_b = \frac{1}{M} \iint_D y \delta(x, y) dx dy$$

dove $M = \iint_D \delta(x, y) dx dy$ è la massa totale.

1. Calcolo della Massa M

$$M = \int_{-1}^1 \left(\int_{2x^2}^{x^2+1} (3-x) dy \right) dx = \int_{-1}^1 \int_{2x^2}^{x^2+1} 3 dy dx - \int_{-1}^1 \int_{2x^2}^{x^2+1} x dy dx$$

Il secondo integrale è nullo per simmetria: il dominio D è simmetrico rispetto all'asse y (invariante per $x \rightarrow -x$) e l'integranda $g(x, y) = x$ è dispari rispetto a x . Resta solo il primo termine:

$$M = 3 \int_{-1}^1 (x^2 + 1 - 2x^2) dx = 3 \int_{-1}^1 (1 - x^2) dx$$

Sfruttando la parità dell'integranda rimanente:

$$M = 3 \cdot 2 \int_0^1 (1 - x^2) dx = 6 \left[x - \frac{x^3}{3} \right]_0^1 = 6 \left(1 - \frac{1}{3} \right) = 6 \cdot \frac{2}{3} = 4$$

2. Calcolo di x_b

$$x_b = \frac{1}{4} \iint_D x(3-x) dx dy = \frac{1}{4} \left(\iint_D 3x dx dy - \iint_D x^2 dx dy \right)$$

Il primo termine è nullo per lo stesso motivo di simmetria visto prima (integranda $3x$ dispari su dominio simmetrico).

$$x_b = -\frac{1}{4} \int_{-1}^1 \int_{2x^2}^{x^2+1} x^2 dy dx = -\frac{1}{4} \int_{-1}^1 x^2(1 - x^2) dx$$

Essendo l'integranda pari:

$$x_b = -\frac{1}{4} \cdot 2 \int_0^1 (x^2 - x^4) dx = -\frac{1}{2} \left[\frac{x^3}{3} - \frac{x^5}{5} \right]_0^1 = -\frac{1}{2} \left(\frac{1}{3} - \frac{1}{5} \right) = -\frac{1}{2} \cdot \frac{2}{15} = -\frac{1}{15}$$

3. Calcolo di y_b

$$y_b = \frac{1}{4} \iint_D y(3-x) dx dy = \frac{1}{4} \left(\iint_D 3y dx dy - \iint_D xy dx dy \right)$$

Il termine $\iint xy \, dx dy$ è nullo per simmetria (dispari in x).

$$y_b = \frac{3}{4} \int_{-1}^1 \left[\frac{y^2}{2} \right]_{2x^2}^{x^2+1} dx = \frac{3}{8} \int_{-1}^1 ((x^2+1)^2 - (2x^2)^2) dx$$

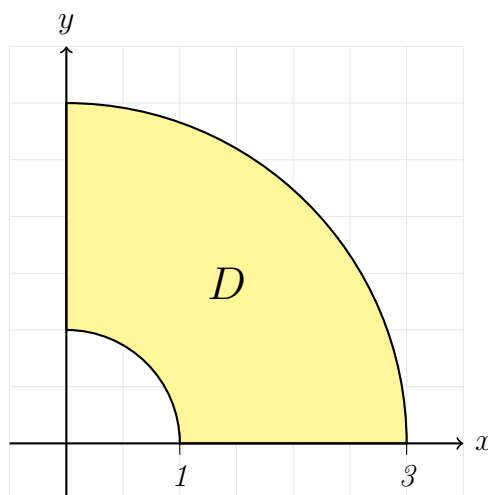
Sviluppiamo i quadrati ($x^4 + 2x^2 + 1 - 4x^4 = 1 + 2x^2 - 3x^4$) e usiamo la simmetria sull'intervallo $[-1, 1]$:

$$y_b = \frac{3}{8} \cdot 2 \int_0^1 (1 + 2x^2 - 3x^4) dx = \frac{3}{4} \left[x + \frac{2x^3}{3} - \frac{3x^5}{5} \right]_0^1$$

$$y_b = \frac{3}{4} \left(1 + \frac{2}{3} - \frac{3}{5} \right) = \frac{3}{4} \left(\frac{15 + 10 - 9}{15} \right) = \frac{3}{4} \cdot \frac{16}{15} = \frac{4}{5}$$

Concludiamo che il baricentro è $G = \left(-\frac{1}{15}, \frac{4}{5} \right)$.

Esercizio 6.3. *Determinare le coordinate del baricentro della lamina omogenea rappresentata in figura:*



Soluzione. Poiché la lamina è omogenea, la densità è costante ($\delta(x, y) = c > 0$). Le coordinate del baricentro dipendono solo dalla geometria dell'insieme D .

Le formule per il baricentro si semplificano eliminando la costante c :

$$x_b = \frac{1}{\text{Area}(D)} \iint_D x \, dx dy, \quad y_b = \frac{1}{\text{Area}(D)} \iint_D y \, dx dy$$

1. Calcolo dell'Area

Il dominio D è un quarto di corona circolare (differenza tra un quarto di cerchio di raggio 3 e uno di raggio 1):

$$\text{Area}(D) = \frac{1}{4}\pi(3^2) - \frac{1}{4}\pi(1^2) = \frac{9\pi}{4} - \frac{\pi}{4} = \frac{8\pi}{4} = 2\pi$$

2. Calcolo di x_b

Passiamo in **coordinate polari** per risolvere l'integrale.

$$\begin{cases} x = \rho \cos \theta \\ y = \rho \sin \theta \end{cases}, \quad |J| = \rho$$

L'insieme D in coordinate polari corrisponde al rettangolo:

$$D' = \left\{ (\rho, \theta) \in \mathbb{R}^2 : 1 \leq \rho \leq 3, \quad 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} \right\}$$

Sostituendo nell'integrale:

$$\iint_D x \, dx dy = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_1^3 (\rho \cos \theta) \cdot \rho \, d\rho d\theta = \left(\int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos \theta \, d\theta \right) \cdot \left(\int_1^3 \rho^2 \, d\rho \right)$$

Calcoliamo i due integrali separatamente:

$$\int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos \theta \, d\theta = [\sin \theta]_0^{\pi/2} = 1$$

$$\int_1^3 \rho^2 \, d\rho = \left[\frac{\rho^3}{3} \right]_1^3 = \frac{27}{3} - \frac{1}{3} = \frac{26}{3}$$

Quindi il momento statico rispetto all'asse y è $1 \cdot \frac{26}{3} = \frac{26}{3}$.

La coordinata x_b è:

$$x_b = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{26}{3} = \frac{13}{3\pi}$$

3. Considerazioni di Simmetria

Notiamo che l'insieme D è simmetrico rispetto alla bisettrice del primo e terzo quadrante ($y = x$). Poiché anche la densità è uniforme, il baricentro deve giacere sull'asse di simmetria.

$$y_b = x_b = \frac{13}{3\pi}$$

Concludiamo che il baricentro è il punto $G = \left(\frac{13}{3\pi}, \frac{13}{3\pi} \right)$.

Esercizio 6.4. Calcolare l'integrale di $f(x, y) = \frac{x-1}{(x-1)^2+y^2}$ sull'insieme

$$D = \left\{ (x, y) \in \mathbb{R}^2 : (x-1)^2 + y^2 \geq 1, 0 \leq y \leq \sqrt{3}(x-1), 1 \leq x \leq 2 \right\}.$$