

CAPÍTULO 6. SÉRIES DE NÚMEROS REAIS

SUMÁRIO

1. Séries sem sinal	4
2. Séries absolutamente convergentes	5

Seja

$$a_1, a_2, \dots, a_n, \dots$$

uma sequência infinita de números reais.

O objetivo é definir a soma infinita (ou a série)

$$a_1 + a_2 + \dots + a_n + \dots$$

Consideramos as somas finitas:

$$s_1 = a_1$$

$$s_2 = a_1 + a_2$$

$$s_n = a_1 + a_2 + \dots + a_n.$$

chamadas de *somas parciais*.

A soma infinita

$$a_1 + a_2 + \dots + a_n + \dots$$

será o limite das somas finitas s_n quando $n \rightarrow \infty$, se o limite existir. Mais formalmente,

Definição 1. A série $\sum_{n \geq 1} a_n$ é **convergente** se a sequência de somas parciais

$$s_n = a_1 + \dots + a_n, \quad \forall n \geq 1$$

é convergente. Neste caso, a soma da série é

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_n = \lim_{n \rightarrow \infty} s_n.$$

Exemplo 0.1. Seja $a \in (0, 1)$ e considere a série geométrica

$$\sum_{n \geq 0} a^n.$$

Como as somas parciais têm uma fórmula fechada,

$$s_n = 1 + a + \dots + a^{n-1} = \frac{a^n - 1}{a - 1},$$

e como $\lim_{n \rightarrow \infty} a^n = 0$, já que $a \in (0, 1)$, concluímos que

$$\lim_{n \rightarrow \infty} s_n = \frac{0 - 1}{a - 1} = \frac{1}{1 - a}.$$

Portanto, a série $\sum_{n \geq 0} a^n$ converge e

$$\sum_{n \geq 0} a^n = \frac{1}{1 - a}.$$

Exemplo 0.2. A série

$$1 + 1 + 1 + \dots = \sum_{n \geq 0} 1$$

não converge (diverge), já que suas somas parciais

$$s_n = 1 + \dots + 1 = n$$

formam uma sequência divergente para $+\infty$.

Além disso, a série geométrica

$$\sum_{n \geq 0} a^n, \quad \text{com } a > 1,$$

também diverge, já que

$$s_n = 1 + a + \dots + a^n \geq 1 + 1 + \dots + 1 = n.$$

Como $\lim_{n \rightarrow \infty} s_n = +\infty$, tem-se que s_n não converge.

Exemplo 0.3. A série

$$\sum_{n \geq 0} (-1)^n = 1 + (-1) + 1 + (-1) + \dots$$

diverge. Isto é porque suas somas parciais com índice par

$$s_{2n} = 1 + (-1) + \dots + 1 + (-1) = 0,$$

logo a subsequência $s_{2n} \rightarrow 0$, enquanto

$$s_{2n+1} = 1 + (-1) + \dots + 1 = 1 \rightarrow 1.$$

Teorema 0.4. Se $\sum_{n \geq 1} a_n$ é uma série convergente, então $a_n \rightarrow 0$.

Demonstração. Observe que as somas parciais são

$$s_n = a_1 + \dots + a_n,$$

$$s_{n-1} = a_1 + \dots + a_{n-1}.$$

Logo, $a_n = s_n - s_{n-1}$.

Como $\sum_{n \geq 1} a_n$ converge, existe $\lim_{n \rightarrow \infty} s_n = S \in \mathbb{R}$.

Portanto,

$$\lim_{n \rightarrow \infty} a_n = \lim_{n \rightarrow \infty} (s_n - s_{n-1}) = S - S = 0. \quad \square$$

\square

Corolário 0.5. Se a sequência $(a_n)_{n \geq 1}$ não converge para 0, então a série $\sum_{n \geq 1} a_n$ é divergente.

Isso mostra imediatamente que as séries $\sum_{n \geq 0} a^n$ com $a \geq 1$, $\sum 1$, $\sum (-1)^n$ são divergentes.

Exemplo 0.6. A série $\sum_{n \geq 1} \frac{1}{n(n+1)}$ é convergente.

De fato, observe que

$$\frac{1}{n} - \frac{1}{n+1} = \frac{n+1-n}{n(n+1)} = \frac{1}{n(n+1)}.$$

Portanto, as somas parciais

$$\begin{aligned} s_n &= \frac{1}{1 \cdot 2} + \frac{1}{2 \cdot 3} + \dots + \frac{1}{n(n+1)} \\ &= \left(1 - \frac{1}{2}\right) + \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{3}\right) + \dots + \left(\frac{1}{n} - \frac{1}{n+1}\right) \\ &= 1 - \frac{1}{n+1}. \end{aligned}$$

E daí,

$$\lim_{n \rightarrow \infty} s_n = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 - \frac{1}{n+1} \right) = 1 - 0 = 1.$$

Portanto, a série converge e

$$\sum_{n \geq 1} \frac{1}{n(n+1)} = 1.$$

Exemplo 0.7. A série harmônica

$$\sum_{n \geq 1} \frac{1}{n}$$

é divergente.

Para verificar essa afirmação, consideramos as somas parciais com índices potências de 2, ou seja,

$$s_{2^n} = 1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \cdots + \frac{1}{2^n}.$$

Vamos considerar os primeiros termos dessa sequência:

$$s_1 = 1,$$

$$s_2 = 1 + \frac{1}{2},$$

$$s_4 = 1 + \frac{1}{2} + \left(\frac{1}{3} + \frac{1}{4} \right) > 1 + \frac{1}{2} + \frac{2 \cdot 1}{4} = 1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{2} = 1 + 2 \cdot \frac{1}{2},$$

$$\begin{aligned} s_8 &= 1 + \frac{1}{2} + \left(\frac{1}{3} + \frac{1}{4} \right) + \left(\frac{1}{5} + \frac{1}{6} + \frac{1}{7} + \frac{1}{8} \right) > 1 + \frac{1}{2} + 2 \cdot \frac{1}{4} + 4 \cdot \frac{1}{8} \\ &= 1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{2} + \frac{1}{2} = 1 + 3 \cdot \frac{1}{2}. \end{aligned}$$

Desse modo é fácil perceber que, em geral,

$$\begin{aligned} s_{2^n} &= 1 + \frac{1}{2} + \left(\frac{1}{3} + \frac{1}{4} \right) + \cdots + \left(\frac{1}{2^{n-1}} + \cdots + \frac{1}{2^n} \right) \\ &> 1 + \frac{1}{2} + 2 \cdot \frac{1}{2^2} + \cdots + 2^{n-1} \cdot \frac{1}{2^n} \\ &= 1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{2} + \cdots + \frac{1}{2} \\ &= 1 + n \cdot \frac{1}{2}. \end{aligned}$$

Como $\lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + n \cdot \frac{1}{2} \right) = \infty$ e $s_{2^n} > 1 + n \cdot \frac{1}{2}$, tem-se

$$\lim_{n \rightarrow \infty} s_{2^n} = \infty.$$

Portanto, a sequência de somas parciais $(s_n)_{n \geq 1}$ não pode convergir (possui uma subsequência divergente), logo a série

$$\sum_{n \geq 1} \frac{1}{n}$$

diverge.

1. SÉRIES SEM SINAL

Vamos considerar o caso especial (mas muito importante) de séries

$$\sum_{n \geq 1} a_n$$

com termos não negativos (ou sem sinal), i.e. $a_n \geq 0 \forall n \geq 1$.

Observe que as somas parciais satisfazem

$$\begin{aligned} s_{n+1} &= a_1 + \cdots + a_n + a_{n+1} \\ &= s_n + a_{n+1} \geq s_n. \end{aligned}$$

Ou seja, $s_{n+1} \geq s_n$ para todo $n \geq 1$.

Portanto, a sequência $(s_n)_{n \geq 1}$ é não decrescente.

Lembre-se que uma sequência não decrescente é convergente sse é limitada superiormente, sse possui uma subsequência limitada superiormente.

Portanto, uma série sem sinal

$$\sum_{n \geq 1} a_n \quad (a_n \geq 0 \forall n)$$

converge sse existe $M \in \mathbb{R}$ tal que

$$s_n = a_1 + \cdots + a_n \leq M \quad \forall n \geq 1.$$

Teorema 1.1 (Critério de comparação). *Sejam $\sum_{n \geq 1} a_n$ e $\sum_{n \geq 1} b_n$ duas séries sem sinal, e suponha que*

$$0 \leq a_n \leq b_n \quad \forall n \geq 1.$$

(i) *Se $\sum_{n \geq 1} b_n$ é convergente, então $\sum_{n \geq 1} a_n$ é convergente também.*

(ii) *Se $\sum_{n \geq 1} a_n$ é divergente, então $\sum_{n \geq 1} b_n$ é divergente também.*

Demonstração. Sejam

$$s_n = a_1 + \cdots + a_n, \quad \sigma_n = b_1 + \cdots + b_n$$

as somas parciais das duas séries. Como $a_n \leq b_n \forall n \geq 1$, tem-se

$$s_n \leq \sigma_n \quad \forall n \geq 1.$$

Se $\sum_{n \geq 1} b_n$ converge, então $(\sigma_n)_n$ é limitada superiormente. Logo, $(s_n)_n$ também é limitada superiormente, então $\sum_{n \geq 1} a_n$ converge. \square

De modo análogo, se $\sum_{n \geq 1} a_n$ diverge, então $(s_n)_n$ não é limitada superiormente, então $(\sigma_n)_n$ não é limitada superiormente, e então $\sum_{n \geq 1} b_n$ diverge.

Exemplo 1.2. Vamos considerar a p -série

$$\sum_{n \geq 1} \frac{1}{n^p},$$

onde $p > 0$.

Vamos mostrar que a série diverge se $p \leq 1$ e converge se $p > 1$.

■ $p \leq 1$: Para todo $n \geq 1$, tem-se $n^p \leq n^1 = n$, então

$$\frac{1}{n^p} \geq \frac{1}{n}.$$

Como $\sum_{n \geq 1} \frac{1}{n}$ diverge, pelo critério de comparação,

$$\sum_{n \geq 1} \frac{1}{n^p}$$

diverge também.

- $p > 1$: Vamos mostrar que a subsequência $(s_{2^n-1})_{n \geq 1}$ é limitada superiormente. Como já vimos, isso será suficiente para concluirmos a convergência da série.

De fato,

$$\begin{aligned} s_{2^n-1} &= 1 + \frac{1}{2^p} + \frac{1}{3^p} + \cdots + \frac{1}{(2^n-1)^p} \\ &< 1 + \left(\frac{1}{2^p} + \frac{1}{3^p} \right) + \left(\frac{1}{4^p} + \frac{1}{5^p} + \frac{1}{6^p} + \frac{1}{7^p} \right) + \cdots + \frac{1}{(2^n-1)^p}. \end{aligned}$$

Logo,

$$s_{2^n-1} < 1 + 2 \cdot \frac{1}{2^p} + 4 \cdot \frac{1}{4^p} + \cdots + 2^{n-1} \cdot \frac{1}{(2^{n-1})^p}.$$

Isto é,

$$s_{2^n-1} = 1 + \sum_{k=0}^{n-1} \left(\frac{1}{2^{p-1}} \right)^k.$$

Seja $a = \frac{1}{2^{p-1}}$.

Como $p > 1$, tem-se $p-1 > 0$, então $2^{p-1} > 1$, e logo

$$a = \frac{1}{2^{p-1}} < 1.$$

Logo, a série

$$\sum_{n \geq 0} \left(\frac{1}{2^{p-1}} \right)^n = \sum_{n \geq 0} a^n$$

converge, então suas somas parciais formam uma sequência convergente, logo limitada superiormente.

Como

$$s_{2^n-1} < \sum_{k=0}^{n-1} \left(\frac{1}{2^{p-1}} \right)^k,$$

concluimos que $(s_{2^n-1})_{n \geq 1}$ é limitada superiormente.

2. SÉRIES ABSOLUTAMENTE CONVERGENTES

Começamos com um critério geral de convergência para séries com (ou sem) sinal, a saber, o critério de Cauchy.

Teorema 2.1 (Critério de Cauchy). *Uma série*

$$\sum_{n \geq 1} a_n$$

é convergente se, e somente se, para todo $\varepsilon > 0$ existe $n_\varepsilon \in \mathbb{N}$ tal que, para todo $n \geq n_\varepsilon$ e $p \in \mathbb{N}$,

$$|a_{n+1} + a_{n+2} + \cdots + a_{n+p}| < \varepsilon.$$

Demonstração. A série $\sum_{n \geq 1} a_n$ converge se, e somente se, suas somas parciais (s_n) formam uma sequência convergente.

Pelo critério de Cauchy, (s_n) converge se, e somente se, (s_n) é uma sequência de Cauchy, isto é, para todo $\varepsilon > 0$ existe $n_\varepsilon \in \mathbb{N}$ tal que, se $n \geq n_\varepsilon$ e $p \geq 1$, então

$$|s_{n+p} - s_n| < \varepsilon.$$

Mas claramente

$$\begin{aligned} s_{n+p} - s_n &= (a_1 + \cdots + a_n + a_{n+1} + \cdots + a_{n+p}) - (a_1 + \cdots + a_n) \\ &= a_{n+1} + \cdots + a_{n+p}, \end{aligned}$$

logo $|a_{n+1} + \cdots + a_{n+p}| \leq \varepsilon$. □

Definição 2. Uma série $\sum_{n \geq 1} a_n$ é **absolutamente convergente** se a série dos valores absolutos

$$\sum_{n \geq 1} |a_n|$$

é convergente.

Teorema 2.2. *Se a série $\sum_{n \geq 1} a_n$ é absolutamente convergente, então ela é convergente. Em outras palavras, se*

$$\sum_{n \geq 1} |a_n| \text{ converge, então } \sum_{n \geq 1} a_n \text{ converge também.}$$

Demonstração. Como $\sum_{n \geq 1} |a_n|$ converge, pelo critério de Cauchy, dado $\varepsilon > 0$ existe $n_\varepsilon \in \mathbb{N}$ tal que, para todo $n \geq n_\varepsilon$ e $p \geq 1$,

$$|a_{n+1}| + \cdots + |a_{n+p}| < \varepsilon.$$

Mas

$$|a_{n+1} + \cdots + a_{n+p}| \leq |a_{n+1}| + \cdots + |a_{n+p}|,$$

logo $|a_{n+1} + \cdots + a_{n+p}| < \varepsilon$, mostrando, via o critério de Cauchy, que a série

$$\sum_{n \geq 1} a_n$$

é convergente. □

Observação 2.1. Vemos ver que a série

$$\sum_{n \geq 1} (-1)^{n+1} \frac{1}{n} = 1 - \frac{1}{2} + \frac{1}{3} - \frac{1}{4} + \cdots$$

é convergente. Porém,

$$\sum_{n \geq 1} \left| (-1)^{n+1} \frac{1}{n} \right| = \sum_{n \geq 1} \frac{1}{n}$$

é a série harmônica, uma série divergente. Portanto,

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

é convergente, mas não absolutamente convergente.

Teorema 2.3 (O teste da raiz). *Seja*

$$\sum_{n \geq 1} a_n$$

uma série de números reais e suponha que o limite abaixo exista.

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n|} = a$$

- (i) *Se $a < 1$, então a série $\sum_{n \geq 1} a_n$ converge absolutamente.*
- (ii) *Se $a > 1$, então a série $\sum_{n \geq 1} a_n$ diverge.*
- (iii) *Se $a = 1$, o teste é inconclusivo (não fornece nenhuma informação sobre a convergência da série).*

Demonstração. (i) Seja $\sigma \in (a, 1)$. Como $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n|} = a < \sigma$, existe $n_\varepsilon \in \mathbb{N}$ tal que

$$\sqrt[n]{|a_n|} \leq \sigma \quad \text{para todo } n \geq n_\varepsilon.$$

Logo, $|a_n| \leq \sigma^n$ para todo $n \geq 1$.

A série geométrica $\sum_{n \geq 1} \sigma^n$ converge, já que $\sigma < 1$. Pelo critério de comparação, $\sum_{n \geq 1} |a_n|$ converge também (pois $|a_n| \geq 0$). Logo, $\sum_{n \geq 1} a_n$ converge absolutamente.

(ii) Seja agora $R \in (1, a)$. Como $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n|} = a > R$, existe $n_1 \in \mathbb{N}$ tal que

$$\sqrt[n]{|a_n|} \geq R \quad \text{para todo } n \geq n_1,$$

isto é, $|a_n| \geq R^n$ para $n \geq n_1$.

Mas $\sum_{n \geq 1} R^n$ diverge, já que $R > 1$. Portanto, $\sum_{n \geq 1} a_n$ diverge. \square

Como $R > 1$, tem-se

$$\lim_{n \rightarrow \infty} R^n = \infty.$$

Mas $|a_n| \geq R^n$ para $n \geq n_1$, logo

$$\lim_{n \rightarrow \infty} |a_n| = \infty.$$

Em particular, $a_n \not\rightarrow 0$ quando $n \rightarrow \infty$, logo $\sum a_n$ diverge.

(iii) A série $\sum_{n \geq 1} \frac{1}{n}$ diverge. Seja $a_n = \frac{1}{n}$, então

$$\sqrt[n]{|a_n|} = \sqrt[n]{\frac{1}{n}} = \frac{1}{\sqrt[n]{n}} \rightarrow 1 \quad \text{quando } n \rightarrow \infty.$$

Por outro lado, $\sum_{n \geq 1} \frac{1}{n^2}$ converge, e quanto a ela

$$\sqrt[n]{\frac{1}{n^2}} = \left(\frac{1}{n^2}\right)^{1/n} \rightarrow 1 \quad \text{quando } n \rightarrow \infty.$$

Logo, existem séries $\sum a_n$ com

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n|} = 1$$

que são convergentes, e também que são divergentes.

Exemplo 2.4. Considere a série

$$\sum_{n \geq 1} na^n = a + 2a^2 + 3a^3 + \dots$$

(onde $a \in \mathbb{R}$). Vamos verificar sua convergência.

De fato, seja $a_n = na^n$. Então

$$\sqrt[n]{|a_n|} = \sqrt[n]{n} \sqrt[n]{|a|^n} = \sqrt[n]{n} |a|.$$

Como $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{n} = 1$ (isso deve ser explicado!) segue que

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n|} = 1 \cdot |a| = |a|.$$

Se $|a| < 1$, concluímos que $\sum_{n \geq 1} na^n$ converge. Se $|a| > 1$, $\sum_{n \geq 1} na^n$ diverge.

Se $|a| = 1$, então $a = 1$ ou $a = -1$.

Se $a = 1$, a série se torna $\sum n$, que evidentemente diverge. Similarmente, se $a = -1$, $\sum n(-1)^n$ diverge, já que $n(-1)^n \not\rightarrow 0$.