Notas de Aula

Cálculo Diferencial e Integral II - CT
Departamento de Matemática – UFPI

Estas notas de aula foram elaboradas para apoiar a disciplina Cálculo Diferencial e Integral II - CT da Universidade Federal do Piauí. Trata-se de um material de apoio, e não de um livro didático. Algumas definições, demonstrações e exemplos não estão aqui incluídos, pois serão discutidos diretamente em sala de aula. Este material encontra-se em constante desenvolvimento e poderá ser aprimorado em futuras edições.

A versão mais atualizada deste material pode ser encontrada em: `https://vitalianoamaral.github.io`
No menu, clique em **Ensino**, depois em **Graduação** e, em seguida, em **Disciplinas Ministradas**. Localize a disciplina **Cálculo diferencial e integral II-CT** e clique no link **Notas de Aula**.

Prof. Vitaliano de Sousa Amaral
Departamento de Matemática – UFPI

15 de outubro de 2025

Sumário

Capítulo 1

Integral Imprópria

1.1 Revisão: Integral Definida

Consideramos um intervalo fechado e limitado $[a,b]$. Uma partição de $[a,b]$ é um conjunto finito de pontos de $[a,b]$, $P = \{a = x_0, x_1, \cdots, x_{n-1}, x_n = b\}$ tais que $a = x_0 < x_1 < \cdots < x_{n-1} < x_n = b$. A partição P divide o intervalo $[a,b]$ em n subintervalos $[x_0, x_1]$, $[x_1, x_2], \cdots ,[x_{n-2}, x_{n-1}]$, $[x_{n-1}, x_n]$, como podemos ver na Figura 1.1.

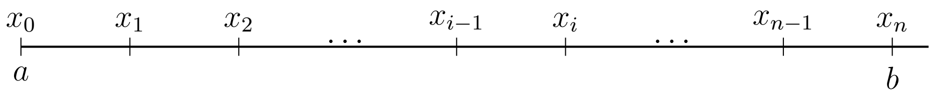

Figura 1.1

O i-ésimo subintervalo da partição P é $[x_{i-1}, x_i]$ e seu comprimento é representado por $\Delta x_i = x_i - x_{i-1}$ para $i = 1, 2, \cdots, n$.

Exemplo 1.1.1. *Uma partição do intervalo fechado* $[0, 10]$ *é o conjunto* $P = \{0, 2, 4, 6, 8, 10\}$. *Observamos que a partição* P *divide o intervalo* $[0, 10]$ *em* 5 *subintervalos* $[0, 2]$, $[2, 4]$, $[4, 6]$, $[6, 8]$ *e* $[8, 10]$. *Veja ilustração geométrica na Figura 1.2.*

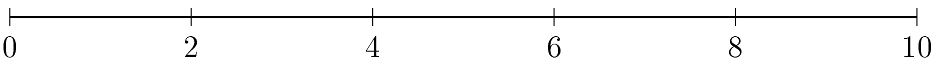

Figura 1.2

Seja uma função $f : [a,b] \to \mathbb{R}$ e em cada subintervalo $[x_{i-1}, x_i]$ escolhamos c_i, $i = 1, \cdots, n$. Denotamos por $\|P\| = \max\limits_{1 \le i \le n} \{x_i - x_{i-1}\}$.

Veja ilustração geométrica na Figura 1.3 a seguir.

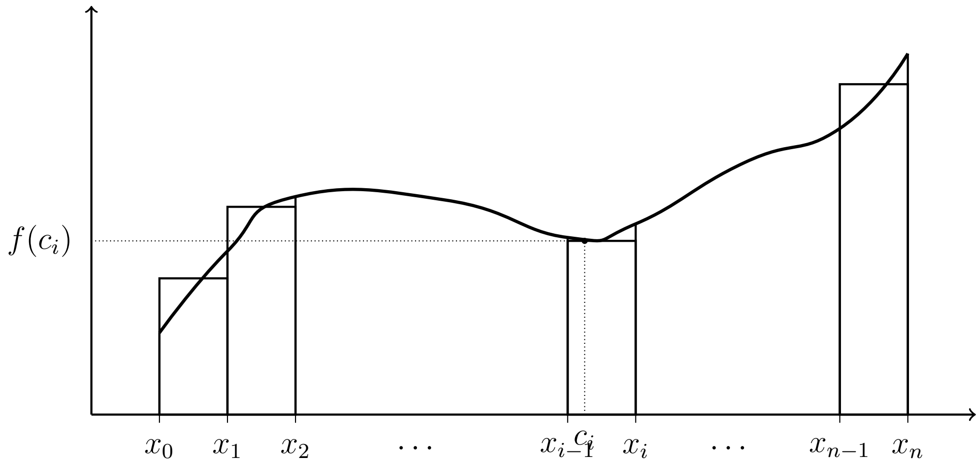

Figura 1.3

Consideremos o retângulo de base medindo $\Delta x_i = x_i - x_{i-1}$ e altura $f(c_i)$ onde $c_i \in [x_{i-1}, x_i]$ (Veja Figura 1.3).

Na ilustração geométrica, consideramos uma função positiva no intervalo $[a, b]$. Observe que a soma das áreas dos retângulos aproxima a área compreendida entre o gráfico de f e o eixo x. Alguns retângulos possuem parte de sua área acima do gráfico e outros possuem parte abaixo, de forma que a aproximação pode não ser exata quando temos um número finito de partições. No entanto, quando fazemos o comprimento de todos os subintervalos da partição tender a zero, isto é, quando tomamos infinitas partições cada vez mais finas, a soma infinita das áreas desses retângulos coincide exatamente com a área entre o gráfico de f e o eixo x.

Essa é apenas uma noção intuitiva do que chamamos de **integral definida**; a seguir apresentamos sua definição formal.

Definição 1.1.1. *Considere uma partição P e $c_i \in [x_{i-1}, x_i]$. Dizemos que f integrável em $[a, b]$ se $\lim\limits_{\|P\| \to 0} \sum\limits_{i=1}^{n} f(c_i)\Delta x_i$ existe, e denotamos por*

$$\int_a^b f(x)dx = \lim_{\|P\| \to 0} \sum_{i=1}^{n} f(c_i)\Delta x_i.$$

A seguir apresentamos as principais propriedades da integral definida.

1.1.1 Principais propriedades

Sejam f e g funções possuindo integral definida em $[a, b]$ e $k \in \mathbb{R}$ um constante. As integrais definidas possuem as seguintes propriedades:

1. $\displaystyle\int_a^b [kf(x) + g(x)]\, dx = k \int_a^b f(x)\, dx + \int_a^b g(x)\, dx.$

2. Para $c \in [a,b]$, $\displaystyle\int_a^b f(x)\,dx = \int_a^c f(x)\,dx + \int_c^b f(x)\,dx$.

3. $\displaystyle\int_a^b f(x)\,dx = -\int_b^a f(x)\,dx$.

4. Se $f(x) \geq 0$ para todo $x \in [a,b]$, então $\displaystyle\int_a^b f(x)\,dx \geq 0$.

5. Se $f(x) \leq g(x)$ para todo $x \in [a,b]$, então: $\displaystyle\int_a^b f(x)\,dx \leq \int_a^b g(x)\,dx$.

O **Teorema Fundamental do Cálculo** estabelece a conexão entre derivação e integração.

Theorem 1.1.1 (Teorema Fundamental do Cálculo)**.** *Se f é contínua em $[a,b]$ e F é uma primitiva de f (isto é, $F'(x) = f(x)$), então:*

$$\int_a^b f(x)\,dx = F(b) - F(a).$$

Este teorema fornece um método prático para calcular integrais definidas, evitando o uso direto da Soma de Riemann.

Outras propriedades serão apresentadas na seção sobre Integrais Impróprias.

1.2 Integrais Impróprias

Na definição de integral definida, consideramos a função contínua em um intervalo fechado $[a,b]$. Agora, vamos estender essa definição para duas situações importantes:

1. Quando a função está definida em intervalos infinitos, como:

$$[a,+\infty), \quad (-\infty,b] \quad \text{ou} \quad (-\infty,+\infty).$$

2. Quando a função apresenta descontinuidade em algum ponto do intervalo de integração.

Nesses casos especiais usamos as **integrais impróprias**.

1.2.1 Integrais em Intervalos Infinitos

Para motivar a definição, vamos considerar um exemplo.

Exemplo 1.2.1. *Calcular a área da região R limitada pelo gráfico de $f(x) = \dfrac{1}{x^2}$, com $x \geq 1$, e o eixo x.*

Primeiro, observamos que a região é ilimitada *no sentido horizontal. Se definirmos R_b como a parte da região R entre $x = 1$ e $x = b$ ($b > 1$), temos:*

$$A(R_b) = \int_1^b \frac{1}{x^2}\,dx = -\frac{1}{x}\Big|_1^b = 1 - \frac{1}{b}.$$

Ver Figura 1.4.

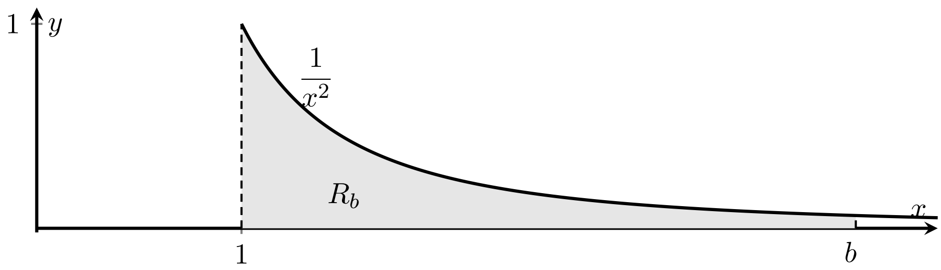

Figura 1.4: Área R_b sob $y = \frac{1}{x^2}$ de $x = 1$ a $x = b$.

À medida que $b \to +\infty$, essa área se aproxima da área total da região R:

$$A(R) = \lim_{b \to +\infty} A(R_b) = \lim_{b \to +\infty} \left(1 - \frac{1}{b}\right) = 1.$$

Ver Figura 1.5.

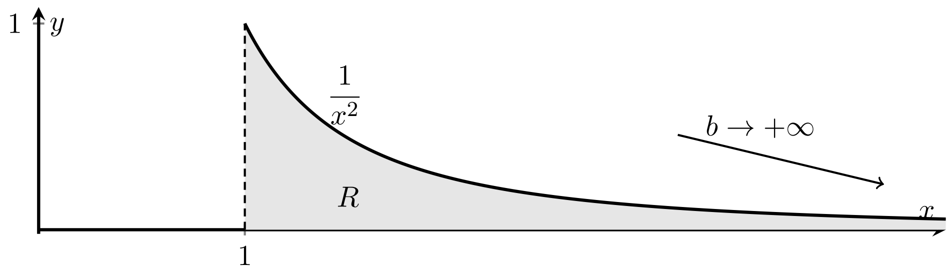

Figura 1.5: Limite $b \to +\infty$ resultando em $A(R) = 1$.

Esse exemplo motiva a seguinte definição.

Definição 1.2.1. *Seja f uma função integrável em $[a, +\infty)$. Definimos:*

$$\int_a^{+\infty} f(x)\,dx := \lim_{b \to +\infty} \int_a^b f(x)\,dx.$$

Se f é uma função integrável em $(-\infty, b]$. Definimos:

$$\int_{-\infty}^{b} f(x)\,dx := \lim_{a \to -\infty} \int_a^b f(x)\,dx.$$

Se f é uma função integrável em $\mathbb{R}$. Definimos:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x)\,dx := \lim_{a\to-\infty}\int_a^0 f(x)\,dx + \lim_{b\to+\infty}\int_0^b f(x)\,dx.$$

Se o limite existir, dizemos que a integral imprópria **converge**. Caso contrário, dizemos que ela **diverge**.

1.2.2 Integrais com Descontinuidade

Agora, consideremos o caso em que a função apresenta descontinuidade em um ponto do intervalo de integração.

Exemplo 1.2.2. *Calcular a área sob o gráfico de $f(x) = \frac{1}{\sqrt{x}}$ no intervalo $(0, 9]$.*

Como a função não está definida em $x = 0$, definimos:

$$A(R_\varepsilon) = \int_\varepsilon^9 \frac{1}{\sqrt{x}}\,dx = 2\sqrt{x}\Big|_\varepsilon^9 = 6 - 2\sqrt{\varepsilon}.$$

Quando $\varepsilon \to 0^+$, obtemos:

$$A(R) = \lim_{\varepsilon\to0^+} A(R_\varepsilon) = 6.$$

De forma geral:

Definição 1.2.2. *Se f for integrável em $(a, b]$, definimos:*

$$\int_a^b f(x)\,dx := \lim_{\varepsilon\to a^+}\int_\varepsilon^b f(x)\,dx.$$

Se f for integrável em $[a, b)$:

$$\int_a^b f(x)\,dx := \lim_{\varepsilon\to b^-}\int_a^\varepsilon f(x)\,dx.$$

Se f tiver descontinuidade em $c \in (a, b)$:

$$\int_a^b f(x)\,dx := \lim_{\varepsilon\to c^-}\int_a^\varepsilon f(x)\,dx + \lim_{\varepsilon\to c^+}\int_\varepsilon^b f(x)\,dx.$$

1.3 Critérios de convergência

Teorema 1.3.1 (Critério de comparação)**.** *Sejam f e g funções integráveis em $[a, t]$, para todo $t > a$, tais que*

$$0 \le f(x) \le g(x), \quad \forall x \ge a.$$

Então, valem as seguintes propriedades:

a) Se $\displaystyle\int_a^{+\infty} g(x)\,dx$ *converge, então* $\displaystyle\int_a^{+\infty} f(x)\,dx$ *também converge.*

b) Se $\displaystyle\int_a^{+\infty} f(x)\,dx$ *diverge, então* $\displaystyle\int_a^{+\infty} g(x)\,dx$ *também diverge.*

Exemplo 1.3.1. *Verifique que a integral imprópria*

$$\int_0^{+\infty} e^{-x}\sin^2 x\,dx$$

é convergente.

Solução. Para $x \geq 0$ vale $0 \leq \sin^2 x \leq 1$, portanto

$$0 \leq e^{-x}\sin^2 x \leq e^{-x}.$$

Agora,

$$\int_0^{+\infty} e^{-x}\,dx := \lim_{t\to+\infty}\int_0^t e^{-x}\,dx = \lim_{t\to+\infty}\big[-e^{-x}\big]_0^t = \lim_{t\to+\infty}\big(1-e^{-t}\big) = 1.$$

Assim, $\displaystyle\int_0^{+\infty} e^{-x}\,dx$ é convergente. Pelo critério de comparação, segue que

$$\int_0^{+\infty} e^{-x}\sin^2 x\,dx \text{ é convergente e } 0 \leq \int_0^{+\infty} e^{-x}\sin^2 x\,dx \leq 1.$$

Proposição 1.3.1. *Seja f integrável em $[a,t]$, para todo $t \geq a$. Se*

$$\int_a^{+\infty} |f(x)|\,dx \quad \textit{é convergente},$$

então

$$\int_a^{+\infty} f(x)\,dx \quad \textit{também é convergente.}$$

Demonstração. Para todo $x \geq a$ vale

$$0 \leq |f(x)| + f(x) \leq 2|f(x)|.$$

Como $\int_a^{+\infty} |f(x)|\,dx$ é convergente, pelo critério de comparação segue que

$$\int_a^{+\infty} \big(|f(x)| + f(x)\big)\,dx$$

também converge. Além disso, para todo $t > a$, temos

$$\int_a^t f(x)\,dx = \int_a^t \big(|f(x)| + f(x)\big)\,dx - \int_a^t |f(x)|\,dx.$$

Ora, como os dois integrais do lado direito convergem quando $t \to +\infty$, conclui-se que

$$\int_a^{+\infty} f(x)\,dx$$

também é convergente. □

Exemplo 1.3.2. *Determine se a integral imprópria*

$$\int_0^{+\infty} e^{-x} \sin^3 x \, dx$$

é convergente ou divergente. Justifique.

Solução. Para todo $x \geq 0$, tem-se

$$0 \leq \left| e^{-x} \sin^3 x \right| \leq e^{-x}.$$

Como $\displaystyle\int_0^{+\infty} e^{-x} \, dx$ é convergente, pelo critério de comparação segue que

$$\int_0^{+\infty} \left| e^{-x} \sin^3 x \right| dx$$

também converge. Aplicando a Proposição 1.3.1, conclui-se que

$$\int_0^{+\infty} e^{-x} \sin^3 x \, dx$$

é convergente. □

Capítulo 2

Sequência e série de números reais

2.1 Sequências de Números Reais

Definição 2.1.1. *Uma sequência de números reais é uma função* $f : \mathbb{N} \to \mathbb{R}$, *onde* $f(n) = a_n$ *para cada* $n \in \mathbb{N}$.

Notação 2.1.1. *A sequência* $\{a_1, a_2, \cdots, a_n, \cdots\}$ *é também denotada por* $\{a_n\}_{n\in\mathbb{N}}$ *ou* $\{a_n\}_{n=1}^{+\infty}$.

Exemplo 2.1.1. *A função* $f(n) = (-1)^n$ *determina a sequência* $\{1, -1, 1, -1, \cdots, (-1)^n, \cdots\}$.

Definição 2.1.2. *Uma subsequência de uma sequência* $f : \mathbb{N} \to \mathbb{R}$ *é uma restrição* $f_{\mathbb{N}'}$ *de* f, $f_{\mathbb{N}'} : \mathbb{N} \to \mathbb{R}$, *onde* $\mathbb{N}' \subset \mathbb{N}$.

Definição 2.1.3. *Dizemos que uma sequência de números reais* $\{a_n\}$ *é:*

a) *decrescente se* $a_n > a_{n+1}$ *para todo* $n \in \mathbb{N}$;

b) *crescente se* $a_n < a_{n+1}$ *para todo* $n \in \mathbb{N}$;

c) *não-decrescente se* $a_n \leq a_{n+1}$ *para todo* $n \in \mathbb{N}$;

d) *não-crescente se* $a_n \geq a_{n+1}$ *para todo* $n \in \mathbb{N}$.

Definição 2.1.4. *Uma sequência que satisfaz um dos itens da Definição 2.1.3 é dita* ***monótona***.

Exemplo 2.1.2. *As sequências* $\{\frac{1}{n}\}$, $\{n+1\}$ *e* $\{7-n\}$ *são monótonas. Verifique.*

Definição 2.1.5. *Dizemos que uma sequência de números reais* $\{a_n\}$ *é:*

a) *limitada superiormente se existe* $M \in \mathbb{R}$ *tal que* $a_n \leq M$ *para todo* $n \in \mathbb{N}$;

b) *limitada inferiormente se existe* $m \in \mathbb{R}$ *tal que* $a_n \geq m$ *para todo* $n \in \mathbb{N}$;

c) *limitada se for limitada superiormente e inferiormente.*

2.1.1 Exercícios

Exercício 2.1.1. *Mostre que as sequências abaixo são limitadas e monótonas. Descreva o tipo de monotonicidade de cada uma delas.*

a) $x_n = \dfrac{2n-1}{n}$;

b) $x_n = 1 + \dfrac{1}{3n}$;

c) $x_n = \dfrac{1}{n^2}$;

d) $x_n = \dfrac{n}{n+1}$;

e) $x_n = \dfrac{n^2+1}{3n^2}$.

Exercício 2.1.2. *Para cada uma das sequências do exercício anterior, exiba três subsequências.*

2.1.2 Limite de Sequências

Definição 2.1.6. *Dizemos que um número real L é limite de uma sequência $\{a_n\}$ se, dado $\epsilon > 0$ arbitrário, existe $N \in \mathbb{N}$ tal que*

$$|a_n - L| < \epsilon, \quad \forall\, n \geq N. \tag{2.1}$$

Denotamos: $\lim\limits_{n\to+\infty} a_n = L$.

Se a sequência $\{a_n\}$ possui limite, dizemos que a sequência é **convergente**. Caso contrário, dizemos que é **divergente**.

Definição 2.1.7. *Dizemos que $\lim\limits_{n\to+\infty} a_n = +\infty$ se, para cada $M > 0$, existir $N \in \mathbb{N}$ tal que $a_n > M$ para todo $n \geq N$. Neste caso, dizemos que a sequência diverge para $+\infty$.*

Teorema 2.1.1. *Sejam $\{a_n\}$ e $\{b_n\}$ duas sequências convergentes. Então:*

a) $\lim\limits_{n\to+\infty}(a_n + b_n) = \lim\limits_{n\to+\infty} a_n + \lim\limits_{n\to+\infty} b_n$;

b) $\lim\limits_{n\to+\infty} c = c$, *quando* $a_n = c$ *é constante;*

c) $\lim\limits_{n\to+\infty}(a_n \cdot b_n) = \lim\limits_{n\to+\infty} a_n \cdot \lim\limits_{n\to+\infty} b_n$;

d) $\lim\limits_{n\to+\infty} \dfrac{a_n}{b_n} = \dfrac{\lim_{n\to+\infty} a_n}{\lim_{n\to+\infty} b_n}$, *se* $\lim_{n\to+\infty} b_n \neq 0$.

Teorema 2.1.2 (Teorema do Confronto). *Se as sequências $\{a_n\}$, $\{b_n\}$ e $\{c_n\}$ são tais que $a_n \leq b_n \leq c_n$ para todo $n > n_0$ e*

$$\lim_{n\to+\infty} a_n = \lim_{n\to+\infty} c_n = L,$$

então $\lim\limits_{n\to+\infty} b_n = L$.

Exemplo 2.1.3. *Prove que $\lim\limits_{n\to+\infty} \dfrac{\cos(n)}{n^2+1} = 0$.*

Uma das sequências mais importantes no mundo matemático é a sequência de Fibonacci, definida por

$$F_0 = 1, \quad F_1 = 1 \quad \text{e} \quad F_n = F_{n-1} + F_{n-2}, \quad \forall\, n \geq 2.$$

Proposição 2.1.1. *Uma sequência $\{a_n\}_{n\in\mathbb{N}}$ converge para $a \in \mathbb{R}$ se, e somente se, toda subsequência de $\{a_n\}_{n\in\mathbb{N}}$ converge para a.*

Proposição 2.1.2. *Toda sequência convergente é limitada.*

Teorema 2.1.3. *Toda sequência monótona e limitada é convergente.*

Teorema 2.1.4 (Teorema de Bolzano-Weierstrass). *Toda sequência limitada possui pelo menos uma subsequência convergente.*

Exercício 2.1.3. *Mostre que a recíproca do Teorema 2.1.3 não é verdadeira.*

2.2 Séries de Números Reais

Uma série de números reais é uma soma infinita de termos reais, escrita da seguinte forma:

$$a_1 + a_2 + a_3 + \cdots + a_n + \cdots = \sum_{n=1}^{\infty} a_n.$$

Nesta expressão, cada a_n representa o n-ésimo termo da sequência associada à série.

Dada uma série $\sum\limits_{n=1}^{\infty} a_n$, considera-se a sequência (S_n) definida por:

$$S_1 = a_1, \qquad S_2 = a_1+a_2, \qquad S_3 = a_1+a_2+a_3, \qquad S_n = a_1+a_2+a_3+\cdots+a_n = \sum_{k=1}^{n} a_k.$$

A sequência (S_n) é chamada de **sequência das somas parciais** da série.

Se o limite $\lim\limits_{n\to\infty} S_n$ existe e é um número real S, dizemos que a série $\sum\limits_{n=1}^{\infty} a_n$ **converge** e sua soma é S.

$$\sum_{n=1}^{\infty} a_n = S \quad \text{se, e somente se,} \quad \lim_{n\to\infty} S_n = S.$$

Se o limite $\lim_{n\to\infty} S_n$ não existe, dizemos que a série **diverge**.

Exemplo 2.2.1. *A série* $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2^n}$ *converge.*

Solução: Temos:

$$S_n = \frac{1}{2} + \frac{1}{4} + \frac{1}{8} + \cdots + \frac{1}{2^n}.$$

Essa é uma série geométrica de razão $r = \frac{1}{2}$*, cujo termo geral é* $a_n = \frac{1}{2^n}$.

A soma parcial é:

$$S_n = a_1\,\frac{1-r^n}{1-r} = \frac{\frac{1}{2}(1-(\frac{1}{2})^n)}{1-\frac{1}{2}} = 1 - \frac{1}{2^n}.$$

Assim,

$$\lim_{n\to\infty} S_n = 1.$$

Logo, a série converge e sua soma é $S = 1$.

De modo geral, uma série geométrica

$$\sum_{n=0}^{\infty} a_1 r^n$$

converge se e somente se $|r| < 1$, e sua soma é dada por:

$$S = \frac{a_1}{1-r}.$$

Fica como exercício para o leitor fazer a demonstração.

Exemplo 2.2.2. *A série* $\sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n$ *diverge.*

Solução: Temos:

$S_1 = -1, \quad S_2 = -1+1 = 0, \quad S_3 = -1+1-1 = -1, \quad S_4 = -1+1-1+1 = 0,$ *e assim por diante.*

Portanto, a sequência das somas parciais (S_n) *é:*

$$S_n = \begin{cases} -1, & \text{se } n \text{ for ímpar,} \\ 0, & \text{se } n \text{ for par.} \end{cases}$$

Logo, (S_n) *não converge (pois oscila entre* -1 *e* 0*), e a série*

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

é divergente.

Operações com Séries Convergentes

1. Se $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ converge e $c \in \mathbb{R}$, então a série $\sum_{n=1}^{\infty} ca_n$ também converge, e

$$\sum_{n=1}^{\infty} ca_n = c\sum_{n=1}^{\infty} a_n.$$

Demonstração: Por hipótese, a sequência das somas parciais (S_n) converge, ou seja, $S_n = a_1 + a_2 + \cdots + a_n \to S$. Então,

$$cS_n = c(a_1 + a_2 + \cdots + a_n) = ca_1 + ca_2 + \cdots + ca_n,$$

e a sequência (cS_n) também converge. Assim,

$$\sum_{n=1}^{\infty} ca_n = c\sum_{n=1}^{\infty} a_n.$$

2. Se $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ e $\sum_{n=1}^{\infty} b_n$ convergem, então

$$\sum_{n=1}^{\infty}(a_n + b_n)$$

também converge, e vale:

$$\sum_{n=1}^{\infty}(a_n + b_n) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n + \sum_{n=1}^{\infty} b_n.$$

Demonstração: Como $S_n = a_1 + a_2 + \cdots + a_n$ e $T_n = b_1 + b_2 + \cdots + b_n$, temos

$$S_n + T_n = (a_1 + b_1) + (a_2 + b_2) + \cdots + (a_n + b_n).$$

Se $S_n \to S$ e $T_n \to T$, então $S_n + T_n \to S + T$, logo a série também converge.

Observação 2.2.1. *Se $\sum a_n$ diverge e $c \in \mathbb{R}$, com $c \neq 0$, então $\sum ca_n$ também diverge.*

Observação 2.2.2. *Se $\sum a_n$ converge e $\sum b_n$ diverge, então $\sum(a_n + b_n)$ também diverge.*

2.2.1 Testes de Convergência de Séries

A seguir, serão enunciados alguns testes e teoremas que são muito úteis para determinar se uma série converge ou não.

Teorema 2.2.1. *Se* $\displaystyle\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ *converge, então* $\displaystyle\lim_{n\to\infty} a_n = 0$. *O inverso, entretanto, não é verdadeiro: se* $\lim_{n\to\infty} a_n \neq 0$, *então a série diverge.*

Demonstração: Seja $S_n = a_1 + a_2 + \cdots + a_n$ a sequência das somas parciais. Temos:

$$a_n = S_n - S_{n-1}.$$

Como S_n converge, existem $S = \displaystyle\lim_{n\to\infty} S_n$ e $\displaystyle\lim_{n\to\infty} S_{n-1} = S$. Logo,

$$\lim_{n\to\infty} a_n = \lim_{n\to\infty} (S_n - S_{n-1}) = S - S = 0.$$

Portanto, se a série converge, então $\displaystyle\lim_{n\to\infty} a_n = 0$. Mas o contrário não é garantido: o fato de $\displaystyle\lim_{n\to\infty} a_n = 0$ não assegura a convergência da série.

Exemplo 2.2.3. *A série* $\displaystyle\sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n}{2n+1}$ *diverge, pois*

$$\lim_{n\to\infty} \frac{2n}{2n+1} = 1 \neq 0.$$

Teste da Comparação

Exemplo 2.2.4. *Sejam as sequências* (a_n) *e* (b_n) *tais que* $0 \leq a_n \leq b_n$, *para todo* $n \in \mathbb{N}$. *Então:*

(a) Se $\displaystyle\sum_{n=1}^{\infty} b_n$ *converge, então* $\displaystyle\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ *também converge.*

(b) Se $\displaystyle\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ *diverge, então* $\displaystyle\sum_{n=1}^{\infty} b_n$ *também diverge.*

Demonstração: (a) Por hipótese, a sequência

$$b_1,\ b_1 + b_2,\ b_1 + b_2 + b_3,\ \ldots$$

é convergente, logo limitada. Por outro lado, como $a_n \geq 0$ e $a_n \leq b_n$, temos:

$$a_1 \leq b_1, \quad a_1 + a_2 \leq b_1 + b_2, \quad a_1 + a_2 + \cdots + a_n \leq b_1 + b_2 + \cdots + b_n.$$

Portanto, a sequência $S_n = a_1 + a_2 + \cdots + a_n$ também é limitada e crescente. Como toda sequência crescente e limitada é convergente, concluímos que $\displaystyle\sum_{n=1}^{+\infty} a_n$ converge.

(b) O item (b) é a contrapositiva de (a).

Exemplo 2.2.5. *A série* $\displaystyle\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2^n+n}$ *converge.*

Solução: Como $2^n + n > 2^n$ para todo n, temos:

$$0 < \frac{1}{2^n+n} < \frac{1}{2^n}.$$

Sabemos que $\displaystyle\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2^n}$ é uma série convergente. Logo, pelo teste da comparação, a série $\displaystyle\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2^n+n}$ também converge.

Teste da Integral

Teorema 2.2.2. *Seja f uma função contínua, positiva e decrescente para todo $x \geq 1$. Então, a série*

$$\sum_{n=1}^{\infty} f(n)$$

converge se, e somente se, a integral imprópria

$$\int_1^{\infty} f(x)\,dx$$

converge.

Exemplo 2.2.6. *Considere a série*

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^p}, \qquad p \in \mathbb{R}.$$

Esta série é chamada de ***série*** *p. Temos:*

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^p} \text{ converge se, e somente se, } p > 1.$$

De fato, para $f(x) = \dfrac{1}{x^p}$, temos

$$\int_1^{\infty} \frac{1}{x^p}\,dx = \begin{cases} \dfrac{1}{p-1}, & \text{se } p > 1, \\ \infty, & \text{se } p \leq 1. \end{cases}$$

Conclusão: *A série* $\displaystyle\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^p}$ *converge se $p > 1$ e diverge se $p \leq 1$.*

Séries Alternadas

Uma série alternada é uma série da forma:

$$\sum_{n=1}^{\infty}(-1)^n a_n \quad \text{ou} \quad \sum_{n=1}^{\infty}(-1)^{n+1} a_n,$$

onde $a_n > 0$ para todo $n \in \mathbb{N}$.

Exemplo 2.2.7. *As séries*

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

são séries alternadas.

Teste de Leibniz.

Teorema 2.2.3. *Se $a_1 \geq a_2 \geq a_3 \geq \cdots \geq a_n \geq \cdots$ e $\lim_{n\to\infty} a_n = 0$, então a série alternada*

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

converge.

Exemplo 2.2.8. *A série*

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

converge.

Solução: De fato, $\frac{1}{n}$ é decrescente e $\lim_{n\to\infty}\frac{1}{n} = 0$. Assim, o Teste de Leibniz se aplica.

Exemplo 10.9.3. A série

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

também converge.

Solução: De fato, $\frac{1}{\sqrt{n}}$ é decrescente e $\lim_{n\to\infty}\frac{1}{\sqrt{n}} = 0$. Logo, pelo Teste de Leibniz, a série converge.

Convergência Absoluta

Uma série $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ converge absolutamente se $\sum_{n=1}^{\infty} |a_n|$ converge.

Exemplo 2.2.9. *A série*

$$\sum_{n=1}^{\infty}(-1)^{n+1}\frac{1}{n^2}$$

converge absolutamente, pois a série

$$\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{n^2}$$

converge.

Teorema 2.2.4. *Se* $\sum_{n=1}^{\infty}|a_n|$ *converge, então* $\sum_{n=1}^{\infty}a_n$ *também converge.*

Demonstração: Como $-|a_n| \leq a_n \leq |a_n|$ para todo $n \in \mathbb{N}$, somando termo a termo, obtemos:

$$0 \leq a_n + |a_n| \leq 2|a_n|, \qquad \forall n \in \mathbb{N}.$$

Portanto, a série $\sum_{n=1}^{\infty}(a_n + |a_n|)$ converge por comparação com $\sum_{n=1}^{\infty} 2|a_n|$. Mas:

$$\sum_{n=1}^{\infty}a_n = \frac{1}{2}\left[\sum_{n=1}^{\infty}(a_n + |a_n|) - \sum_{n=1}^{\infty}(|a_n| - a_n)\right],$$

e ambas as séries do lado direito convergem. Logo, $\sum_{n=1}^{\infty}a_n$ também converge.

A recíproca desse fato, entretanto, não é verdadeira: há séries que convergem, mas não convergem absolutamente.

Exemplo 2.2.10. *A série*

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

converge (série harmônica alternada), mas a série

$$\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{n}$$

diverge. Logo, a série $\sum_{n=1}^{\infty}(-1)^{n+1}\frac{1}{n}$ *é condicionalmente convergente.*

Teste da Razão

Suponha que $a_n \neq 0$ para todo $n \in \mathbb{N}$ e que

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

Então:

(i) Se $q < 1$, a série $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ converge absolutamente.

(ii) Se $q > 1$, a série $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ diverge.

(iii) Se $q = 1$, nada podemos concluir.

Exemplo 2.2.11. *A série*

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

converge absolutamente.

Solução: De fato,

$$q = \lim_{n\to\infty}\left|\frac{a_{n+1}}{a_n}\right| = \lim_{n\to\infty}\frac{1/(n+1)!}{1/n!} = \lim_{n\to\infty}\frac{n!}{(n+1)!} = \lim_{n\to\infty}\frac{1}{n+1} = 0 < 1.$$

Portanto, a série converge absolutamente.

Exemplo 2.2.12. *A série*

$$\sum_{n=1}^{\infty}(-1)^n\frac{n^2}{(n+1)^2}$$

diverge.

Solução: De fato,

$$q = \lim_{n\to\infty}\left|\frac{a_{n+1}}{a_n}\right| = \lim_{n\to\infty}\frac{(n+1)^2}{(n+2)^2}\cdot\frac{(n+1)^2}{n^2} = \lim_{n\to\infty}\left(\frac{n+1}{n}\right)^2 = 1.$$

Logo, como $q = 1$, o teste é inconclusivo. Mas como $\lim_{n\to\infty} a_n = 1 \neq 0$, a série diverge.

Exemplo 2.2.13. *Considere as séries*

$$\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{n} \quad e \quad \sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{n^2}.$$

Solução: Para ambas, temos $q = 1$. Neste caso, o teste da razão não fornece conclusão: sabemos, no entanto, que $\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{n}$ diverge e $\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{n^2}$ converge.

Exemplo 2.2.14. *Calcule* $\lim_{n\to\infty} a_n$*, onde*

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

Solução: Usando a decomposição em frações parciais:

$$a_n = \frac{1}{n} - \frac{1}{n+1},$$

temos:

$$S_n = \left(1 - \frac{1}{2}\right) + \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{3}\right) + \cdots + \left(\frac{1}{n} - \frac{1}{n+1}\right).$$

Observando que há cancelamentos sucessivos, resta:

$$S_n = 1 - \frac{1}{n+1}.$$

Portanto,

$$\lim_{n\to\infty} S_n = 1.$$

Assim, $\displaystyle\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n(n+1)} = 1.$

2.3 Séries de Potências

Uma série de potência é uma soma infinita da forma

$$\sum_{n=0}^{\infty} a_n (x-c)^n = a_0 + a_1(x-c) + a_2(x-c)^2 + \cdots$$

O número c é dito o *centro* da série. Se $c = 0$, então

$$\sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \cdots$$

Vejamos alguns exemplos:

Exemplo 2.3.1.

$$\sum_{n=0}^{\infty} x^n = 1 + x + x^2 + \cdots$$

Exemplo 2.3.2.

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{x^n}{n} = x + \frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{3} + \cdots$$

Exemplo 2.3.3.

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{x^n}{n^2} = x + \frac{x^2}{2^2} + \frac{x^3}{3^2} + \cdots$$

Exemplo 2.3.4.

$$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^n}{n!} = 1 + x + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \cdots$$

Exemplo 2.3.5.

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

Exemplo 2.3.6.

$$\sum_{n=0}^{\infty} n!\,x^n = 1 + x + 2!\,x^2 + 3!\,x^3 + \cdots$$

O domínio de convergência de uma série de potências é o conjunto dos números x para os quais a série converge.

Exemplo 2.3.7. *Para a série* $\sum\limits_{n=0}^{\infty} x^n$ *domínio de convergência:*

$$-1 < x < 1.$$

Solução: De fato, usando o teste da Razão, temos que

$$\sum_{n=0}^{\infty} x^n$$

converge se $|x| < 1$. Se $x = 1$, temos $\sum\limits_{n=0}^{\infty} 1$, a qual diverge. Se $x = -1$, temos $\sum\limits_{n=0}^{\infty} (-1)^n$, a qual também diverge.

Exemplo 2.3.8. *A série* $\sum\limits_{n=1}^{\infty} \frac{x^n}{n}$ *possui domínio de convergência:*

$$-1 \leq x < 1.$$

Exemplo 2.3.9. *A série* $\sum\limits_{n=1}^{\infty} \frac{x^n}{n^2}$ *possui domínio de convergência:*

$$-1 \leq x \leq 1.$$

Exemplo 2.3.10. *A série* $\sum\limits_{n=0}^{\infty} \frac{x^n}{n!}$ *possui domínio de convergência:*

$$-\infty < x < \infty.$$

Exemplo 2.3.11.

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(x-1)^n}{n\,2^n}$$

possui domínio de convergência:

$$-1 < x < 3.$$

Solução: De fato,

$$\lim_{n\to\infty}\left|\frac{(x-1)^{n+1}}{(n+1)2^{n+1}}\cdot\frac{n2^n}{(x-1)^n}\right| = \lim_{n\to\infty}\left|\frac{x-1}{2}\cdot\frac{n}{n+1}\right| = \frac{|x-1|}{2}.$$

Pelo teste da Razão, temos que a série dada converge se $\frac{|x-1|}{2} < 1$, isto é:

$$-1 < x < 3.$$

Para $x = -1$, temos

$$\sum_{n=1}^{\infty}\frac{(-2)^n}{n2^n} = \sum_{n=1}^{\infty}\frac{(-1)^n}{n},$$

que converge, pelo teste de Leibniz.

Para $x = 3$, temos

$$\sum_{n=1}^{\infty}\frac{2^n}{n2^n} = \sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{n},$$

a qual diverge. Portanto, o domínio de convergência da série

$$\sum_{n=1}^{\infty}\frac{(x-1)^n}{n2^n}$$

é $-1 \le x < 3$.

O **intervalo de convergência** de uma série de potência é o intervalo aberto que resulta do domínio de convergência ao suprimir-se os extremos. Desta forma, nos exemplos anteriores temos os seguintes intervalos de convergência.

Exemplo 2.3.12. $\displaystyle\sum_{n=0}^{\infty} x^n$ *intervalo de convergência é:*

$$-1 < x < 1.$$

Exemplo 2.3.13. $\displaystyle\sum_{n=1}^{\infty}\frac{x^n}{n}$ *intervalo de convergência é:*

$$-1 < x < 1.$$

Exemplo 2.3.14. $\displaystyle\sum_{n=1}^{\infty}\frac{x^n}{n^2}$ *intervalo de convergência é:*

$$-1 < x < 1.$$

Exemplo 2.3.15. $\displaystyle\sum_{n=0}^{\infty}\frac{x^n}{n!}$ *intervalo de convergência é:*

$$\mathbb{R}.$$

Exemplo 2.3.16. $\displaystyle\sum_{n=1}^{\infty}\frac{(x-1)^n}{n2^n}$ *intervalo de convergência é:*

$$-1 < x < 3.$$

2.3.1 Propriedades das Séries de Potências

Uma função real $f(x)$ é dita desenvolvível em série de potências no intervalo aberto $(c-r,\, c+r)$ se existem constantes $a_0, a_1, a_2, \ldots, a_n, \ldots$ reais tais que

$$f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n (x-c)^n.$$

Exemplo 2.3.17. *A função $f(x) = \dfrac{1}{1-x}$ é desenvolvível em série de potências no intervalo aberto $-1 < x < 1$, uma vez que*

$$\frac{1}{1-x} = \sum_{n=0}^{\infty} x^n, \quad se \ -1 < x < 1.$$

De fato, como:

$$1 + x + x^2 + \cdots + x^{n-1} = \frac{1-x^n}{1-x},$$

tomando-se o limite em $n \to \infty$, resulta que

$$\frac{1}{1-x} = \sum_{n=1}^{\infty} x^{n-1} = \sum_{n=0}^{\infty} x^n.$$

Suponha que

$$g(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n (x-c)^n$$

em $c - r < x < c + r$. Então:

1. $g'(x) = \displaystyle\sum_{n=1}^{\infty} n a_n (x-c)^{n-1}$;
2. $\displaystyle\int_0^x g(t)\, dt = \sum_{n=0}^{\infty} a_n \frac{(x-c)^{n+1}}{n+1}$ no mesmo intervalo.

A partir destas propriedades podemos obter novos desenvolvimentos a partir de um desenvolvimento dado.

Exemplo 2.3.18.

$$\frac{1}{1-x} = 1 + x + x^2 + x^3 + \cdots, \quad se\ |x| < 1.$$

Substituindo x por $-t$, obtém-se:

$$\frac{1}{1+t} = 1 - t + t^2 - t^3 + \cdots, \quad se\ |t| < 1.$$

E agora substituindo t por t^2, tem-se:

$$\frac{1}{1+t^2} = 1 - t^2 + t^4 - t^6 + \cdots, \quad se\ |t| < 1.$$

Agora, integrando (a) de 0 até x, temos:

$$\ln(1+x) = \int_0^x \frac{1}{1+t}\,dt = x - \frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{3} - \cdots, \quad se\ |x| < 1.$$

Ou seja,

$$\ln(1+x) = \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{x^n}{n}, \qquad |x| < 1.$$

Além disso, foi provado que a série $\displaystyle\sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{1}{n}$ *converge, pelo Teste de Leibniz. Donde se tem a igualdade:*

$$\ln(1+x) = \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{x^n}{n}, \quad se\ -1 < x \leq 1.$$

Portanto, temos:

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

Agora, integrando (b) de 0 a x, temos:

$$\arctan x = \int_0^x \frac{1}{1+t^2}\,dt = x - \frac{x^3}{3} + \frac{x^5}{5} - \cdots, \quad se\ |x| < 1,$$

ou ainda,

$$\arctan x = \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{x^{2n-1}}{2n-1}, \qquad |x| < 1.$$

Porém, usando o critério de Leibniz, pode-se provar que a série

$$\sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{1}{2n-1}$$

converge. Logo, temos:

$$\arctan x = \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{x^{2n-1}}{2n-1}, \qquad -1 < x \leq 1.$$

Assim tem sentido calcular-se:

$$\frac{\pi}{4} = \arctan 1 = 1 - \frac{1}{3} + \frac{1}{5} - \cdots = \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{1}{2n-1}.$$

2.3.2 Séries de Taylor

Quando uma função real $f(x)$ é desenvolvível em séries de potências, isto é, quando

$$f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n (x-c)^n, \quad c-r < x < c+r,$$

temos que

$$f'(x) = \sum_{n=1}^{\infty} n a_n (x-c)^{n-1}, \quad c-r < x < c+r,$$

$$f''(x) = \sum_{n=2}^{\infty} n(n-1) a_n (x-c)^{n-2}, \quad c-r < x < c+r,$$

$$f^{(m)}(x) = \sum_{n=m}^{\infty} n(n-1)(n-2)\cdots(n-m+1) a_n (x-c)^{n-m}, \quad c-r < x < c+r.$$

E, assim sucessivamente. De tal modo que:

$$f(c) = a_0, \quad f'(c) = 1a_1, \quad f''(c) = 2\cdot 1a_2, \quad f'''(c) = 3\cdot 2\cdot 1a_3, \ldots$$

$$f^{(n)}(c) = n(n-1)(n-2)\cdots 2\cdot 1a_n = n!a_n.$$

Logo,

$$a_n = \frac{f^{(n)}(c)}{n!}, \qquad \forall n \in \mathbb{N}.$$

Concluímos que, quando f é desenvolvível em série de potência, então f é infinitamente derivável e

$$f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{f^{(n)}(c)}{n!}(x-c)^n. \tag{2.2}$$

O desenvolvimento (1) é chamado desenvolvimento de Taylor de f, e a série

$$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{f^{(n)}(c)}{n!}(x-c)^n$$

é chamada **Série de Taylor** de f.

Em particular, se $c = 0$ em (1), temos

$$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{f^{(n)}(0)}{n!}x^n,$$

que é chamado **desenvolvimento de Maclaurin** de f.

2.4 Exercícios

Exercício 2.4.1. *Mostre que a série* $\sum_{n=1}^{+\infty} ln\left(1+\frac{1}{a^{n-1}}\right)$ *é convergente se* $a > 1$.

Exercício 2.4.2. *As seguintes séries diverge ou converge? Justifique.*

a) $\sum_{k=1}^{+\infty} k\, sen\frac{1}{k}$; *b)* $\sum_{k=1}^{+\infty} \frac{e^k}{k}$; *c)* $\sum_{k=1}^{+\infty} \frac{e^k}{12k^5+k^3-176576k^2}$; *d)* $\sum_{k=1}^{+\infty} \frac{e^{3k}}{k^3+e^{2k}}$.

Exercício 2.4.3. *Mostre que a série dada é convergente:*

a) $\sum_{k=1}^{+\infty}(-1)^{k+1} sen\frac{1}{k}$; *b)* $\sum_{n=2}^{+\infty}(-1)^n \frac{n^3}{n^4+3}$; *c)* $\sum_{k=3}^{+\infty}(-1)^{k+1}\frac{ln\, k}{k}$;

d) $\sum_{n=0}^{+\infty}(-1)^n 2^{-n}$; *e)* $\sum_{n=0}^{+\infty}\frac{1}{(n+3)(n+1)}$; *e)* $\sum_{n=0}^{+\infty}\frac{11}{(2n+3)(3n+5)}$.

Exercício 2.4.4. *Estude a série dada com relação a convergência ou divergência.*

a) $\sum_{k=0}^{+\infty}\frac{1}{(k^2+1)}$; *b)* $\sum_{k=2}^{+\infty}\frac{1}{k^2\, ln\, k}$; *c)* $\sum_{k=2}^{+\infty}\frac{1}{k^\alpha\, ln\, k}$, $\alpha > 0$; *d)* $\sum_{k=0}^{+\infty}\frac{k}{1+k^4}$.

4. Mostre que $\sum_{n=1}^{\infty} aq^{n-1}$ *converge e tem soma* $\frac{a}{1-q}$ *se* $|q| < 1$ *e diverge se* $|q| \geq 1$.

Exercício 2.4.5. *Mostre que* $\sum_{n=1}^{\infty}\left(\frac{1}{n(n+1)}+\frac{1}{2^n}\right)$ *converge e tem soma igual a* 2.

6. A série $\sum_{k=1}^{+\infty}\frac{1}{k} sen\frac{1}{k}$ *é convergente ou divergente? Justifique.*

Exercício 2.4.6. *Estude a série dada com relação a convergência ou divergência.*

a) $\sum_{k=2}^{\infty}\frac{k}{2k^3-k+1}$; *b)* $\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{k\sqrt{k}}$; *c)* $\sum_{k=1}^{\infty}\frac{k^2+2}{k^5+2k+1}$;.

8. Diga se cada série a seguir converge ou diverge. Justifique.

a) $\sum_{k=0}^{+\infty}\frac{3^k}{(1+4^k)}$; *b)* $\sum_{k=1}^{+\infty}\frac{k!2^k}{k^k}$; *c)* $\sum_{k=1}^{+\infty} k\alpha^k$ *com* $\alpha > 0$;

d) $\sum_{k=1}^{+\infty}[\sqrt{k+1}-\sqrt{k}]$; *e)* $\sum_{k=1}^{+\infty}\frac{k^3+4}{2^k}$ *f)* $\sum_{k=0}^{+\infty}\frac{a^k}{k!}$ *com* $a > 0$.

Exercício 2.4.7. *Determine* $x > 0$ *para que a série seja convergente.*

a) $\sum_{k=1}^{+\infty} \frac{x^k}{k}$; *b)* $\sum_{k=1}^{+\infty} \frac{x^k}{k^2}$; *c)* $\sum_{k=1}^{+\infty} \frac{kx^k}{k^3+1}$; *d)* $\sum_{k=1}^{+\infty} \frac{x^k}{2^k}$; *e)* $\sum_{k=3}^{+\infty} \frac{x^k}{\ln k}$;
f) $\sum_{k=1}^{+\infty} \frac{x^k}{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot \ldots \cdot (2k+1)}$; *g)* $\sum_{k=1}^{+\infty} \frac{(2k+1)x^k}{k!}$; *h)* $\sum_{k=1}^{+\infty} \frac{x^k}{k^k}$.

Exercício 2.4.8. *Determine $x > 0$ para que a série seja convergente.*

a) $\sum_{k=1}^{+\infty} x^k$; *b)* $\sum_{k=1}^{+\infty} \frac{x^k}{k!}$; *c)* $\sum_{k=1}^{+\infty} \frac{x^k}{\ln k}$; *d)* $\sum_{k=1}^{+\infty} \frac{x^k}{k^2}$; *e)* $\sum_{k=1}^{+\infty} e^{kx}$;
f) $\sum_{k=1}^{+\infty} \frac{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot \ldots \cdot (2k-1)}{2 \cdot 4 \cdot 6 \cdot \ldots \cdot 2k} x^{2k}$; *g)* $\sum_{k=1}^{+\infty} \frac{1 \cdot 2 \cdot 3 \cdot \ldots \cdot (2k-1)}{2 \cdot 4 \cdot 6 \cdot \ldots \cdot 2k} \cdot \frac{x^{2k+1}}{2k+1}$; *h)* $\sum_{k=1}^{+\infty} \frac{k!x^k}{k^k}$.

Exercício 2.4.9. *Determine o domínio da função f dada por:*

a) $f(x) = \sum_{k=1}^{+\infty} k!x^k$; *b)* $f(x) = \sum_{k=1}^{+\infty} \frac{x^k}{k^3}$; *c)* $f(x) = \sum_{k=1}^{+\infty} \left(sen\frac{1}{k}\right)x^k$; *d)* $f(x) = \sum_{k=1}^{+\infty} 2^k x^k$.
(O domínio de uma função é o conjunto dos x onde a série é convergente.)

Exercício 2.4.10. *Considere a série de números reais $\sum_{n=1}^{+\infty} a_n$. Suponha que existe uma sequência $\{b_n\}$ tal que $0 < b_n \leq a_n$ e $\lim_{n\to+\infty} b_n = b > 0$. A série $\sum_{n=1}^{+\infty} a_n$ é convergente?* **Justifique sua resposta!**

Exercício 2.4.11. *Considere as séries de números reais $\sum_{n=1}^{+\infty} a_n$ e $\sum_{n=1}^{+\infty} b_n$ tais que $0 \leq a_n \leq b_n$. Além disso, suponha que existe uma função $f : \mathbb{R} \to \mathbb{R}$ contínua, positiva e decrescente tal que $f(n) = b_n$, $\lim_{n\to+\infty} f(n) = 0$ e $\int_1^{+\infty} f(x)dx$ é convergente. Prove que:*

a) a série $\sum_{n=1}^{+\infty} b_n$ é convergente.

b) a série $\sum_{n=1}^{+\infty} a_n$ é convergente.

Exercício 2.4.12. *As séries dadas a seguir converge ou diverge?* **Justifique sua resposta!**

a) $\sum_{k=1}^{+\infty} \frac{cos(1/k)}{k^2}$; *b)* $\sum_{k=3}^{+\infty} \frac{sen(k)}{k^3 \ln k}$; *c)* $\sum_{k=1}^{+\infty} \frac{k+1}{k^2}$; *d)* $\sum_{k=1}^{+\infty} \frac{cos(k\pi)}{k}$.

Exercício 2.4.13. *Se uma sequência de números reais positivos* $\{a_n\}$ *é tal que* $a_{n+1} = a_n \left(1 + \frac{1}{n}\right)^{-n}$, *então a série* $\sum_{n=1}^{+\infty} a_n$ *converge ou diverge?* **Justifique sua resposta!**

Exercício 2.4.14. *Determine a série de Maclaurin de:*

a) $f(x) = sen\, x$. *b)* $f(x) = cos\, x$. *c)* $f(x) = e^{2x}$.

d) $f(x) = actg\, x$. *b)* $f(x) = ln(x+1)$. *c)* $f(x) = e^{-x^2}$.

Exercício 2.4.15. *Encontre a série de Taylor da função* $f(x) = cos\, x$ *em torno de* π.

Exercício 2.4.16. *Encontre a série de Taylor da função* $f(x) = (x+1)^n$ *em torno de* 0.

Exercício 2.4.17. *Prove que*

$$(a+b)^n = \sum_{p=0}^{n} \frac{n!}{p!(n-p)!} a^{n-p} b^p$$

onde $a, b \in \mathbb{R}$ *e* $n \in I\!N$. *A fórmula acima é conhecida binômio de Newton.*