

Notas de aula: Cálculo Numérico

utilizando a linguagem Julia

Daniel Cassimiro

./rosto/capa-eps-converted-to.pdf September 12, 2024

Licença

Este trabalho está licenciado sob a Licença Creative Commons Atribuição-CompartilhaIgual 3.0 Não Adaptada. Para ver uma cópia desta licença, visite <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/> ou envie uma carta para Creative Commons, PO Box 1866, Mountain View, CA 94042, USA.

Contents

Capa	i
Licença	ii
Sumário	v
1 Introdução	1
2 Representação de números e aritmética de máquina	3
2.1 Sistema de numeração e mudança de base	3
2.2 Notação científica e notação normalizada	11
2.3 Representação decimal finita	12
2.3.1 Arredondamento de números	13
2.4 Representação de números em máquina	16
2.4.1 Números inteiros	16
2.4.2 Sistema de ponto fixo	19
2.4.3 Sistema de ponto flutuante	20
2.4.4 Precisão e épsilon de máquina	23
2.4.5 Distribuição dos números	24
2.5 Tipos de erros	26
2.6 Erros nas operações elementares	30
2.7 Cancelamento catastrófico	31
2.8 Condicionamento de um problema	34
2.9 Exemplos selecionados de cancelamento catastrófico	39
3 Solução de equações de uma variável	49
3.1 Existência e unicidade	50
3.2 Método da bisseção	52
3.2.1 Código GNU Octave: método da bisseção	56
3.3 Iteração de ponto fixo	59
3.3.1 Teorema do ponto fixo	62

3.3.2	Teste de convergência	66
3.3.3	Estabilidade e convergência	66
3.3.4	Erro absoluto e tolerância	67
3.4	Método de Newton-Raphson	74
3.4.1	Interpretação geométrica	75
3.4.2	Análise de convergência	75
3.5	Método das secantes	80
3.5.1	Interpretação geométrica	81
3.5.2	Análise de convergência	82
3.6	Critérios de parada	86
3.7	Exercícios finais	87
4	Solução de equações de uma variável	92
4.1	Existência e unicidade	93
4.2	Método da bisseção	95
4.2.1	Código GNU Octave: método da bisseção	99
4.3	Iteração de ponto fixo	102
4.3.1	Teorema do ponto fixo	105
4.3.2	Teste de convergência	109
4.3.3	Estabilidade e convergência	109
4.3.4	Erro absoluto e tolerância	110
4.4	Método de Newton-Raphson	117
4.4.1	Interpretação geométrica	118
4.4.2	Análise de convergência	118
4.5	Método das secantes	123
4.5.1	Interpretação geométrica	124
4.5.2	Análise de convergência	125
4.6	Critérios de parada	129
4.7	Exercícios finais	130
5	Interpolação	135
5.1	Interpolação polinomial	136
5.2	Diferenças divididas de Newton	141
5.3	Polinômios de Lagrange	143
5.4	Aproximação de funções reais por polinômios interpoladores	144
5.5	Interpolação linear segmentada	148
5.6	Interpolação cúbica segmentada - spline	149
5.6.1	Spline natural	152
5.6.2	Spline fixado	155
5.6.3	Spline <i>not-a-knot</i>	155
5.6.4	Spline periódico	156

A	Rápida introdução à linguagem Julia	158
A.1	Sobre a linguagem Julia	158
A.1.1	Características Principais	159
A.1.2	Instalação e execução	160
A.1.3	Usando Julia	160
A.2	Elementos da linguagem	162
A.2.1	Variáveis	162
A.3	Repositórios	163
A.4	Estruturas de ramificação e repetição	163
A.4.1	A instrução de ramificação “if”	163
A.4.2	A instrução de repetição “for”	164
A.4.3	A instrução de repetição “while”	165
A.5	Funções	165
A.5.1	Operações matemáticas elementares	166
A.5.2	Funções e constantes elementares	166
A.5.3	Operadores lógicos	167
A.6	Matrizes	167
A.6.1	Obtendo dados de uma matriz	168
A.6.2	Operações matriciais e elemento-a-elemento	170
A.7	Gráficos	171
	Respostas dos Exercícios	172

Chapter 1

Introdução

Cálculo numérico é a disciplina que estuda as técnicas para a solução aproximada de problemas matemáticos. Estas técnicas são de natureza analítica e computacional. As principais preocupações normalmente envolvem exatidão e desempenho.

Aliado ao aumento contínuo da capacidade de computação disponível, o desenvolvimento de métodos numéricos tornou a simulação computacional de problemas matemáticos uma prática usual nas mais diversas áreas científicas e tecnológicas. As então chamadas simulações numéricas são constituídas de um arranjo de vários esquemas numéricos dedicados a resolver problemas específicos como, por exemplo: resolver equações algébricas, resolver sistemas de equações lineares, interpolar e ajustar pontos, calcular derivadas e integrais, resolver equações diferenciais ordinárias etc. Neste livro, abordamos o desenvolvimento, a implementação, a utilização e os aspectos teóricos de métodos numéricos para a resolução desses problemas.

Trabalharemos com problemas que abordam aspectos teóricos e de utilização dos métodos estudados, bem como com problemas de interesse na engenharia, na física e na matemática aplicada.

A necessidade de aplicar aproximações numéricas decorre do fato de que esses problemas podem se mostrar intratáveis se dispomos apenas de meios puramente analíticos, como aqueles estudados nos cursos de cálculo e álgebra linear. Por exemplo, o teorema de Abel-Ruffini nos garante que não existe uma fórmula algébrica, isto é, envolvendo apenas operações aritméticas e radicais, para calcular as raízes de uma equação polinomial de qualquer grau, mas apenas casos particulares:

- Simplesmente isolar a incógnita para encontrar a raiz de uma equação do primeiro grau;
- Fórmula de Bhaskara para encontrar raízes de uma equação do segundo grau;
- Fórmula de Cardano para encontrar raízes de uma equação do terceiro grau;
- Existe expressão para equações de quarto grau;

- Casos simplificados de equações de grau maior que 4 onde alguns coeficientes são nulos também podem ser resolvidos.

Equações não polinomiais podem ser ainda mais complicadas de resolver exatamente, por exemplo:

$$\cos(x) = x \quad \text{ou} \quad xe^x = 10 \quad (1.1)$$

A maioria dos problemas envolvendo fenômenos reais produzem modelos matemáticos cuja solução analítica é difícil (ou impossível) de obter, mesmo quando provamos que a solução existe. Nesse curso propomos calcular aproximações numéricas para esses problemas, que apesar de, em geral, serem diferentes da solução exata, mostraremos que elas podem ser bem próximas.

Para entender a construção de aproximações é necessário estudar como funciona a aritmética implementada nos computadores e erros de arredondamento. Como computadores, em geral, usam uma base binária para representar números, começaremos falando em mudança de base.

Chapter 2

Representação de números e aritmética de máquina

Neste capítulo, abordaremos formas de representar números reais em computadores. Iniciamos com uma discussão sobre representação posicional e mudança de base. Então, enfatizaremos a representação de números com quantidade finita de dígitos, mais especificamente, as representações de números inteiros, ponto fixo e ponto flutuante em computadores.

A representação de números e a aritmética em computadores levam aos chamados erros de arredondamento e de truncamento. Ao final deste capítulo, abordaremos os efeitos do erro de arredondamento na computação científica.

2.1 Sistema de numeração e mudança de base

Usualmente, utilizamos o sistema de numeração decimal, isto é, base 10, para representar números. Esse é um sistema de numeração em que a posição do algarismo indica a potência de 10 pela qual seu valor é multiplicado.

Exemplo 2.1.1. O número 293 é decomposto como

$$\begin{aligned} 293 &= 2 \text{ centenas} + 9 \text{ dezenas} + 3 \text{ unidades} \\ &= 2 \cdot 10^2 + 9 \cdot 10^1 + 3 \cdot 10^0. \end{aligned} \tag{2.1}$$

O sistema de numeração posicional também pode ser usado com outras bases. Vejamos a seguinte definição.

Definição 2.1.1 (Sistema de numeração de base b). *Dado um número natural $b > 1$ e o conjunto de símbolos $\{\pm, 0, 1, 2, \dots, b-1\}$ ¹, a sequência de símbolos*

$$(d_n d_{n-1} \cdots d_1 d_0, d_{-1} d_{-2} \cdots)_b \tag{2.2}$$

¹Para $b > 10$, veja a Observação 2.1.1.

representa o número positivo

$$d_n \cdot b^n + d_{n-1} \cdot b^{n-1} + \cdots + d_0 \cdot b^0 + d_{-1} \cdot b^{-1} + d_{-2} \cdot b^{-2} + \cdots \quad (2.3)$$

Para representar números negativos usamos o símbolo $-$ à esquerda do numeral².

Observação 2.1.1 ($b \geq 10$). Para sistemas de numeração com base $b \geq 10$ é usual utilizar as seguintes notações:

- No sistema de numeração decimal ($b = 10$), costumamos representar o número sem os parênteses e o subíndice, ou seja,

$$\pm d_n d_{n-1} \dots d_1 d_0, d_{-1} d_{-2} \dots := \pm (d_n d_{n-1} \dots d_1 d_0, d_{-1} d_{-2} \dots)_{10}. \quad (2.4)$$

- Se $b > 10$, usamos as letras A, B, C, \dots para denotar os algarismos: $A = 10$, $B = 11$, $C = 12$, $D = 13$, $E = 14$, $F = 15$.

Exemplo 2.1.2 (Sistema binário). O sistema de numeração em base dois é chamado de binário e os algarismos binários são conhecidos como *bits* (do inglês **binary digits**). Um *bit* pode assumir dois valores distintos: 0 ou 1. Por exemplo:

$$\begin{aligned} x &= (1001,101)_2 \\ &= 1 \cdot 2^3 + 0 \cdot 2^2 + 0 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0 + 1 \cdot 2^{-1} + 0 \cdot 2^{-2} + 1 \cdot 2^{-3} \\ &= 8 + 0 + 0 + 1 + 0,5 + 0 + 0,125 = 9,625. \end{aligned} \quad (2.5)$$

Ou seja, $(1001,101)_2$ é igual a 9,625 no sistema decimal.

Em **Julia** podemos converter o número $(1001,101)_2$ para a base decimal computando

```
1 julia> 1*2^3 + 0*2^2 + 0*2^1 + 1*2^0 + 1*2^-1 + 0*2^-2 + 1*2^-3
2 9.625
```

Exemplo 2.1.3 (Sistema quaternário). No sistema quaternário a base b é igual a 4 e, portanto, temos o seguinte conjunto de algarismos $\{0, 1, 2, 3\}$. Por exemplo:

$$(301,2)_4 = 3 \cdot 4^2 + 0 \cdot 4^1 + 1 \cdot 4^0 + 2 \cdot 4^{-1} = 49,5. \quad (2.6)$$

Verifique no computador!

Exemplo 2.1.4 (Sistema octal). No sistema octal a base é $b = 8$. Por exemplo:

$$\begin{aligned} (1357,24)_8 &= 1 \cdot 8^3 + 3 \cdot 8^2 + 5 \cdot 8^1 + 7 \cdot 8^0 + 2 \cdot 8^{-1} + 4 \cdot 8^{-2} \\ &= 512 + 192 + 40 + 7 + 0,25 + 0,0625 = 751,3125. \end{aligned} \quad (2.7)$$

Verifique no computador!

²O uso do símbolo $+$ é opcional na representação de números positivos.

Exemplo 2.1.5 (Sistema hexadecimal). O sistema de numeração cuja base é $b = 16$ é chamado de sistema hexadecimal. Neste, temos o conjunto de algarismos $\{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, A, B, C, D, E, F\}$. Convertendo o número $(E2AC)_{16}$ para a base 10 temos

$$\begin{aligned}(E2AC)_{16} &= 14 \cdot 16^3 + 2 \cdot 16^2 + 10 \cdot 16^1 + 12 \cdot 16^0 \\ &= 57344 + 512 + 160 + 12 = 58028.\end{aligned}\tag{2.8}$$

Verifique no computador!

Observação 2.1.2. A linguagem Julia tem prefixos para representar números nas bases 2, 8 e 10. Por exemplo, temos:

```
1 >>> print(0b1001) # bin -> dec
2 9
3 >>> print(0o157) # oct -> dec
4 111
5 >>> print(0xbeba) # hex -> dec
6 48826
7 >>> string(9,base=2) # dec -> bin
8 1001
```

Também é possível usar a função `int()` para interpretar a representação de um inteiro em uma base com b entre 2 e 36. Por exemplo, temos:

```
1 >>> print(int('1001', 2)) # Base 2
2 9
3 >>> print(int('1001', 5)) # Base 5
4 126
5 >>> print(int('ABCD', 20)) # Base 20
6 84653
7 >>> print(int('zz', 36)) # Base 36
8 1295
```

Nos exemplos acima vimos como converter números representados em um sistema de numeração de base b para o sistema decimal. Agora, vamos estudar como fazer o processo inverso. Isto é, dado um número decimal $(X)_{10}$ queremos escrevê-lo em uma outra base b , isto é, queremos obter a seguinte representação:

$$\begin{aligned}(X)_{10} &= (d_n d_{n-1} \cdots d_0, d_{-1} \cdots)_b \\ &= d_n \cdot b^n + d_{n-1} \cdot b^{n-1} + \cdots + d_0 \cdot b^0 + d_{-1} \cdot b^{-1} + d_{-2} \cdot b^{-2} + \cdots\end{aligned}\tag{2.9}$$

Separando as partes inteira e fracionária de X , isto é, $X = X^i + X^f$, temos

$$X^i = d_n \cdot b^n + \cdots + d_{n-1} b^{n-1} \cdots + d_1 \cdot b^1 + d_0 \cdot b^0\tag{2.10}$$

e

$$X^f = \frac{d_{-1}}{b^1} + \frac{d_{-2}}{b^2} + \dots \quad (2.11)$$

Nosso objetivo é determinar os algarismos $\{d_n, d_{n-1}, \dots\}$.

Primeiramente, vejamos como tratar a parte inteira X^i . Calculando o quociente de X^i por b , temos:

$$\frac{X^i}{b} = \frac{d_0}{b} + d_1 + d_2 \cdot b^1 + \dots + d_{n-1} \cdot b^{n-2} + d_n \cdot b^{n-1}. \quad (2.12)$$

Observe que d_0 é o resto da divisão de X^i por b , pois $d_1 + d_2 \cdot b^1 + \dots + d_{n-1} \cdot b^{n-2} + d_n \cdot b^{n-1}$ é inteiro e $\frac{d_0}{b}$ é uma fração com $d_0 < b$. Da mesma forma, o resto da divisão de $d_1 + d_2 \cdot b^1 + \dots + d_{n-1} \cdot b^{n-2} + d_n \cdot b^{n-1}$ por b é d_1 . Ou seja, repetindo este processo encontramos os algarismos $d_0, d_1, d_2, \dots, d_n$.

Vamos, agora, converter a parte fracionária X^f do número decimal X para o sistema de base b . Multiplicando X^f por b , temos

$$bX^f = d_{-1} + \frac{d_{-2}}{b} + \frac{d_{-3}}{b^2} + \dots \quad (2.13)$$

Observe que a parte inteira desse produto é d_{-1} e $\frac{d_{-2}}{b} + \frac{d_{-3}}{b^2} + \dots$ é a parte fracionária. Quando multiplicamos $\frac{d_{-2}}{b} + \frac{d_{-3}}{b^2} + \dots$ por b novamente, encontramos d_{-2} . Repetindo este processo encontramos os demais algarismos.

Exemplo 2.1.6. Vamos converter o número 9,625 para a base binária ($b = 2$). Primeiramente, decompomos 9,625 na soma de suas partes inteira e fracionária.

$$9,625 = 9 + 0,625. \quad (2.14)$$

Conversão da parte inteira. Para converter a parte inteira, fazemos sucessivas divisões por $b = 2$ obtendo

$$9 = 4 \cdot 2 + 1 \quad (2.15)$$

$$= (2 \cdot 2 + 0) \cdot 2 + 1 \quad (2.16)$$

$$= 2^3 + 1. \quad (2.17)$$

Ou seja, temos que $9 = (1001)_2$.

Em Julia, podemos usar os comandos `int` (truncamento) e a operação `%` (resto da divisão) para computar esta conversão da seguinte forma

```
1 >>> x = 9
2 >>> d0 = x%2; x = int(x/2); print(f"d0 = {d0}, x = {x}")
3 d0 = 1, x = 4
```

```

4 >>> d1 = x%2; x = int(x/2); print(f"d1 = {d1}, x = {x}")
5 d1 = 0, x = 2
6 >>> d2 = x%2; x = int(x/2); print(f"d2 = {d2}, x = {x}")
7 d2 = 0, x = 1
8 >>> d3 = x%2; x = int(x/2); print(f"d3 = {d3}, x = {x}")
9 d3 = 1, x = 0

```

Conversão da parte fracionária. Para converter a parte fracionária, fazemos sucessivas multiplicações por $b = 2$ obtendo

$$0,625 = 1,25 \cdot 2^{-1} = 1 \cdot 2^{-1} + 0,25 \cdot 2^{-1} \quad (2.18)$$

$$= 1 \cdot 2^{-1} + (0,5 \cdot 2^{-1}) \cdot 2^{-1} = 1 \cdot 2^{-1} + 0,5 \cdot 2^{-2} \quad (2.19)$$

$$= 1 \cdot 2^{-1} + (1 \cdot 2^{-1}) \cdot 2^{-2} = 1 \cdot 2^{-1} + 1 \cdot 2^{-3}. \quad (2.20)$$

Ou seja, temos que $0,625 = (0,101)_2$.

No GNU Octave, podemos computar esta conversão da parte fracionária da seguinte forma

```

>> x = 0.625
x = 0.62500
>> d = fix(2*x), x = 2*x - d
d = 1
x = 0.25000
>> d = fix(2*x), x = 2*x - d
d = 0
x = 0.50000
>> d = fix(2*x), x = 2*x - d
d = 1
x = 0

```

Conclusão. Da conversão das partes inteira e fracionária de $9,625$, obtemos $9 = (1001)_2$ e $0,625 = (0,101)_2$. Logo, concluímos que $9,625 = (1001,101)_2$.

Observação 2.1.3. O GNU Octave oferece algumas funções para a conversão de números inteiros em base decimal para uma base dada. Por exemplo, temos:

```

>> dec2base(9,2)
ans = 1001
>> dec2base(111,8)
ans = 157
>> dec2base(48826,16)
ans = BEBA

```

Observação 2.1.4. Uma maneira de converter um número dado em uma base b_1 para uma base b_2 é fazer em duas partes: primeiro converter o número dado na base b_1 para base decimal e depois converter para a base b_2 .

Exercícios resolvidos

Esta seção carece de exercícios resolvidos. Participe da sua escrita.

Veja como em:

<https://github.com/livroscolaborativos/CalculoNumerico>

ER 2.1.1. Obtenha a representação do número $125,58\bar{3}$ na base 6.

Solução. Decompomos $125,58\bar{3}$ nas suas partes inteira 125 e fracionária $0,58\bar{3}$. Então, convertemos cada parte.

Conversão da parte inteira. Vamos escrever o número 125 na base 6. Para tanto, fazemos sucessivas divisões por 6 como segue:

$$\begin{aligned} 125 &= 20 \cdot 6 + 5 \quad (125 \text{ dividido por } 6 \text{ é igual a } 20 \text{ e resta } 5) \\ &= (3 \cdot 6 + 2) \cdot 6 + 5 = 3 \cdot 6^2 + 2 \cdot 6 + 5, \end{aligned} \quad (2.21)$$

logo $125 = (325)_6$.

Estes cálculos podem ser feitos no **GNU Octave** com o auxílio das funções **mod** e **fix**. A primeira calcula o resto da divisão entre dois números, enquanto que a segunda retorna a parte inteira de um número dado. No nosso exemplo, temos:

```
>> x = 125
x = 125
>> d = mod(x,6), x = fix(x/6)
d = 5
x = 20
>> d = mod(x,6), x = fix(x/6)
d = 2
x = 3
>> d = mod(x,6), x = fix(x/6)
d = 3
x = 0
```

Verifique!

Conversão da parte fracionária. Para converter $0,58\bar{3}$ para a base 6, fazemos sucessivas multiplicações por 6 como segue:

$$\begin{aligned} 0,58\bar{3} &= 3,5 \cdot 6^{-1} \quad (0,58\bar{3} \text{ multiplicado por } 6 \text{ é igual a } 3,5) \\ &= 3 \cdot 6^{-1} + 0,5 \cdot 6^{-1} \\ &= 3 \cdot 6^{-1} + (3 \cdot 6^{-1}) \cdot 6^{-1} \\ &= 3 \cdot 6^{-1} + 3 \cdot 6^{-2}, \end{aligned} \quad (2.22)$$

logo $0,58\overline{3} = (0,33)_6$.

No GNU Octave, podemos computar esta conversão da parte fracionária da seguinte forma

```
>> x = 0.58 + 1/3/100
x = 0.58333
>> d = fix(6*x), x = 6*x - d
d = 3
x = 0.50000
>> x = 0.5 #isso é realmente necessário?
x = 0.50000
>> d = fix(6*x), x = 6*x - d
d = 3
x = 0
```

◇

ER 2.1.2. Obtenha a representação na base 4 do número $(101,01)_2$.

Solução. Começamos convertendo $(101,01)_2$ para a base decimal:

$$(101,01)_2 = 1 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^0 + 1 \cdot 2^{-2} = 5,25. \quad (2.23)$$

Então, convertemos 5,25 para a base 4. Para sua parte inteira, temos

$$5 = 1 \cdot 4 + 1 = (11)_4. \quad (2.24)$$

Para sua parte fracionária, temos

$$0,25 = 1 \cdot 4^{-1} = (0,1)_4. \quad (2.25)$$

Logo, $(101,01)_2 = (11,1)_4$. Verifique estas contas no computador!

◇

Exercícios

E 2.1.1. Converta para base decimal cada um dos seguintes números:

- a) $(100)_2$
- b) $(100)_3$
- c) $(100)_b$
- d) $(12)_5$

e) $(AA)_{16}$

f) $(7,1)_8$

g) $(3,12)_5$

E 2.1.2. Escreva os números abaixo na base decimal.

a) $(25,13)_8$

b) $(101,1)_2$

c) $(12F,4)_{16}$

d) $(11,2)_3$

E 2.1.3. Escreva o número 5,5 em base binária.

E 2.1.4. Escreva o número 17,109375 em base hexadecimal ($b = 16$).

E 2.1.5. Escreva cada número decimal na base b .

a) $7,\overline{6}$ na base $b = 5$

b) $29,1\overline{6}$ na base $b = 6$

E 2.1.6. Escreva $(12.4)_8$ em base decimal e binária.

E 2.1.7. Escreva cada número dado para a base b .

a) $(45,1)_8$ para a base $b = 2$

b) $(21,2)_8$ para a base $b = 16$

c) $(1001,101)_2$ para a base $b = 8$

d) $(1001,101)_2$ para a base $b = 16$

E 2.1.8. Quantos algarismos são necessários para representar o número 937163832173947 em base binária? E em base 7? Dica: Qual é o menor e o maior inteiro que pode ser escrito em dada base com N algarismos?

2.2 Notação científica e notação normalizada

Como vimos, no sistema posicional usual um número x na base b é representado por

$$x = \pm(d_n d_{n-1} \cdots d_0, d_{-1} d_{-2} d_{-3} \cdots)_b, \quad (2.26)$$

onde $d_n \neq 0$ e $d_i \in \{0, 1, \dots, b-1\}$ é o dígito da i -ésima posição. Alternativamente, é costumeiro usarmos a chamada notação científica. Nesta, o número x é representado como

$$x = \pm(M)_b \times b^e, \quad (2.27)$$

onde $(M)_b = (d_n d_{n-1} \cdots d_0, d_{-1} d_{-2} d_{-3} \cdots)_b$ é chamada de mantissa e $e \in \mathbb{Z}$ é chamado de expoente de x .

Exemplo 2.2.1. a) O número 602,2141 em notação científica pode ser escrito como

$$602,2141 \times 10^0 = 60,22141 \times 10^1 = 0,6022141 \times 10^3. \quad (2.28)$$

b) O número $(1010,10)_2$ pode ser escrito em notação científica como $(10,1010)_2 \times 2^2$.

Observamos que um número pode ser representado de várias formas equivalentes em notação científica. Para termos uma representação única introduzimos o conceito de notação normalizada.

Definição 2.2.1. Um número x na base b é dito estar representado em notação (científica) normalizada quando está escrito na forma

$$x = (-1)^s (M)_b \times b^E, \quad (2.29)$$

onde $(M)_b = (d_0, d_{-1} d_{-2} d_{-3} \cdots)_b$, com $d_0 \neq 0$ ³⁴, s é 0 para positivo e 1 para negativo, E é o expoente.

Exemplo 2.2.2. Vejamos os seguintes casos:

a) O número 602,2141 em notação (científica) normalizada é representado por $6,022141 \times 10^2$.

b) O número $(1010,10)_2$ escrito em notação normalizada é $(1,01010)_2 \times 2^3$.

Observação 2.2.1. No GNU Octave, podemos controlar a impressão de números usando o comando `printf`. Por exemplo:

³Em algumas referências é usado $M_b = (0, d_{-1} d_{-2} d_{-3} \cdots)_b$.

⁴No caso de $x = 0$, $M_b = (0,00 \cdots)_b$.


```
>> printf('%1.5f\n',-pi)
-3.14159
>> printf('%1.5e\n',-pi)
-3.14159e+00
```

No primeiro caso, obtemos a representação em ponto flutuante decimal com 6 dígitos do número $-\pi$. No segundo caso, obtemos a representação em notação científica normalizada com 6 dígitos.

Exercícios resolvidos

Esta seção carece de exercícios resolvidos. Participe da sua escrita.

Veja como em:

<https://github.com/livroscolaborativos/CalculoNumerico>

Exercícios

Esta seção carece de exercícios. Participe da sua escrita.

Veja como em:

<https://github.com/livroscolaborativos/CalculoNumerico>

E 2.2.1. Represente os seguintes números em notação científica normalizada:

$$\begin{array}{ll} a) 299792,458 & b) 66,2607 \times 10^{-35} \\ c) 0,6674 \times 10^{-7} & d) 9806,65 \times 10^1 \end{array} \quad (2.30)$$

(2.31)

E 2.2.2. Use o computador para verificar as respostas do Exercício 2.2.1.

2.3 Representação decimal finita

Em computadores, é usual representarmos números usando uma quantidade de dígitos finita. A quantidade a ser usada normalmente depende da precisão com que as computações estão sendo feitas. Ocorre que quando restringimos a representação a um número finito de dígitos, muitos números não podem ser representado de forma exata, por exemplo, as dízimas infinitas e os números irracionais. Este fenômeno nos leva aos conceitos de número de dígitos significativos e de arredondamento.

Definição 2.3.1 (Número de dígitos significativos). *Um número decimal $x = \pm d_0, d_{-1} \dots d_{-i} d_{-i-1} \dots d_{-i-n} d_{-i-n-1} \dots \times 10^E$ é dito ter n dígitos significativos quando $d_j = 0$ para $j \geq -i$ e $j \leq -i - n - 1$.*

Exemplo 2.3.1. O número $0,0602100 \times 10^{-3}$ tem 4 dígitos significativos.

2.3.1 Arredondamento de números

Quando representamos um número x com uma quantidade de dígitos menor que a de dígitos significativos acabamos com uma aproximação deste. Este procedimento é chamado arredondamento de um número. Mais precisamente, seja dado

$$x = \pm d_0, d_1 d_2 \dots d_{k-1} d_k d_{k+1} \dots d_n \times 10^e \quad (2.33)$$

em notação normalizada, isto é, $d_0 \neq 0$ ⁵. Podemos representar x com k dígitos da seguinte forma:

1. **Arredondamento por truncamento** (ou corte): aproximamos x por

$$\bar{x} = \pm d_0, d_1 d_2 \dots d_k \times 10^e \quad (2.34)$$

simplesmente descartando os dígitos d_j com $j > k$.

2. **Arredondamento por proximidade**⁶: se $d_{k+1} < 5$ aproximamos x por

$$\bar{x} = \pm d_0, d_1 d_2 \dots d_k \times 10^e \quad (2.35)$$

senão aproximamos x por⁷

$$\bar{x} = \pm (d_0, d_1 d_2 \dots d_k + 10^{-k}) \times 10^e \quad (2.37)$$

3. **Arredondamento por proximidade com desempate par**: se $d_{k+1} < 5$ aproximamos x por

$$\bar{x} = \pm d_0, d_1 d_2 \dots d_k \times 10^e. \quad (2.38)$$

Se $d_{k+1}, d_{k+2} d_{k+3} \dots > 5$ aproximamos x por

$$\bar{x} = \pm (d_0, d_1 d_2 \dots d_k + 10^{-k}) \times 10^e. \quad (2.39)$$

⁵caso $x \neq 0$.

⁶com desempate infinito.

⁷Note que essas duas opções são equivalentes a somar 5 no dígito à direita do corte e depois arredondar por corte, ou seja, arredondar por corte

$$\pm (d_0, d_1 d_2 \dots d_k d_{k+1} + 5 \times 10^{-(k+1)}) \times 10^e \quad (2.36)$$

Agora, no caso de empate, i.e. $d_{k+1}, d_{k+2}, d_{k+3} \dots = 5$, então x é aproximado por

$$\bar{x} = \pm d_0, d_1 d_2 \dots d_k \times 10^e \quad (2.40)$$

caso d_k seja par e, caso contrário, por

$$\bar{x} = \pm (d_0, d_1 d_2 \dots d_k + 10^{-k}) \times 10^e. \quad (2.41)$$

Observação 2.3.1. O arredondamento por proximidade é frequentemente empregado para arredondamentos de números reais para inteiros. Por exemplo:

- $x = 1,49$ arredonda-se para o inteiro 1.
- $x = 1,50$ arredonda-se para o inteiro 2.
- $x = 2,50$ arredonda-se para o inteiro 3.

```
>> round(1.49)
ans = 1
>> round(1.50)
ans = 2
>> round(2.50)
ans = 3
```

Exemplo 2.3.2. Represente os números $x_1 = 0,567$, $x_2 = 0,233$, $x_3 = -0,675$ e $x_4 = 0,314159265 \dots \times 10^1$ com dois dígitos significativos por truncamento e arredondamento.

Solução. Vejamos cada caso:

- Por truncamento:

$$x_1 = 0,56, \quad x_2 = 0,23, \quad x_3 = -0,67 \quad \text{e} \quad x_4 = 3,1. \quad (2.42)$$

No GNU Octave, podemos obter a representação de $x_3 = -0,675$ fazendo:

```
>> printf("%1.2f\n", ceil(-0.675*1e2)/1e2)
-0.67
```

e, em notação normalizada, temos:

```
>> printf("%1.1e\n", ceil(-0.675*1e2)/1e2)
-6.7e-01
```

Em GNU Octave, a representação de números por arredondamento por proximidade com desempate par é o padrão. Assim, para obtermos a representação desejada de $x_3 = 0,675$ fazemos:

```
>> printf("%1.2f\n", -0.675)
-0.68
```

e, em notação normalizada, temos:

```
>> printf("%1.1e\n", -0.675)
-6.8e-01
```

◇

Observação 2.3.2. Observe que o arredondamento pode mudar todos os dígitos e o expoente da representação em ponto flutuante de um número dado. Por exemplo, o arredondamento de $0,9999 \times 10^{-1}$ com 3 dígitos significativos é $0,1 \times 10^0$.

Exercícios resolvidos

Esta seção carece de exercícios resolvidos. Participe da sua escrita.

Veja como em:

<https://github.com/livroscolaborativos/CalculoNumerico>

Exercícios

E 2.3.1. Aproxime os seguintes números para 2 dígitos significativos por arredondamento por truncamento.

- (a) 1,159
- (b) 7,399
- (c) -5,901

E 2.3.2. Aproxime os seguintes números para 2 dígitos significativos por arredondamento por proximidade com desempate par.

- (a) 1,151
- (b) 1,15

(c) 2,45

(d) -2,45

E 2.3.3. O GNU Octave usa arredondamento por proximidade com desempate par como padrão. Assim sendo, por exemplo

```
>> printf('%1.1e\n', 1.25)
1.2e+00
```

Agora:

```
>> printf('%1.1e\n', 2.45)
2.5e+00
```

Não deveria ser 2.4? Explique o que está ocorrendo.

2.4 Representação de números em máquina

Os computadores, em geral, usam a base binária para representar os números, onde as posições, chamadas de bits, assumem as condições “verdadeiro” ou “falso”, ou seja, 1 ou 0, respectivamente. Os computadores representam os números com uma quantidade fixa de bits, o que se traduz em um conjunto finito de números representáveis. Os demais números são tomados por proximidade àqueles conhecidos, gerando erros de arredondamento. Por exemplo, em aritmética de computador, o número 2 tem representação exata, logo $2^2 = 4$, mas $\sqrt{3}$ não tem representação finita, logo $(\sqrt{3})^2 \neq 3$.

Veja isso no GNU Octave:

```
>> 2^2 == 4
ans = 1
>> sqrt(3)^2 == 3
ans = 0
```

2.4.1 Números inteiros

Tipicamente, um número inteiro é armazenado em um computador como uma sequência de dígitos binários de comprimento fixo denominado **registro**.

Representação sem sinal

Um registro com n bits da forma

d_{n-1}	d_{n-2}	\cdots	d_1	d_0
-----------	-----------	----------	-------	-------

representa o número $(d_{n-1}d_{n-2}\dots d_1d_0)_2$.

Assim, é possível representar números inteiros entre $2^n - 1$ e 0, sendo

$$\begin{aligned}
 [111\dots 111] &= 2^{n-1} + 2^{n-2} + \dots + 2^1 + 2^0 = 2^n - 1, \\
 &\vdots \\
 [000\dots 011] &= 3, \\
 [000\dots 010] &= 2, \\
 [000\dots 001] &= 1, \\
 [000\dots 000] &= 0.
 \end{aligned} \tag{2.43}$$

Exemplo 2.4.1. No Scilab,

```
-->uint8( bin2dec('00000011') )
ans = 3
-->uint8( bin2dec('11111110') )
ans = 254
```

Representação com bit de sinal

O bit mais significativo (o primeiro à esquerda) representa o sinal: por convenção, 0 significa positivo e 1 significa negativo. Um registro com n bits da forma

s	d_{n-2}	\cdots	d_1	d_0
-----	-----------	----------	-------	-------

representa o número $(-1)^s(d_{n-2}\dots d_1d_0)_2$. Assim, é possível representar números inteiros entre $1-2^{n-1}$ e $2^{n-1}-1$, com duas representações para o zero: $(1000\dots 000)_2$ e $(00000\dots 000)_2$.

Exemplo 2.4.2. Em um registro com 8 bits, teremos os números

$$\begin{aligned}
 [11111111] &= -(2^6 + \dots + 2 + 1) = -127, \\
 &\vdots \\
 [10000001] &= -1, \\
 [10000000] &= -0, \\
 [01111111] &= 2^6 + \dots + 2 + 1 = 127, \\
 &\vdots \\
 [00000010] &= 2, \\
 [00000001] &= 1, \\
 [00000000] &= 0.
 \end{aligned} \tag{2.44}$$

Representação complemento de dois

O bit mais significativo (o primeiro à esquerda) representa o coeficiente de -2^{n-1} . Um registro com n bits da forma:

d_{n-1}	d_{n-2}	\dots	d_1	d_0
-----------	-----------	---------	-------	-------

representa o número $-d_{n-1}2^{n-1} + (d_{n-2} \dots d_1 d_0)_2$.

Observação 2.4.1. Note que todo registro começando com 1 será um número negativo.

Exemplo 2.4.3. O registro com 8 bits $[01000011]$ representa o número:

$$-0(2^7) + (1000011)_2 = 2^6 + 2 + 1 = 67. \tag{2.45}$$

Agora, o registro $[10111101]$ representa:

$$-1(2^7) + (0111101)_2 = -128 + 2^5 + 2^4 + 2^3 + 2^2 + 1 = -67. \tag{2.46}$$

Note que podemos obter a representação de -67 invertendo os dígitos de 67 em binário e somando 1.

Exemplo 2.4.4. Em um registro com 8 bits, teremos os números

$$\begin{aligned}
 [11111111] &= -2^7 + 2^6 + \cdots + 2 + 1 = -1 \\
 &\vdots \\
 [10000001] &= -2^7 + 1 = -127 \\
 [10000000] &= -2^7 = -128 \\
 [01111111] &= 2^6 + \cdots + 2 + 1 = 127 \\
 &\vdots \\
 [00000010] &= 2 \\
 [00000001] &= 1 \\
 [00000000] &= 0
 \end{aligned} \tag{2.47}$$

O GNU Octave trabalha com representação complemento de 2 de números inteiros. O comando `bitunpack` mostra o barramento de um número dado, por exemplo:

```
>> bitunpack(int8(3))
ans =
  1   1   0   0   0   0   0   0
```

mostra o barramento com 8 **bits** do número inteiro 3. Note que a ordem dos **bits** é inversa daquela apresentada no texto acima. Aqui, o **bit** mais à esquerda fornece o coeficiente de 2^0 , enquanto o **bit** mais à direita fornece o coeficiente de -2^7 .

O comando `bitpack` converte um barramento para o número em decimal, por exemplo:

```
>> bitpack(logical([1 1 0 0 0 0 0 0]), 'int8')
ans = 3
```

2.4.2 Sistema de ponto fixo

O sistema de ponto fixo representa as partes inteira e fracionária do número com uma quantidade fixa de dígitos.

Exemplo 2.4.5. Em um computador de 32 bits que usa o sistema de ponto fixo, o registro

d_{31}	d_{30}	d_{29}	\cdots	d_1	d_0
----------	----------	----------	----------	-------	-------

pode representar o número

Prof. M.e Daniel Cassimiro

- $(-1)^{d_{31}}(d_{30}d_{29} \cdots d_{17}d_{16}, d_{15}d_{14} \cdots d_1d_0)_2$ se o sinal for representado por um dígito. Observe que, neste caso, o zero possui duas representações possíveis:

$$[10000000000000000000000000000000] \quad (2.48)$$

e

$$[00000000000000000000000000000000] \quad (2.49)$$

- $(d_{30}d_{29} \cdots d_{17}d_{16})_2 - d_{31}(2^{15} - 2^{-16}) + (0, d_{15}d_{14} \cdots d_1d_0)_2$ se o sinal do número estiver representado por uma implementação em complemento de um. Observe que o zero também possui duas representações possíveis:

$$[11111111111111111111111111111111] \quad (2.50)$$

e

$$[00000000000000000000000000000000] \quad (2.51)$$

- $(d_{30}d_{29} \cdots d_{17}d_{16})_2 - d_{31}2^{15} + (0, d_{15}d_{14} \cdots d_1d_0)_2$ se o sinal do número estiver representado por uma implementação em complemento de dois. Nesse caso o zero é unicamente representado por

$$[00000000000000000000000000000000] \quad (2.52)$$

Observe que 16 dígitos são usados para representar a parte fracionária, 15 são para representar a parte inteira e um dígito, o d_{31} , está relacionado ao sinal do número.

2.4.3 Sistema de ponto flutuante

O sistema de ponto flutuante não possui quantidade fixa de dígitos para as partes inteira e fracionária do número.

Podemos definir uma máquina F em ponto flutuante de dois modos:

$$F(\beta, |M|, |E|, BIAS) \text{ ou } F(\beta, |M|, E_{MIN}, E_{MAX}) \quad (2.53)$$

onde

- β é a base (em geral 2 ou 10),
- $|M|$ é o número de dígitos da mantissa,
- $|E|$ é o número de dígitos do expoente,
- $BIAS$ é um valor de deslocamento do expoente (veja a seguir),

- E_{MIN} é o menor expoente,
- E_{MAX} é o maior expoente.

Considere uma máquina com um registro de 64 bits e base $\beta = 2$. Pelo padrão IEEE754, 1 bit é usado para o sinal, 11 bits para o expoente e 52 bits são usados para o significando tal que

s	c_{10}	c_9	\cdots	c_0	m_1	m_2	\cdots	m_{51}	m_{52}
-----	----------	-------	----------	-------	-------	-------	----------	----------	----------

represente o número (o $BIAS = 1023$ por definição)

$$x = (-1)^s M \times 2^{c-BIAS}, \quad (2.54)$$

onde a **característica** é representada por

$$c = (c_{10}c_9 \cdots c_1c_0)_2 = c_{10}2^{10} + \cdots + c_12^1 + c_02^0 \quad (2.55)$$

e o significando por

$$M = (1.m_1m_2 \cdots m_{51}m_{52})_2. \quad (2.56)$$

Observação 2.4.2. Em base 2 não é necessário armazenar o primeiro dígito (por quê?).

Exemplo 2.4.6. O registro

$$[0|100\ 0000\ 0000|1010\ 0000\ 0000 \dots 0000\ 0000] \quad (2.57)$$

representa o número

$$(-1)^0(1 + 2^{-1} + 2^{-3}) \times 2^{1024-1023} = (1 + 0.5 + 0.125)2 = 3.25. \quad (2.58)$$

Observação 2.4.3. No GNU Octave, podemos usar os comandos `bitpack` e `bitunpack` transformar um registro de ponto flutuante de 64 **bits** em decimal e vice-versa. Entretanto, um tal registro no GNU Octave tem a seguinte estrutura

$$[m_{52}m_{51}m_{50} \dots m_1|c_0c_1c_2 \cdots c_{10}|s]. \quad (2.59)$$

Desta forma, o decimal 3.25 tem, aqui, o registro

$$[000 \dots 0101|000 \dots 01|0]. \quad (2.60)$$

O que podemos verificar com o comando

```
>> bitpack(logical([zeros(1,49) 1 0 1 zeros(1,10) 1 0]),'double')
ans = 3.2500
```

O expoente deslocado

Uma maneira de representar os expoentes inteiros é deslocar todos eles uma mesma quantidade. Desta forma permitimos a representação de números negativos e a ordem deles continua crescente. O expoente é representado por um inteiro sem sinal do qual é deslocado o **BIAS**.

Tendo $|E|$ dígitos para representar o expoente, geralmente o *BIAS* é predefinido de tal forma a dividir a tabela ao meio de tal forma que o expoente *um* seja representado pela sequência $[100 \dots 000]$.

Exemplo 2.4.7. Com 64 bits, pelo padrão *IEEE754*, temos que $|E| := 11$. Assim, $(100\ 0000\ 0000)_2 = 2^{10} = 1024$. Como queremos que esta sequência represente o 1, definimos $BIAS := 1023$, pois

$$1024 - BIAS = 1. \quad (2.61)$$

Com 32 bits, temos $|E| := 8$ e $BIAS := 127$. E com 128 bits, temos $|E| := 15$ e $BIAS := 16383$.

Com $|E| = 11$ temos

$$\begin{aligned} [111\ 1111\ 1111] &= \text{reservado} \\ [111\ 1111\ 1110] &= 2046 - BIAS = 1023_{10} = E_{MAX} \\ &\vdots = \\ [100\ 0000\ 0001] &= 2^{10} + 1 - BIAS = 2_{10} \\ [100\ 0000\ 0000] &= 2^{10} - BIAS = 1_{10} \\ [011\ 1111\ 1111] &= 1023 - BIAS = 0_{10} \\ [011\ 1111\ 1110] &= 1022 - BIAS = -1_{10} \\ &\vdots = \\ [000\ 0000\ 0001] &= 1 - BIAS = -1022 = E_{MIN} \\ [000\ 0000\ 0000] &= \text{reservado} \end{aligned} \quad (2.62)$$

O maior expoente é dado por $E_{MAX} = 1023$ e o menor expoente é dado por $E_{MIN} = -1022$.

O menor número representável positivo é dado pelo registro

$$[0|000\ 0000\ 000\mathbf{1}|0000\ 0000\ 0000 \dots 0000\ 0000] \quad (2.63)$$

quando $s = 0$, $c = \mathbf{1}$ e $M = (1.000\dots000)_2$, ou seja,

$$MINR = (1 + \mathbf{0})_2 \times 2^{\mathbf{1}-1023} \approx 0.2225 \times 10^{-307}. \quad (2.64)$$

O maior número representável é dado por

$$[0|\textcolor{red}{111 1111 1110}|\textcolor{blue}{1111 1111} \cdots \textcolor{blue}{1111 1111}] \quad (2.65)$$

quando $s = 0$, $c = 2046$ e $M = (1.1111 1111 \cdots 1111)_2 = 2 - 2^{-52}$, ou seja,

$$MAXR = (2 - 2^{-52}) \times 2^{2046-1023} \approx 2^{1024} \approx 0.17977 \times 10^{309}. \quad (2.66)$$

Observação 2.4.4. No GNU Octave, podemos obter o maior e o menor **double** positivo não nulo com os comandos:

```
>> realmax
ans = 1.7977e+308
>> realmin
ans = 2.2251e-308
```

Casos especiais

O **zero** é um caso especial representado pelo registro

$$[0|\textcolor{red}{000 0000 0000}|0000 0000 0000 \dots 0000 0000] \quad (2.67)$$

Os expoentes **reservados** são usados para casos especiais:

- $c = [0000 \dots 0000]$ é usado para representar o zero (se $m = 0$) e os números subnormais (se $m \neq 0$).
- $c = [1111 \dots 1111]$ é usado para representar o infinito (se $m = 0$) e NaN (se $m \neq 0$).

Os números subnormais⁸ tem a forma

$$x = (-1)^s (\textcolor{red}{0}.m_1 m_2 \cdots m_{51} m_{52})_2 \times 2^{1-BIAS}. \quad (2.68)$$

2.4.4 Precisão e épsilon de máquina

A **precisão** p de uma máquina é o número de dígitos significativos usado para representar um número. Note que $p = |M| + 1$ em binário e $p = |M|$ para outras bases.

O **épsilon de máquina**, $\epsilon_{mach} = \epsilon$, é definido de forma que $1 + \epsilon$ seja o menor número representável maior que 1, isto é, $1 + \epsilon$ é representável, mas não existem números representáveis em $(1, 1 + \epsilon)$.

⁸Note que poderíamos definir números um pouco menores que o $MINR$.

Exemplo 2.4.8. Com 64 bits, temos que o ϵ será dado por

$$\begin{aligned} 1 &\rightarrow (1.0000\ 0000\dots 0000)_2 \times 2^0 \\ \epsilon &\rightarrow +(0.0000\ 0000\dots 0001)_2 \times 2^0 = 2^{-52} \\ (1.0000\ 0000\dots 0001)_2 \times 2^0 &\neq 1 \end{aligned} \quad (2.69)$$

Assim, $\epsilon = 2^{-52}$.

Observação 2.4.5. No GNU Octave, o ϵ de máquina é representado pela constante `eps`. Observe os seguintes resultados:

```
>> 1 + 1e-16 == 1
ans = 1
>> 1 + eps == 1
ans = 0
```

2.4.5 Distribuição dos números

Utilizando uma máquina em ponto flutuante, temos um número finito de números que podemos representar.

Um número muito pequeno geralmente é aproximado por zero (**underflow**) e um número muito grande (**overflow**) geralmente faz o cálculo parar. Além disso, os números não estão uniformemente espaçados no eixo real. Números pequenos estão bem próximos enquanto que números com expoentes grandes estão bem distantes.

Se tentarmos armazenar um número que não é representável, devemos utilizar o número mais próximo, gerando os erros de arredondamento.

Observação 2.4.6. Veja como o GNU Octave se comporta nos seguintes casos de exceção:

```
>> 0/0
warning: division by zero
ans = NaN
>> 1/0
warning: division by zero
ans = Inf
>> 1/-0
warning: division by zero
ans = -Inf
>> 2*realmax
ans = Inf
>> 1/2^9999
ans = 0
```

Exercícios

E 2.4.1. Usando a representação complemento de dois de números inteiros com 8 **bits**, escreva o número decimal que corresponde aos seguintes barramentos:

- a) [01100010].
- b) [00011101].
- c) [10000000].
- d) [11100011].
- e) [11111111]

E 2.4.2. Usando a representação complemento de dois de números inteiros com 16 **bits**, escreva o número decimal que corresponde aos seguintes barramentos:

- a) [0110001001100010].
- b) [0001110100011101].
- c) [1110001011100011].
- d) [1111111111111111].

E 2.4.3. Usando a representação complemento de dois de números inteiros com 8 **bits** no GNU Octave, escreva o número decimal que corresponde aos seguintes barramentos:

- a) [01100010].
- b) [00011101].
- c) [00010010].

E 2.4.4. Usando a representação complemento de dois de números inteiros com 16 **bits** no GNU Octave, escreva o número decimal que corresponde aos seguintes barramentos:

- a) [0110001001100010].
- b) [0001110100011101].

c) [0001001011100010].

E 2.4.5. Usando a representação de ponto flutuante com 64 **bits**, escreva o número decimal que corresponde aos seguintes barramentos:

a) [0|10000000000|111000...0].

b) [1|100000000001|0111000...0].

E 2.4.6. Explique a diferença entre o sistema de ponto fixo e ponto flutuante.

E 2.4.7. Usando a representação de **double** no GNU **Octave**, escreva o número decimal que corresponde aos seguintes barramentos:

a) [000...0111|00000000001|0].

b) [000...01110|10000000001|1].

E 2.4.8. Considere a seguinte rotina escrita para ser usada no GNU **Octave**:

```
x=1
while x+1>x
    x=x+1
end
```

Explique se esta rotina finaliza em tempo finito, em caso afirmativo calcule a ordem de grandeza do tempo de execução supondo que cada passo do laço demore $10^{-7}s$. Justifique sua resposta.

2.5 Tipos de erros

Em geral, os números não são representados de forma exata nos computadores. Isto nos leva ao chamado erro de arredondamento. Quando resolvemos problemas com técnicas numéricas, estamos sujeitos a este e outros tipos de erros. Nesta seção, veremos quais são estes erros e como controlá-los, quando possível.

Quando fazemos aproximações numéricas, os erros são gerados de várias formas, sendo as principais delas as seguintes:

1. **Incerteza dos dados** são devidos aos erros nos dados de entrada. Quando o modelo matemático é oriundo de um problema físico, existe incerteza nas medidas feitas pelos instrumentos de medição, que possuem acurácia finita.

2. **Erros de Arredondamento** são aqueles relacionados com as limitações existentes na forma de representar números em máquina.
3. **Erros de Truncamento** surgem quando aproximamos um conceito matemático formado por uma sequência infinita de passos por de um procedimento finito. Por exemplo, a definição de integral é dada por um processo de limite de somas. Numericamente, aproximamos por um soma finita. O erro de truncamento deve ser estudado analiticamente para cada método empregado e normalmente envolve matemática mais avançada que a estudado em um curso de graduação.

Uma questão fundamental é a quantificação dos erros imbricados na computação da solução de um dado problema. Para tanto, precisamos definir medidas de erros (ou de exatidão). As medidas de erro mais utilizadas são o **erro absoluto** e o **erro relativo**.

Definição 2.5.1 (Erro absoluto e relativo). *Seja x um número real e \bar{x} , sua aproximação. O **erro absoluto** da aproximação \bar{x} é definido como*

$$|x - \bar{x}|. \quad (2.70)$$

*O **erro relativo** da aproximação \bar{x} é definido como*

$$\frac{|x - \bar{x}|}{|x|}, \quad x \neq 0. \quad (2.71)$$

Observação 2.5.1. Observe que o erro relativo é adimensional e, muitas vezes, é expresso em porcentagens. Mais precisamente, o erro relativo em porcentagem da aproximação \bar{x} é dado por

$$\frac{|x - \bar{x}|}{|x|} \times 100\%. \quad (2.72)$$

Exemplo 2.5.1. Sejam $x = 123456,789$ e sua aproximação $\bar{x} = 123000$. O erro absoluto é

$$|x - \bar{x}| = |123456,789 - 123000| = 456,789 \quad (2.73)$$

e o erro relativo é

$$\frac{|x - \bar{x}|}{|x|} = \frac{456,789}{123456,789} \approx 0,00369999 \text{ ou } 0,36\% \quad (2.74)$$

Exemplo 2.5.2. Sejam $y = 1,23456789$ e $\bar{y} = 1,13$. O erro absoluto é

$$|y - \bar{y}| = |1,23456789 - 1,13| = 0,10456789 \quad (2.75)$$

que parece pequeno se compararmos com o exemplo anterior. Entretanto o erro relativo é

$$\frac{|y - \bar{y}|}{|y|} = \frac{0,10456789}{1,23456789} \approx 0,08469999 \text{ ou } 8,4\% \quad (2.76)$$

Note que o erro relativo leva em consideração a escala do problema.

Exemplo 2.5.3. Observe os erros absolutos e relativos em cada caso a seguir:

x	\bar{x}	Erro absoluto	Erro relativo
$0,3 \times 10^{-2}$	$0,3 \times 10^{-2}$	$0,3 \times 10^{-3}$	10%
$0,3$	$0,3$	$0,3 \times 10^{-2}$	10%
$0,3 \times 10^2$	$0,3 \times 10^2$	$0,3 \times 10^1$	10%

Outra forma de medir a exatidão de uma aproximação numérica é contar o **número de dígitos significativos corretos** em relação ao valor exato.

Definição 2.5.2 (Número de dígitos significativos corretos). *A aproximação \bar{x} de um número x tem s **dígitos significativos corretos** quando⁹*

$$\frac{|x - \bar{x}|}{|x|} < 5 \times 10^{-s}. \quad (2.78)$$

Exemplo 2.5.4. Vejamos os seguintes casos:

- a) A aproximação de $x = 0,333333$ por $\bar{x} = 0,333$ tem 3 dígitos significativos corretos, pois

$$\frac{|x - \bar{x}|}{|x|} = \frac{0,000333}{0,333333} \approx 0,000999 \leq 5 \times 10^{-3}. \quad (2.79)$$

- b) Considere as aproximações $\bar{x}_1 = 0,666$ e $\bar{x}_2 = 0,667$ de $x = 0,666888$. Os erros relativos são

$$\frac{|x - \bar{x}_1|}{|x|} = \frac{|0,666888 - 0,666|}{0,666888} \approx 0,00133... < 5 \times 10^{-3}. \quad (2.80)$$

⁹Esta definição é apresentada em [?]. Não existe uma definição única na literatura para o conceito de dígitos significativos corretos, embora não precisamente equivalentes, elas transmitem o mesmo conceito. Uma maneira de interpretar essa regra é: calcula-se o erro relativo na forma normalizada e a partir da ordem do expoente temos o número de dígitos significativos corretos. Como queremos o expoente, podemos estimar s por

$$DIGSE(x, \bar{x}) = s \approx \text{int} \left\lfloor \log_{10} \frac{|x - \bar{x}|}{|x|} \right\rfloor. \quad (2.77)$$

$$\frac{|x - \bar{x}_2|}{|x|} = \frac{|0,666888 - 0,667|}{0,666888} \approx 0,000167... < 5 \times 10^{-4}. \quad (2.81)$$

Note que \bar{x}_1 possui 3 dígitos significativos corretos e \bar{x}_2 possui 4 dígitos significativos (o quarto dígito é o dígito 0 que não aparece à direita, i.e, $\bar{x}_2 = 0.\textcolor{red}{6670}$). Isto também leva a conclusão que x_2 aproxima melhor o valor de x do que x_1 pois está mais próximo de x .

c) $\bar{x} = 9,999$ aproxima $x = 10$ com 4 dígitos significativos corretos, pois

$$\frac{|x - \bar{x}|}{|x|} = \frac{|10 - 9,999|}{10} \approx 0,0000999... < 5 \times 10^{-4}. \quad (2.82)$$

d) Considere as aproximações $\bar{x}_1 = 1,49$ e $\bar{x}_2 = 1,5$ de $x = 1$. Da definição, temos que 1,49 aproxima 1 com um dígito significativo correto (verifique), enquanto 1,5 tem zero dígito significativo correto, pois:

$$\frac{|1 - 1,5|}{|1|} = 5 \times 10^{-1} < 5 \times 10^0. \quad (2.83)$$

Exercícios

E 2.5.1. Calcule os erros absoluto e relativo das aproximações \bar{x} para x em cada caso:

- a) $x = \pi = 3,14159265358979 \dots$ e $\bar{x} = 3,141$
- b) $x = 1,00001$ e $\bar{x} = 1$
- c) $x = 100001$ e $\bar{x} = 100000$

E 2.5.2. Arredonde os seguintes números para cinco algarismos significativos:

- a) 1,7888544
- b) 1788,8544
- c) 0,0017888544
- d) 0,004596632
- e) $2,1754999 \times 10^{-10}$
- f) $2,1754999 \times 10^{10}$

E 2.5.3. Represente os seguintes números com três dígitos significativos usando arredondamento por truncamento e arredondamento por proximidade.

- a) 3276.
- b) 42,55.
- c) 0,00003331.

E 2.5.4. Usando a Definição 2.5.2, verifique quantos são os dígitos significativos corretos na aproximação de x por \bar{x} .

- a) $x = 2,5834$ e $\bar{x} = 2,6$
- b) $x = 100$ e $\bar{x} = 99$

E 2.5.5. Resolva a equação $0,1x - 0,01 = 12$ usando arredondamento com três dígitos significativos em cada passo e compare com o resultado exato.

E 2.5.6. Calcule o erro relativo e absoluto envolvido nas seguintes aproximações e expresse as respostas com três algarismos significativos corretos.

- a) $x = 3,1415926535898$ e $\tilde{x} = 3,141593$
- b) $x = \frac{1}{7}$ e $\tilde{x} = 1,43 \times 10^{-1}$

2.6 Erros nas operações elementares

O erro relativo presente nas operações elementares de adição, subtração, multiplicação e divisão é da ordem do ϵ de máquina. Se estivermos usando o sistema de numeração *binary64* ou *double*, temos $\epsilon = 2^{-52} \approx 2,22 \cdot 10^{-16}$.

Este erro é bem pequeno para a maioria das aplicações! Assumindo que x e y são representados com todos dígitos corretos, esperamos ter aproximadamente 15 dígitos significativos corretos quando fazemos uma das operações $x + y$, $x - y$, $x \times y$ ou x/y .

Mesmo que fizéssemos, por exemplo, 1000 operações elementares sucessivas em ponto flutuante, teríamos, no pior dos casos, acumulado todos esses erros e perdido 3 casas decimais ($1000 \times 10^{-15} \approx 10^{-12}$).

Entretanto, existem situações em que o erro se propaga de forma muito catastrófica, em especial, quando subtraímos números positivos muito próximos.

2.7 Cancelamento catastrófico

Quando fazemos subtrações com números muito próximos entre si, ocorre o que chamamos de “cancelamento catastrófico”, onde podemos perder vários dígitos de precisão em uma única subtração.

Exemplo 2.7.1. Efetue a operação

$$0,987624687925 - 0,987624 = 0,687925 \times 10^{-6} \quad (2.87)$$

usando arredondamento com seis dígitos significativos e observe a diferença se comparado com resultado sem arredondamento.

Solução. Os números arredondados com seis dígitos para a mantissa resultam na seguinte diferença

$$0,987625 - 0,987624 = 0,100000 \times 10^{-5} \quad (2.88)$$

Observe que os erros relativos entre os números exatos e aproximados no lado esquerdo são bem pequenos,

$$\frac{|0,987624687925 - 0,987625|}{|0,987624687925|} = 0,00003159 \quad (2.89)$$

e

$$\frac{|0,987624 - 0,987624|}{|0,987624|} = 0\%, \quad (2.90)$$

enquanto no lado direito o erro relativo é enorme:

$$\frac{|0,100000 \times 10^{-5} - 0,687925 \times 10^{-6}|}{0,687925 \times 10^{-6}} = 45,36\%. \quad (2.91)$$

◇

Exemplo 2.7.2. Considere o problema de encontrar as raízes da equação de segundo grau

$$x^2 + 300x - 0,014 = 0, \quad (2.92)$$

usando seis dígitos significativos.

Aplicando a fórmula de Bhaskara com $a = 0,100000 \times 10^1$, $b = 0,300000 \times 10^3$ e $c = 0,140000 \times 10^{-1}$, temos o discriminante:

$$\Delta = b^2 - 4 \cdot a \cdot c \quad (2.93)$$

$$= 0,300000 \times 10^3 \times 0,300000 \times 10^3 \quad (2.94)$$

$$+ 0,400000 \times 10^1 \times 0,100000 \times 10^1 \times 0,140000 \times 10^{-1} \quad (2.95)$$

$$= 0,900000 \times 10^5 + 0,560000 \times 10^{-1} \quad (2.96)$$

$$= 0,900001 \times 10^5 \quad (2.97)$$

e as raízes:

$$x_{1,2} = \frac{-0,300000 \times 10^3 \pm \sqrt{\Delta}}{0,200000 \times 10^1} \quad (2.98)$$

$$= \frac{-0,300000 \times 10^3 \pm \sqrt{0,900001 \times 10^5}}{0,200000 \times 10^1} \quad (2.99)$$

$$= \frac{-0,300000 \times 10^3 \pm 0,300000 \times 10^3}{0,200000 \times 10^1} \quad (2.100)$$

$$(2.101)$$

Então, as duas raízes obtidas com erros de arredondamento, são:

$$\begin{aligned} \tilde{x}_1 &= \frac{-0,300000 \times 10^3 - 0,300000 \times 10^3}{0,200000 \times 10^1} \\ &= -\frac{0,600000 \times 10^3}{0,200000 \times 10^1} = -0,300000 \times 10^3 \end{aligned} \quad (2.102)$$

e

$$\tilde{x}_2 = \frac{-0,300000 \times 10^3 + 0,300000 \times 10^3}{0,200000 \times 10^1} = 0,000000 \times 10^0 \quad (2.103)$$

No entanto, os valores das raízes com seis dígitos significativos livres de erros de arredondamento, são:

$$x_1 = -0,300000 \times 10^3 \quad \text{e} \quad x_2 = 0,466667 \times 10^{-4}. \quad (2.104)$$

Observe que a primeira raiz apresenta seis dígitos significativos corretos, mas a segunda não possui nenhum dígito significativo correto.

Observe que isto acontece porque b^2 é muito maior que $4ac$, ou seja, $b \approx \sqrt{b^2 - 4ac}$, logo a diferença

$$-b + \sqrt{b^2 - 4ac} \quad (2.105)$$

estará próxima de zero. Uma maneira de evitar o cancelamento catastrófico é aplicar procedimentos analíticos na expressão para eliminar essa diferença. Um técnica padrão consiste usar uma expansão em série de Taylor em torno da origem, tal como:

$$\sqrt{1-x} = 1 - \frac{1}{2}x + O(x^2). \quad (2.106)$$

Substituindo esta aproximação na fórmula de Bhaskara, temos:

$$x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (2.107)$$

$$= \frac{-b \pm b\sqrt{1 - \frac{4ac}{b^2}}}{2a} \quad (2.108)$$

$$\approx \frac{-b \pm b\left(1 - \frac{4ac}{2b^2}\right)}{2a} \quad (2.109)$$

$$(2.110)$$

Observe que $\frac{4ac}{b^2}$ é um número pequeno e por isso a expansão faz sentido. Voltamos no exemplo anterior e calculamos as duas raízes com a nova expressão

$$\tilde{x}_1 = \frac{-b - b + \frac{4ac}{2b}}{2a} = -\frac{b}{a} + \frac{c}{b} \quad (2.111)$$

$$= -\frac{0,300000 \times 10^3}{0,100000 \times 10^1} - \frac{0,140000 \times 10^{-1}}{0,300000 \times 10^3} \quad (2.112)$$

$$= -0,300000 \times 10^3 - 0,466667 \times 10^{-4} \quad (2.113)$$

$$= -0,300000 \times 10^3 \quad (2.114)$$

$$\tilde{x}_2 = \frac{-b + b - \frac{4ac}{2b}}{2a} \quad (2.115)$$

$$= -\frac{4ac}{4ab} \quad (2.116)$$

$$= -\frac{c}{b} = -\frac{-0,140000 \times 10^{-1}}{0,300000 \times 10^3} = 0,466667 \times 10^{-4} \quad (2.117)$$

$$(2.118)$$

Observe que o efeito catastrófico foi eliminado.

Observação 2.7.1. O cancelamento catastrófico também poderia ter sido evitado através do seguinte truque analítico:

$$x_2 = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \cdot \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{-b - \sqrt{b^2 - 4ac}} \quad (2.119)$$

$$= \frac{b^2 - (b^2 - 4ac)}{2a(-b - \sqrt{b^2 - 4ac})} = \frac{4ac}{2a(-b - \sqrt{b^2 - 4ac})} \quad (2.120)$$

$$= -\frac{2c}{(b + \sqrt{b^2 - 4ac})} \quad (2.121)$$

2.8 Condicionamento de um problema

Nesta seção, utilizaremos a seguinte descrição abstrata para o conceito de “resolver um problema”: dado um conjunto de dados de entrada, encontrar os dados de saída. Se denotamos pela variável x os dados de entrada e pela variável y os dados de saída, resolver o problema significa encontrar y dado x . Em termos matemáticos, a resolução de um problema é realizada pelo mapeamento $f : x \rightarrow y$, ou simplesmente $y = f(x)$.

É certo que, na maioria das aplicações, os dados de entrada do problema — isto é, x — não são conhecidos com total exatidão, devido a diversas fontes de erros, como incertezas na coleta dos dados e erros de arredondamento. O conceito de condicionamento está relacionado à forma como os erros nos dados de entrada influenciam os dados de saída.

Para fins de análise, denotaremos por x , os dados de entrada com precisão absoluta e por x^* , os dados com erro. Definiremos também a solução y^* , do problema com dados de entrada x^* , ou seja, $y^* = f(x^*)$.

Estamos interessados em saber se os erros cometidos na entrada $\Delta x = x^* - x$ influenciaram na saída do problema $\Delta y = y^* - y$. No caso mais simples, temos que $x \in \mathbb{R}$ e $y \in \mathbb{R}$. Assumindo que f seja diferenciável, a partir da série de Taylor

$$f(x + \Delta x) \approx f(x) + f'(x)\Delta x \quad (2.122)$$

obtemos (subtraindo $f(x)$ dos dois lados)

$$\Delta y = f(x + \Delta x) - f(x) \approx f'(x)\Delta x \quad (2.123)$$

Para relacionarmos os erros relativos, dividimos o lado esquerdo por y , o lado direito por $f(x) = y$ e obtemos

$$\frac{\Delta y}{y} \approx \frac{f'(x)}{f(x)} \frac{x\Delta x}{x} \quad (2.124)$$

sugerindo a definição de número de condicionamento de um problema.

Definição 2.8.1. *Seja f uma função diferenciável. O **número de condicionamento** de um problema é definido como*

$$\kappa_f(x) := \left| \frac{x f'(x)}{f(x)} \right| \quad (2.125)$$

e fornece uma estimativa de quanto os erros relativos na entrada $\left| \frac{\Delta x}{x} \right|$ serão amplificados na saída $\left| \frac{\Delta y}{y} \right|$.

De modo geral, quando f depende de várias variáveis, podemos obter

$$\delta_f = |f(x_1, x_2, \dots, x_n) - f(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n)| \approx \sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial f}{\partial x_i}(x_1, x_2, \dots, x_n) \right| \delta_{x_i} \quad (2.126)$$

Uma matriz de números de condicionamento também poderia ser obtida como em [?].

Exemplo 2.8.1. Considere o problema de calcular \sqrt{x} em $x = 2$. Se usarmos $x^* = 1,999$, quanto será o erro relativo na saída? O erro relativo na entrada é

$$\left| \frac{\Delta x}{x} \right| = \left| \frac{2 - 1,999}{2} \right| = 0,0005 \quad (2.127)$$

O número de condicionamento do problema calcular a raiz é

$$\kappa_f(x) := \left| \frac{x f'(x)}{f(x)} \right| = \left| \frac{x \frac{1}{2\sqrt{x}}}{\sqrt{x}} \right| = \frac{1}{2} \quad (2.128)$$

Ou seja, os erros na entrada serão diminuídos pela metade. De fato, usando $y = \sqrt{2} = 1,4142136\dots$ e $y^* = \sqrt{1,999} = 1,41386\dots$, obtemos

$$\frac{\Delta y}{y} = \frac{\sqrt{2} - \sqrt{1,999}}{\sqrt{2}} \approx 0,000250031\dots \quad (2.129)$$

Exemplo 2.8.2. Considere a função $f(x) = \frac{10}{1-x^2}$ e $x^* = 0,9995$ com um erro absoluto na entrada de 0,0001.

Calculando $y^* = f(x^*)$ temos

$$y^* = \frac{10}{1 - (0,9995)^2} \approx 10002,500625157739705173 \quad (2.130)$$

Mas qual é a estimativa de erro nessa resposta? Quantos dígitos significativos temos nessa resposta?

Sabendo que $f'(x) = 20x/(1-x^2)^2$, o número de condicionamento é

$$\kappa_f(x) := \left| \frac{x f'(x)}{f(x)} \right| = \left| \frac{2x^2}{1-x^2} \right| \quad (2.131)$$

o que nos fornece para $x^* = 0,9995$,

$$\kappa_f(0,9995) \approx 1998,5 \quad (2.132)$$

Como o erro relativo na entrada é

$$\left| \frac{\Delta x}{x} \right| = \left| \frac{0,0001}{0,9995} \right| \approx 0,00010005\dots \quad (2.133)$$

temos que o erro na saída será aproximadamente

$$\left| \frac{\Delta y}{y} \right| \approx \kappa_f(x) \left| \frac{\Delta x}{x} \right| \approx 1998,5 \times 0,00010005 \dots \approx 0,1999 \quad (2.134)$$

ou seja um erro relativo de aproximadamente 19,99%.

Note que se usarmos $x_1 = 0,9994$ e $x_2 = 0,9996$ (ambos no intervalo do erro absoluto da entrada) encontramos

$$y_1^* \approx 8335,83 \quad (2.135)$$

$$y_2^* \approx 12520,50 \quad (2.136)$$

confirmando a estimativa de 19,99%.

Exemplo 2.8.3. Seja $f(x) = x \exp(x)$. Calcule o erro absoluto ao calcular $f(x)$ sabendo que $x = 2 \pm 0,05$.

Solução. Temos que $x \approx 2$ com erro absoluto de $\delta_x = 0,05$. Neste caso, calculamos δ_f , isto é, o erro absoluto ao calcular $f(x)$, por:

$$\delta_f = |f'(x)|\delta_x. \quad (2.137)$$

Como $f'(x) = (1+x)e^x$, temos:

$$\delta_f = |(1+x)e^x| \cdot \delta_x \quad (2.138)$$

$$= |3e^2| \cdot 0,05 = 1,1084. \quad (2.139)$$

Portanto, o erro absoluto ao calcular $f(x)$ quando $x = 2 \pm 0,05$ é de 1,1084. \diamond

Exemplo 2.8.4. Calcule o erro relativo ao medir $f(x,y) = \frac{x^2+1}{x^2}e^{2y}$ sabendo que $x \approx 3$ é conhecido com 10% de erro e $y \approx 2$ é conhecido com 3% de erro.

Solução. Calculamos as derivadas parciais de f :

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \frac{2x^3 - (2x^3 + 2x)}{x^4} e^{2y} = -\frac{2e^{2y}}{x^3} \quad (2.140)$$

e

$$\frac{\partial f}{\partial y} = 2 \frac{x^2 + 1}{x^2} e^{2y} \quad (2.141)$$

Calculamos o erro absoluto em termos do erro relativo:

$$\frac{\delta_x}{|x|} = 0,1 \Rightarrow \delta_x = 3 \cdot 0,1 = 0,3 \quad (2.142)$$

$$\frac{\delta_y}{|y|} = 0,03 \Rightarrow \delta_y = 2 \cdot 0,03 = 0,06 \quad (2.143)$$

Aplicando a expressão para estimar o erro em f temos

$$\delta_f = \left| \frac{\partial f}{\partial x} \right| \delta_x + \left| \frac{\partial f}{\partial y} \right| \delta_y \quad (2.144)$$

$$= \frac{2e^4}{27} \cdot 0,3 + 2^{\frac{9+1}{9}} e^4 \cdot 0,06 = 8,493045557 \quad (2.145)$$

Portanto, o erro relativo ao calcular f é estimado por

$$\frac{\delta f}{|f|} = \frac{8,493045557}{\frac{9+1}{9} e^4} = 14\% \quad (2.146)$$

◇

Exemplo 2.8.5. No exemplo anterior, reduza o erro relativo em x pela metade e calcule o erro relativo em f . Depois, repita o processo reduzindo o erro relativo em y pela metade.

Solução. Na primeira situação temos $x = 3$ com erro relativo de 5% e $\delta_x = 0,05 \cdot 3 = 0,15$. Calculamos $\delta_f = 7,886399450$ e o erro relativo em f de 13%. Na segunda situação, temos $y = 2$ com erro de 1,5% e $\delta_y = 2 \cdot 0,015 = 0,03$. Calculamos $\delta_f = 4,853168892$ e o erro relativo em f de 8%. Observe que mesma o erro relativo em x sendo maior, o erro em y é mais significativo na função. ◇

Exemplo 2.8.6. Considere um triângulo retângulo onde a hipotenusa e um dos catetos são conhecidos a menos de um erro: hipotenusa $a = 3 \pm 0,01$ metros e cateto $b = 2 \pm 0,01$ metros. Calcule o erro absoluto ao calcular a área dessa triângulo.

Solução. Primeiro vamos encontrar a expressão para a área em função da hipotenusa a e um cateto b . A tamanho de segundo cateto c é dado pelo teorema de Pitágoras, $a^2 = b^2 + c^2$, ou seja, $c = \sqrt{a^2 - b^2}$. Portanto a área é

$$A = \frac{bc}{2} = \frac{b\sqrt{a^2 - b^2}}{2}. \quad (2.147)$$

Agora calculamos as derivadas

$$\frac{\partial A}{\partial a} = \frac{ab}{2\sqrt{a^2 - b^2}}, \quad (2.148)$$

$$\frac{\partial A}{\partial b} = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{2} - \frac{b^2}{2\sqrt{a^2 - b^2}}, \quad (2.149)$$

e substituindo na estimativa para o erro δ_A em termos de $\delta_a = 0,01$ e $\delta_b = 0,01$:

$$\delta_A \approx \left| \frac{\partial A}{\partial a} \right| \delta_a + \left| \frac{\partial A}{\partial b} \right| \delta_b \quad (2.150)$$

$$\approx \frac{3\sqrt{5}}{5} \cdot 0,01 + \frac{\sqrt{5}}{10} \cdot 0,01 = 0,01565247584 \quad (2.151)$$

Em termos do erro relativo temos erro na hipotenusa de $\frac{0,01}{3} \approx 0,333\%$, erro no cateto de $\frac{0,01}{2} = 0,5\%$ e erro na área de

$$\frac{0,01565247584}{\frac{2\sqrt{3^2-2^2}}{2}} = 0,7\% \quad (2.152)$$

◇

Exercícios

E 2.8.1. Considere que a variável $x \approx 2$ é conhecida com um erro relativo de 1% e a variável $y \approx 10$ com um erro relativo de 10%. Calcule o erro relativo associado a z quando:

$$z = \frac{y^4}{1 + y^4} e^x. \quad (2.153)$$

Suponha que você precise conhecer o valor de z com um erro de 0,5%. Você propõe uma melhoria na medição da variável x ou y ? Explique.

E 2.8.2. A corrente I em ampéres e a tensão V em volts em uma lâmpada se relacionam conforme a seguinte expressão:

$$I = \left(\frac{V}{V_0} \right)^\alpha, \quad (2.154)$$

onde α é um número entre 0 e 1 e V_0 é tensão nominal em volts. Sabendo que $V_0 = 220 \pm 3\%$ e $\alpha = -0,8 \pm 4\%$, calcule a corrente e o erro relativo associado quando a tensão vale $220 \pm 1\%$.

Obs.: Este problema pode ser resolvido de duas formas distintas: usando a expressão aproximada para a propagação de erro e inspecionando os valores máximos e mínimos que a expressão pode assumir. Pratique os dois métodos. **Dica:** lembre que $x^\alpha = e^{\alpha \ln(x)}$

2.9 Exemplos selecionados de cancelamento catastrófico

Exemplo 2.9.1. Considere o seguinte processo iterativo:

$$x^{(1)} = \frac{1}{3} \quad (2.155)$$

$$x^{(n+1)} = 4x^{(n)} - 1, \quad n = 1, 2, \dots \quad (2.156)$$

Observe que $x^{(1)} = \frac{1}{3}$, $x^{(2)} = 4 \cdot \frac{1}{3} - 1 = \frac{1}{3}$, $x^{(3)} = \frac{1}{3}$, ou seja, temos uma sequência constante igual a $\frac{1}{3}$. No entanto, ao calcularmos no computador, usando o sistema de numeração **double**, a sequência obtida não é constante e, de fato, diverge.

Faça o teste no **GNU Octave**, colocando:

```
>> x = 1/3
```

e itere algumas vezes a linha de comando:

```
>> x = 4*x-1
```

Para compreender o que acontece, devemos levar em consideração que o número $\frac{1}{3} = 0,\overline{3}$ possui uma representação infinita tanto na base decimal quanto na base binária. Logo, sua representação de máquina inclui um erro de arredondamento. Seja ϵ a diferença entre o valor exato de $\frac{1}{3}$ e sua representação de máquina, isto é, $\tilde{x}^{(1)} = \frac{1}{3} + \epsilon$. A sequência efetivamente calculada no computador é:

$$\tilde{x}^{(1)} = \frac{1}{3} + \epsilon \quad (2.157)$$

$$\tilde{x}^{(2)} = 4x^{(1)} - 1 = 4\left(\frac{1}{3} + \epsilon\right) - 1 = \frac{1}{3} + 4\epsilon \quad (2.158)$$

$$\tilde{x}^{(3)} = 4x^{(2)} - 1 = 4\left(\frac{1}{3} + 4\epsilon\right) - 1 = \frac{1}{3} + 4^2\epsilon \quad (2.159)$$

$$\vdots \quad (2.160)$$

$$\tilde{x}^{(n)} = \frac{1}{3} + 4^{(n-1)}\epsilon \quad (2.161)$$

Portanto o limite da sequência diverge,

$$\lim_{x \rightarrow \infty} |\tilde{x}^{(n)}| = \infty \quad (2.162)$$

Qual o número de condicionamento desse problema?

Exemplo 2.9.2. Observe a seguinte identidade

$$f(x) = \frac{(1+x) - 1}{x} = 1 \quad (2.163)$$

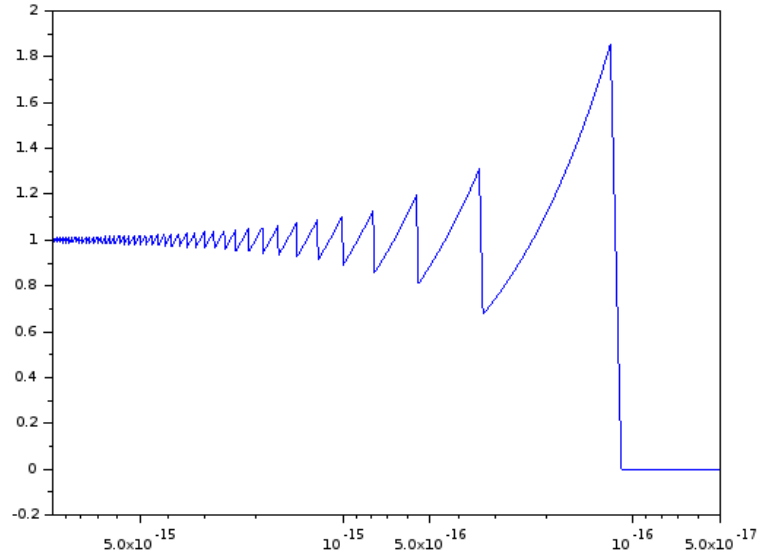


Figure 2.1: Gráfico na função do Exemplo 2.9.2.

Calcule o valor da expressão à esquerda para $x = 10^{-12}$, $x = 10^{-13}$, $x = 10^{-14}$, $x = 10^{-15}$, $x = 10^{-16}$ e $x = 10^{-17}$. Observe que quando x se aproxima do ϵ de máquina a expressão perde o significado. Veja a Figura 2.1 com o gráfico de $f(x)$ em escala logarítmica.

Exemplo 2.9.3. Neste exemplo, estamos interessados em compreender mais detalhadamente o comportamento da expressão

$$\left(1 + \frac{1}{n}\right)^n \quad (2.164)$$

quando n é um número grande ao computá-la em sistemas de numeral de ponto flutuante com acurácia finita. Um resultado bem conhecido do cálculo nos diz que o limite de (2.164) quando n tende a infinito é o número de Euler:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n = e = 2,718281828459... \quad (2.165)$$

Sabemos também que a sequência produzida por (2.164) é crescente, isto é:

$$\left(1 + \frac{1}{1}\right)^1 < \left(1 + \frac{1}{2}\right)^2 < \left(1 + \frac{1}{3}\right)^3 < \dots \quad (2.166)$$

No entanto, quando calculamos essa expressão no **Julia**, nos defrontamos com o seguinte resultado:

Prof. M.e Daniel Cassimiro

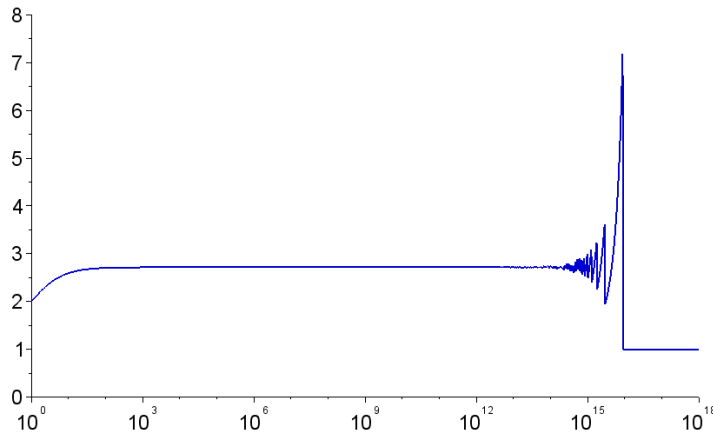


Figure 2.2: Gráfico de $\left(1 + \frac{1}{n}\right)^n$ em função de n em escala linear-logarítmica variando de 10^0 até 10^{18} . Veja o Exemplo 2.9.3.

n	$\left(1 + \frac{1}{n}\right)^n$		n	$\left(1 + \frac{1}{n}\right)^n$
1	2,00000000000000		10^2	2,7048138294215
2	2,25000000000000		10^4	2,7181459268249
3	2,3703703703704		10^6	2,7182804690957
4	2,4414062500000		10^8	2,7182817983391
5	2,4883200000000		10^{10}	2,7182820532348
6	2,5216263717421		10^{12}	2,7185234960372
7	2,5464996970407		10^{14}	2,7161100340870
8	2,5657845139503		10^{16}	1,00000000000000
9	2,5811747917132		10^{18}	1,00000000000000
10	2,5937424601000		10^{20}	1,00000000000000

Podemos resumir esses dados no gráfico de $\left(1 + \frac{1}{n}\right)^n$ em função de n , veja a Figura 2.9.

Observe que quando n se torna grande, da ordem de 10^{15} , o gráfico da função

deixa de ser crescente e apresenta oscilações. Observe também que a expressão se torna identicamente igual a 1 depois de um certo limiar. Tais fenômenos não são intrínsecos da função $f(n) = (1 + 1/n)^n$, mas **oriundas de erros de arredondamento**, isto é, são resultados numéricos espúrios. A fim de pôr o comportamento numérico de tal expressão, apresentamos abaixo o gráfico da mesma função, porém restrito à região entre 10^{14} e 10^{16} .

Para compreendermos melhor por que existe um limiar N que, quando atingido torna a expressão do exemplo acima identicamente igual a 1, observamos a sequência de operações realizadas pelo computador:

$$n \rightarrow 1/n \rightarrow 1 + 1/n \rightarrow (1 + 1/n)^n \quad (2.167)$$

Devido ao limite de precisão da representação de números em ponto flutuante, existe um menor número representável que é maior do que 1. Este número é $1+\text{eps}$, onde **eps** é chamado de **épsilon de máquina** e é o menor número que somado a 1 produz um resultado superior a 1 no sistema de numeração usado. O épsilon de máquina no sistema de numeração **double** vale aproximadamente $2,22 \times 10^{-16}$.

No GNU Octave, o épsilon de máquina é a constante **eps**. Observe que:

```
>> printf('%1.25f\n', 1+eps)
1.00000000000000002220446049
```

Quando somamos a 1 um número positivo inferior ao épsilon de máquina, obtemos o número 1. Dessa forma, o resultado obtido pela operação de ponto flutuante $1 + n$ para $0 < n < 2,22 \times 10^{-16}$ é 1.

Portanto, quando realizamos a sequência de operações dada em (2.167), toda informação contida no número n é perdida na soma com 1 quando $1/n$ é menor que o épsilon de máquina, o que ocorre quando $n > 5 \times 10^{15}$. Assim, $(1 + 1/n)$ é aproximado para 1 e a última operação se resume a 1^n , o que é igual a 1 mesmo quando n é grande.

Um erro comum é acreditar que o perda de significância se deve ao fato de $1/n$ ser muito pequeno para ser representado e é aproximando para 0. Isto é falso, o sistema de ponto de flutuante permite representar números de magnitude muito inferior ao épsilon de máquina. O problema surge da limitação no tamanho da mantissa. Observe como a seguinte sequência de operações não perde significância para números positivos x muito menores que o épsilon de máquina:

$$n \rightarrow 1/n \rightarrow 1/(1/n) \quad (2.168)$$

compare o desempenho numérico desta sequência de operações para valores pequenos de n com o da seguinte sequência:

$$n \rightarrow 1 + n \rightarrow (1 + n) - 1. \quad (2.169)$$

Finalmente, notamos que quando tentamos calcular $\left(1 + \frac{1}{n}\right)^n$ para n grande, existe perda de significância no cálculo de $1 + 1/n$.

Para entendermos isso melhor, vejamos o que acontece no GNU Octave quando $n = 7 \times 10^{13}$:

```
>> format('long')
>> n=7e13
n = 70000000000000
>> 1/n
ans = 1.42857142857143e-14
>> y=1+1/n
y = 1.000000000000001
```

Observe a perda de informação ao deslocar a mantissa de $1/n$. Para evidenciar o fenômeno, observamos o que acontece quando tentamos recalcular n subtraindo 1 de $1 + 1/n$ e invertendo o resultado:

```
>> y-1
ans = 1.42108547152020e-14
>> 1/(y-1)
ans = 70368744177664
```

Exemplo 2.9.4 (Analogia da balança). Observe a seguinte comparação interessante que pode ser feita para ilustrar os sistemas de numeração com ponto fixo e flutuante: o sistema de ponto fixo é como uma balança cujas marcas estão igualmente espaçadas; o sistema de ponto flutuante é como uma balança cuja distância entre as marcas é proporcional à massa medida. Assim, podemos ter uma balança de ponto fixo cujas marcas estão sempre distanciadas de 100g (100g, 200g, 300g, ..., 1kg, 1,1kg,...) e outra balança de ponto flutuante cujas marcas estão distanciadas sempre de aproximadamente um décimo do valor lido (100g, 110g, 121g, 133g, ..., 1kg, 1,1kg, 1,21kg, ...) A balança de ponto fixo apresenta uma resolução baixa para pequenas medidas, porém uma resolução alta para grandes medidas. A balança de ponto flutuante distribui a resolução de forma proporcional ao longo da escala.

Seguindo nesta analogia, o fenômeno de perda de significância pode ser interpretado como a seguir: imagine que você deseje obter o peso de um gato (aproximadamente 4kg). Dois processos estão disponíveis: colocar o gato diretamente na balança ou medir seu peso com o gato e, depois, sem o gato. Na balança de ponto flutuante, a incerteza associada à medida do peso do gato (sozinho) é aproximadamente 10% de 4kg, isto é, 400g. Já a incerteza associada à medida da uma pessoa (aproximadamente 70kg) com o gato é de 10% do peso total, isto é, aproximadamente 7kg. Esta incerteza é da mesma ordem de grandeza da medida a ser realizada, tornando o processo impossível de ser realizado, já que teríamos uma incerteza da ordem de 14kg (devido à dupla medição) sobre uma grandeza de 4kg.

Exercícios resolvidos

ER 2.9.1. Deseja-se medir a concentração de dois diferentes oxidantes no ar. Três sensores eletroquímicos estão disponíveis para a medida e apresentam a seguintes respostas:

$$v_1 = 270[A] + 30[B], \quad v_2 = 140[A] + 20[B] \quad \text{e} \quad v_3 = 15[A] + 200[B] \quad (2.170)$$

as tensões v_1 , v_2 e v_3 são dadas em mV e as concentrações em $milimol/l$.

- a) Encontre uma expressão para os valores de $[A]$ e $[B]$ em termos de v_1 e v_2 e, depois, em termos de v_1 e v_3 . Dica: Se $ad \neq bc$, então a matriz A dada por

$$A = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \quad (2.171)$$

é inversível e sua inversa é dada por

$$A^{-1} = \frac{1}{ad - bc} \begin{bmatrix} d & -b \\ -c & a \end{bmatrix}. \quad (2.172)$$

- b) Sabendo que incerteza relativa associada às sensibilidades dos sensores 1 e 2 é de 2% e que a incerteza relativa associada às sensibilidades do sensor 3 é 10%, verifique a incerteza associada à medida feita com o par 1 – 2 e o par 1 – 3. Use $[A] = [B] = 10milimol/l$. Dica: Você deve diferenciar as grandezas $[A]$ e $[B]$ em relação aos valores das tensões.

Solução. Em ambos casos, temos a seguinte estrutura:

$$\begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [A] \\ [B] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \quad (2.173)$$

De forma que

$$\begin{bmatrix} [A] \\ [B] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21}} \begin{bmatrix} S_{22} & -S_{12} \\ -S_{21} & S_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \quad (2.174)$$

Portanto

$$[A] = \frac{S_{22}v_1 - S_{12}v_2}{S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21}} \quad (2.175)$$

$$[B] = \frac{-S_{21}v_1 + S_{11}v_2}{S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21}} \quad (2.176)$$

Usando derivação logarítmica, temos

$$\frac{1}{[A]} \frac{\partial[A]}{\partial S_{11}} = -\frac{S_{22}}{S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21}} \quad (2.177)$$

$$\frac{1}{[A]} \frac{\partial[A]}{\partial S_{12}} = -\frac{v_2}{S_{22}v_1 - S_{12}v_2} + \frac{S_{21}}{S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21}} \quad (2.178)$$

$$= -\frac{[A]}{[B]} \cdot \frac{S_{22}}{S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21}} \quad (2.179)$$

$$\frac{1}{[A]} \frac{\partial[A]}{\partial S_{21}} = \frac{S_{12}}{S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21}} \quad (2.180)$$

$$\frac{1}{[A]} \frac{\partial[A]}{\partial S_{22}} = \frac{v_1}{S_{22}v_1 - S_{12}v_2} - \frac{S_{11}}{S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21}} \quad (2.181)$$

$$= \frac{[A]}{[B]} \cdot \frac{S_{12}}{S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21}} \quad (2.182)$$

e

$$\frac{1}{[B]} \frac{\partial[B]}{\partial S_{11}} = \frac{v_2}{-S_{21}v_1 + S_{11}v_2} - \frac{S_{22}}{S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21}} \quad (2.183)$$

$$= \frac{[B]}{[A]} \frac{S_{21}}{S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21}} \quad (2.184)$$

$$\frac{1}{[B]} \frac{\partial[B]}{\partial S_{12}} = \frac{S_{21}}{S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21}} \quad (2.185)$$

$$\frac{1}{[B]} \frac{\partial[B]}{\partial S_{21}} = -\frac{v_1}{-S_{21}v_1 + S_{11}v_2} + \frac{S_{21}}{S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21}} \quad (2.186)$$

$$= -\frac{[B]}{[A]} \frac{S_{11}}{S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21}} \quad (2.187)$$

$$\frac{1}{[B]} \frac{\partial[B]}{\partial S_{22}} = -\frac{S_{11}}{S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21}} \quad (2.188)$$

$$(2.189)$$

E o erro associado às medidas pode ser aproximado por

$$\frac{1}{[A]} \delta_{[A]} = \left| \frac{1}{[A]} \frac{\partial[A]}{\partial S_{11}} \right| \delta_{S_{11}} + \left| \frac{1}{[A]} \frac{\partial[A]}{\partial S_{12}} \right| \delta_{S_{12}} \quad (2.190)$$

$$+ \left| \frac{1}{[A]} \frac{\partial[A]}{\partial S_{21}} \right| \delta_{S_{21}} + \left| \frac{1}{[A]} \frac{\partial[A]}{\partial S_{22}} \right| \delta_{S_{22}} \quad (2.191)$$

$$= \frac{1}{|\det S|} \left[S_{22} \delta_{S_{11}} + \frac{[A]}{[B]} S_{22} \delta_{S_{12}} + S_{12} \delta_{S_{21}} + \frac{[A]}{[B]} S_{12} \delta_{S_{22}} \right] \quad (2.192)$$

Analogamente, temos:

$$\frac{1}{[B]}\delta_{[B]} = \frac{1}{|\det S|} \left[\frac{[B]}{[A]} S_{21} \delta_{S_{11}} + S_{21} \delta_{S_{11}} + \frac{[B]}{[A]} S_{11} \delta_{S_{21}} + S_{11} \delta_{S_{22}} \right] \quad (2.193)$$

onde não se indicou $|S_{ij}|$ nem $||\cdot||$ pois são todos positivos.

Fazemos agora a aplicação numérica:

Caso do par 1-2:

$$\det S = \begin{vmatrix} 270 & 30 \\ 140 & 20 \end{vmatrix} = 1200 \quad (2.194)$$

$$\frac{1}{[A]}\delta_{[A]} = \frac{1}{1200} [20 \times 270 \times 2\% + 20 \times 30 \times 2\% \quad (2.195)$$

$$+ 30 \times 140 \times 2\% + 30 \times 20 \times 2\%] \quad (2.196)$$

$$= \frac{216}{1200} = 0.18 = 18\% \quad (2.197)$$

$$\frac{1}{[B]}\delta_{[B]} = \frac{1}{1200} [140 \times 270 \times 2\% + 140 \times 30 \times 2\% \quad (2.198)$$

$$+ 270 \times 140 \times 2\% + 270 \times 20 \times 2\%] \quad (2.199)$$

$$= \frac{426}{1200} = 0.355 = 35.5\% \quad (2.200)$$

Caso do par 1-3:

$$\det S = \begin{vmatrix} 270 & 30 \\ 15 & 200 \end{vmatrix} = 53550 \quad (2.201)$$

$$\frac{1}{[A]}\delta_{[A]} = \frac{1}{53550} [200 \times 270 \times 2\% + 200 \times 30 \times 2\% \quad (2.202)$$

$$+ 30 \times 15 \times 10\% + 30 \times 200 \times 10\%] \quad (2.203)$$

$$= \frac{1804,6}{52550} \approx 0.0337 = 3.37\% \quad (2.204)$$

$$\frac{1}{[B]}\delta_{[B]} = \frac{1}{53550} [15 \times 270 \times 2\% + 15 \times 30 \times 2\% \quad (2.205)$$

$$+ 270 \times 15 \times 10\% + 270 \times 200 \times 10\%] \quad (2.206)$$

$$= \frac{5895}{53550} \approx 0.11 = 11\% \quad (2.207)$$

Conclusão, apesar de o sensor 3 apresentar uma incerteza cinco vezes maior na sensibilidade, a escolha do sensor 3 para fazer par ao sensor 1 parece mais adequada.

◇

Exercícios**E 2.9.1.** Considere as expressões:

$$\frac{\exp(1/\mu)}{1 + \exp(1/\mu)} \quad (2.208)$$

e

$$\frac{1}{\exp(-1/\mu) + 1} \quad (2.209)$$

com $\mu > 0$. Verifique que elas são idênticas como funções reais. Teste no computador cada uma delas para $\mu = 0,1$, $\mu = 0,01$ e $\mu = 0,001$. Qual dessas expressões é mais adequada quando μ é um número pequeno? Por quê?

E 2.9.2. Encontre expressões alternativas para calcular o valor das seguintes funções quando x é próximo de zero.

a) $f(x) = \frac{1 - \cos(x)}{x^2}$

b) $g(x) = \sqrt{1+x} - 1$

c) $h(x) = \sqrt{x + 10^6} - 10^3$

d) $i(x) = \sqrt{1 + e^x} - \sqrt{2}$ Dica: Faça $y = e^x - 1$

E 2.9.3. Use uma identidade trigonométrica adequada para mostrar que:

$$\frac{1 - \cos(x)}{x^2} = \frac{1}{2} \left(\frac{\sin(x/2)}{x/2} \right)^2. \quad (2.210)$$

Análise o desempenho destas duas expressões no computador quando x vale 10^{-5} , 10^{-6} , 10^{-7} , 10^{-8} , 10^{-9} , 10^{-200} e 0. Discuta o resultado. **Dica:** Para $|x| < 10^{-5}$, $f(x)$ pode ser aproximada por $1/2 - x^2/24$ com erro de truncamento inferior a 10^{-22} .

E 2.9.4. Reescreva as expressões:

$$\sqrt{e^{2x} + 1} - e^x \quad \text{e} \quad \sqrt{e^{2x} + x^2} - e^x \quad (2.211)$$

de modo que seja possível calcular seus valores para $x = 100$ utilizando a aritmética de ponto flutuante ("Double") no computador.

E 2.9.5. Na teoria da relatividade restrita, a energia cinética de uma partícula e sua velocidade se relacionam pela seguinte fórmula:

$$E = mc^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} - 1 \right), \quad (2.215)$$

onde E é a energia cinética da partícula, m é a massa de repouso, v o módulo da velocidade e c a velocidade da luz no vácuo dada por $c = 299792458 m/s$. Considere que a massa de repouso $m = 9,10938291 \times 10^{-31} kg$ do elétron seja conhecida com erro relativo de 10^{-9} . Qual é o valor da energia e o erro relativo associado a essa grandeza quando $v = 0,1c$, $v = 0,5c$, $v = 0,99c$ e $v = 0,999c$ sendo que a incerteza relativa na medida da velocidade é 10^{-5} ?

Chapter 3

Solução de equações de uma variável

Neste capítulo, construiremos aproximações numéricas para a solução de **equações algébricas em uma única variável real**. Observamos que obter uma solução para uma dada equação é equivalente a encontrar um **zero de uma função real** apropriada. Com isso, iniciamos este capítulo discutindo condições de existência e unicidade de raízes de funções de uma variável real. Então, apresentamos o **método da bisseção** como uma primeira abordagem numérica para a solução de tais equações.

Em seguida, exploramos outra abordagem via **iteração do ponto fixo**. Desta, obtemos o **método de Newton**¹, para o qual estudamos aplicações e critérios de convergência. Por fim, apresentamos o **método das secantes** como uma das possíveis variações do método de Newton.

Ao longo do capítulo, apresentamos algumas computações com Python. Nestas, assumiremos o que os seguintes módulos estão carregados:

```
>>> import numpy as np
>>> import matplotlib.pyplot as plt
>>> import scipy as sp
>>> from scipy import optimize
```

A segunda instrução carrega a biblioteca de computação científica [numpy](#) e a terceira carrega a biblioteca gráfica [matplotlib](#).

¹Sir Isaac Newton, 1642 - 1727, matemático e físico inglês.

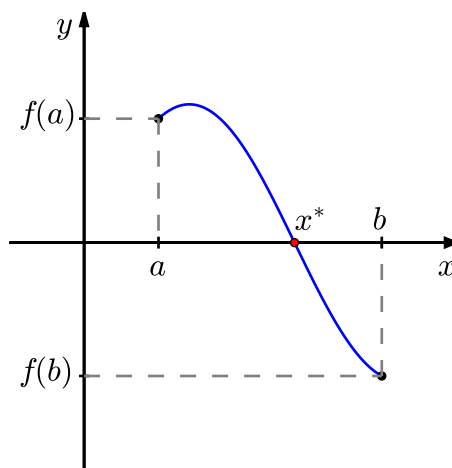


Figure 3.1: Teorema de Bolzano.

3.1 Existência e unicidade

O **teorema de Bolzano**² nos fornece condições suficientes para a existência do zero de uma função. Este é uma aplicação direta do **teorema do valor intermediário**.

Teorema 3.1.1 (Teorema de Bolzano). *Se $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$, $y = f(x)$, é uma função contínua tal que $f(a) \cdot f(b) < 0$ ³, então existe $x^* \in (a, b)$ tal que $f(x^*) = 0$.*

Proof. O resultado é uma consequência imediata do teorema do valor intermediário que estabelece que dada uma função contínua $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$, $y = f(x)$, tal que $f(a) < f(b)$ (ou $f(b) < f(a)$), então para qualquer $d \in (f(a), f(b))$ (ou $k \in (f(b), f(a))$) existe $x^* \in (a, b)$ tal que $f(x^*) = k$. Ou seja, nestas notações, se $f(a) \cdot f(b) < 0$, então $f(a) < 0 < f(b)$ (ou $f(b) < 0 < f(a)$). Logo, tomando $k = 0$, temos que existe $x^* \in (a, b)$ tal que $f(x^*) = k = 0$. \square

Em outras palavras, se $f(x)$ é uma função contínua em um dado intervalo no qual ela troca de sinal, então ela tem pelo menos um zero neste intervalo (veja a Figura 4.1).

Exemplo 3.1.1. Mostre que existe pelo menos uma solução da equação $e^x = x + 2$ no intervalo $(-2, 0)$.

²Bernhard Placidus Johann Gonzal Nepomuk Bolzano, 1781 - 1848, matemático do Reino da Boêmia.

³Esta condição é equivalente a dizer que a função troca de sinal no intervalo.

Solução. Primeiramente, observamos que resolver a equação $e^x = x+2$ é equivalente a resolver $f(x) = 0$ com $f(x) = e^x - x - 2$. Agora, como $f(-2) = e^{-2} > 0$ e $f(0) = -1 < 0$, temos do teorema de Bolzano que existe pelo menos um zero de $f(x)$ no intervalo $(-2, 0)$. E, portanto, existe pelo menos uma solução da equação dada no intervalo $(-2, 0)$.

Podemos usar o GNU Octave para estudar esta função. Por exemplo, podemos definir a função $f(x)$ e computá-la nos extremos do intervalo dado com os seguintes comandos:

```
>> f = @(x) exp(x)-x-2
f = f(x) = exp(x)-x-2
>> f(-2),f(0)
ans = 0.13534
ans = -1
```

Alternativamente (e com maior precisão), podemos verificar diretamente o sinal da função nos pontos desejados com comando `sign`:

```
>> sign(f(-2)),sign(f(0))
ans = 1
ans = -1
```

◇

Quando procuramos aproximações para zeros de funções, é aconselhável isolar cada raiz em um intervalo. Desta forma, gostaríamos de poder garantir a existência e a unicidade da raiz dentro de um dado intervalo. A seguinte proposição nos fornece condições suficientes para tanto.

Proposição 3.1.1. *Se $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ é uma função diferenciável, $f(a) \cdot f(b) < 0$ e $f'(x) > 0$ (ou $f'(x) < 0$) para todo $x \in (a, b)$, então existe um único $x^* \in (a, b)$ tal que $f(x^*) = 0$.*

Em outras palavras, para garantirmos que exista um único zero de uma dada função diferenciável em um intervalo, é suficiente que ela troque de sinal e seja monótona neste intervalo.

Exemplo 3.1.2. No Exemplo 4.1.1, mostramos que existe pelo menos um zero de $f(x) = e^x - x - 2$ no intervalo $(-2, 0)$, pois $f(x)$ é contínua e $f(-2) \cdot f(0) < 0$. Agora, observamos que, além disso, $f'(x) = e^x - 1$ e, portanto, $f'(x) < 0$ para todo $x \in (-2, 0)$. Logo, da Proposição 4.1.1, temos garantida a existência de um único zero no intervalo dado.

Podemos inspecionar o comportamento da função $f(x) = e^x - x - 2$ e de sua derivada fazendo seus gráficos no GNU Octave. Para tanto, podemos fazer o seguinte teste:


```
>> xx = linspace(-2,0,50);
>> f = @(x) exp(x)-x-2 #define f
f = f(x) = exp(x)-x-2
>> plot(xx,f(xx))grid on;hold on #gráfico de f
>> fl = @(x) exp(x)-1 #a derivada
fl = f(x) = exp(x)-1
>> plot(xx,fl(xx)) #gráfico de f'
```

A discussão feita nesta seção, especialmente o teorema de Bolzano, nos fornece os fundamentos para o método da bisseção, o qual discutimos na próxima seção.

Exercícios

E 3.1.1. Mostre que $\cos x = x$ tem solução no intervalo $[0, \pi/2]$.

E 3.1.2. Mostre que $\cos x = x$ tem uma única solução no intervalo $[0, \pi/2]$.

E 3.1.3. Interprete a equação $\cos(x) = kx$ como o problema de encontrar a intersecção da curva $y = \cos(x)$ com $y = kx$. Encontre o valor positivo k para o qual essa equação admite exatamente duas raízes positivas distintas.

E 3.1.4. Mostre que a equação:

$$\ln(x) + x^3 - \frac{1}{x} = 10 \quad (3.1)$$

possui uma única solução positiva.

E 3.1.5. Use o teorema de Bolzano para mostrar que o erro absoluto ao aproximar o zero da função $f(x) = e^x - x - 2$ por $\bar{x} = -1,841$ é menor que 10^{-3} .

E 3.1.6. Mostre que o erro absoluto associado à aproximação $\bar{x} = 1,962$ para a solução exata x^* de:

$$e^x + \sin(x) + x = 10 \quad (3.2)$$

é menor que 10^{-4} .

E 3.1.7. Mostre que a equação

$$\ln(x) + x - \frac{1}{x} = v \quad (3.3)$$

possui uma solução para cada v real e que esta solução é única.

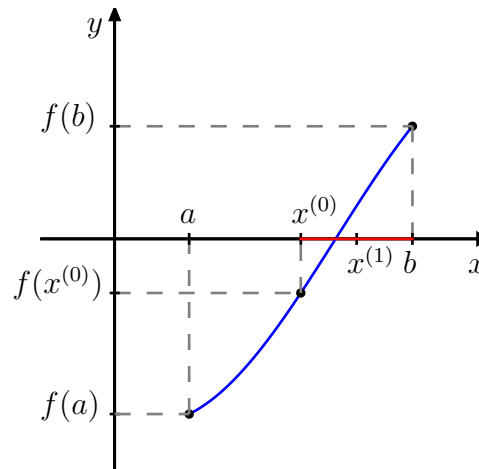


Figure 3.2: Método da biseção.

3.2 Método da biseção

O **método da biseção** explora o fato de que uma função contínua $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ com $f(a) \cdot f(b) < 0$ tem um zero no intervalo (a, b) (veja o teorema de Bolzano 4.1.1). Assim, a ideia para aproximar o zero de uma tal função $f(x)$ é tomar, como aproximação inicial, o ponto médio do intervalo $[a, b]$, isto é:

$$x^{(0)} = \frac{(a + b)}{2}. \quad (3.4)$$

Pode ocorrer de $f(x^{(0)}) = 0$ e, neste caso, o zero de $f(x)$ é $x^* = x^{(0)}$. Caso contrário, se $f(a) \cdot f(x^{(0)}) < 0$, então $x^* \in (a, x^{(0)})$. Neste caso, tomamos como nova aproximação do zero de $f(x)$ o ponto médio do intervalo $[a, x^{(0)}]$, isto é, $x^{(1)} = (a + x^{(0)})/2$. No outro caso, temos $f(x^{(0)}) \cdot f(b) < 0$ e, então, tomamos $x^{(1)} = (x^{(0)} + b)/2$. Repetimos este procedimento até obtermos a aproximação desejada (veja Figura 4.2).

De forma mais precisa, suponha que queiramos calcular uma aproximação com uma certa precisão TOL para um zero x^* de uma dada função contínua $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ tal que $f(a) \cdot f(b) < 0$. Iniciamos, tomando $n = 0$ e:

$$a^{(n)} = a, \quad b^{(n)} = b \quad \text{e} \quad x^{(n)} = \frac{a^{(n)} + b^{(n)}}{2}. \quad (3.5)$$

Verificamos o **critério de parada**, isto é, se $f(x^{(n)}) = 0$ ou:

$$\frac{|b^{(n)} - a^{(n)}|}{2} < TOL, \quad (3.6)$$

Table 3.1: Iteração do método da bisseção para o Exemplo 4.2.1.

n	$a^{(n)}$	$b^{(n)}$	$x^{(n)}$	$f(a^{(n)})f(x^{(n)})$	$\frac{ b^{(n)} - a^{(n)} }{2}$
0	-2	0	-1	< 0	1
1	-2	-1	-1,5	< 0	0,5
2	-2	-1,5	-1,75	< 0	0,25
3	-2	-1,75	-1,875	> 0	0,125
4	-1,875	-1,75	-1,8125	< 0	0,0625

então $x^{(n)}$ é a aproximação desejada. Caso contrário, preparamos a próxima iteração $n+1$ da seguinte forma: se $f(a^{(n)}) \cdot f(x^{(n)}) < 0$, então definimos $a^{(n+1)} = a^{(n)}$ e $b^{(n+1)} = x^{(n)}$; no outro caso, se $f(x^{(n)}) \cdot f(b^{(n)}) < 0$, então definimos $a^{(n+1)} = x^{(n)}$ e $b^{(n+1)} = b^{(n)}$. Trocando n por $n+1$, temos a nova aproximação do zero de $f(x)$ dada por:

$$x^{(n+1)} = \frac{a^{(n+1)} + b^{(n+1)}}{2}. \quad (3.7)$$

Voltamos a verificar o critério de parada acima e, caso não satisfeito, iteramos novamente. Iteramos até obtermos a aproximação desejada ou o número máximo de iterações ter sido atingido.

Exemplo 3.2.1. Use o método da bisseção para calcular uma solução de $e^x = x+2$ no intervalo $[-2, 0]$ com precisão $TOL = 10^{-1}$.

Solução. Primeiramente, observamos que resolver a equação dada é equivalente a calcular o zero de $f(x) = e^x - x - 2$. Além disso, temos $f(-2) \cdot f(0) < 0$. Desta forma, podemos iniciar o método da bisseção tomando o intervalo inicial $[a^{(0)}, b^{(0)}] = [-2, 0]$ e:

$$x^{(0)} = \frac{a^{(0)} + b^{(0)}}{2} = -1. \quad (3.8)$$

Apresentamos as iterações na Tabela 4.1. Observamos que a precisão $TOL = 10^{-1}$ foi obtida aproximando o zero de $f(x)$ por $x^{(4)} = -1,8125$.

Usando o GNU Octave neste exemplo, temos:

```
>> f = @(x) exp(x) - x - 2
f = f(x) = exp(x) - x - 2
>> a=-2, b=0, x=(a+b)/2, TOL = (b-a)/2, sign(f(a)*f(x))
a = -2
b = 0
```

```

x = -1
TOL = 1
ans = -1
>> b=x, x=(a+b)/2, TOL = (b-a)/2, sign(f(a)*f(x))
b = -1
x = -1.5000
TOL = 0.50000
ans = -1

```

e, assim, sucessivamente. Veja o código completo na Seção 4.2.1. \diamond

Vamos agora discutir sobre a **convergência** do método da bisseção, que é garantida pelo Teorema 4.2.1.

Teorema 3.2.1 (Convergência do método da bisseção). *Sejam $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ uma função contínua tal que $f(a) \cdot f(b) < 0$ e x^* o único zero de $f(x)$ no intervalo (a, b) . Então, a sequência $\{x^{(n)}\}_{n \geq 0}$ do método da bisseção satisfaz:*

$$|x^{(n)} - x^*| < \frac{b - a}{2^{n+1}}, \quad \forall n \geq 0. \quad (3.9)$$

Em particular, $x^{(n)} \rightarrow x^*$ quando $n \rightarrow \infty$.

Proof. Notemos que, a cada iteração, a distância entre a aproximação $x^{(n)}$ e o zero x^* da função é menor ou igual que a metade do tamanho do intervalo $[a^{(n)}, b^{(n)}]$ (veja Figura 4.2), isto é:

$$|x^{(n)} - x^*| \leq \frac{b^{(n)} - a^{(n)}}{2}. \quad (3.10)$$

Por construção do método, temos $[a^{(n)}, b^{(n)}] \subset [a^{(n-1)}, b^{(n-1)}]$ quando $n \geq 1$ e:

$$b^{(n)} - a^{(n)} = \frac{b^{(n-1)} - a^{(n-1)}}{2}. \quad (3.11)$$

Desta forma:

$$|x^{(n)} - x^*| \leq \frac{b^{(n)} - a^{(n)}}{2} = \frac{b^{(n-1)} - a^{(n-1)}}{2^2} = \dots = \frac{b^{(0)} - a^{(0)}}{2^{n+1}}, \quad \forall n \geq 1. \quad (3.12)$$

Logo, vemos que:

$$|x^{(n)} - x^*| \leq \frac{b - a}{2^{n+1}}, \quad \forall n \geq 0. \quad (3.13)$$

\square

Observamos que a hipótese de que $f(x)$ tenha um único zero no intervalo não é realmente necessária. Se a função tiver mais de um zero no intervalo inicial, as iterações ainda convergem para um dos zeros. Veja o Exercício 4.2.3.

Observação 3.2.1. O Teorema 4.2.1 nos fornece uma estimativa para a convergência do método da bisseção. Aproximadamente, temos:

$$|x^{(n+1)} - x^*| \lesssim \frac{1}{2} |x^{(n)} - x^*|. \quad (3.14)$$

Isto nos leva a concluir que o método da bisseção tem **taxa de convergência** linear.

Exemplo 3.2.2. No Exemplo 4.2.1, depois de escolhida a aproximação inicial $x^{(0)} = -1 \in [a, b] = [-2, 0]$, precisamos de 4 iterações do método da bisseção para computar uma aproximação com precisão de 10^{-1} do zero de $f(x) = e^x - x - 2$. Poderíamos ter estimado o número de iterações **a priori**, pois, como vimos acima:

$$|x^{(n)} - x^*| \leq \frac{b-a}{2^{n+1}}, \quad n \geq 0. \quad (3.15)$$

Logo, temos:

$$|x^{(n)} - x^*| < \frac{b-a}{2^{n+1}} = \frac{2}{2^{n+1}} \quad (3.16)$$

$$= 2^{-n} < 10^{-1} \Rightarrow n > -\log_2 10^{-1} \approx 3,32. \quad (3.17)$$

Isto está de acordo com o experimento numérico realizado naquele exemplo.

O método da bisseção tem a boa propriedade de garantia de convergência, bem como de fornecer uma simples estimativa do erro na aproximação calculada. Entretanto, a taxa de convergência linear é superada por outros métodos. A construção de tais métodos está, normalmente, associada à iteração do ponto fixo, a qual exploramos na próxima seção.

3.2.1 Código GNU Octave: método da bisseção

O seguinte código é uma implementação no GNU Octave do algoritmo da bisseção. As variáveis de entrada são:

- **f** - função objetivo
- **a** - extremo esquerdo do intervalo de inspeção $[a, b]$
- **b** - extremo direito do intervalo de inspeção $[a, b]$

Prof. M.e Daniel Cassimiro

- TOL - tolerância para o erro absoluto (critério de parada)
- N - número máximo de iterações depois da aproximação inicial

A variável de saída é:

- p - aproximação de uma raiz x^* de f, satisfazendo $|p - x^*| < TOL$ ou $f(p) = 0$.

```
function [p] = bissecao(f, a, b, TOL, N)
i = 1;
fa = f(a);
while (i <= N)
    #iteracao da bissecao
    p = a + (b-a)/2;
    fp = f(p);
    #condicao de parada
    if ((fp == 0) || ((b-a)/2 < TOL))
        return;
    endif
    #bissecta o intervalo
    i = i+1;
    if (fa * fp > 0)
        a = p;
        fa = fp;
    else
        b = p;
    endif
endwhile
error('Num. max. de iter. excedido!');
endfunction
```

Exercícios

E 3.2.1. Considere a equação $\sqrt{x} = \cos(x)$. Use o método da bisseção com intervalo inicial $[a, b] = [0, 1]$ e $x^{(1)} = (a + b)/2$ para calcular a aproximação $x^{(4)}$ da solução desta equação.

E 3.2.2. Trace o gráfico e isole as três primeiras raízes positivas da função:

$$f(x) = 5 \sin(x^2) - \exp\left(\frac{x}{10}\right) \quad (3.18)$$

em intervalos de comprimento 0,1. Então, use o método da bisseção para obter aproximações dos zeros desta função com precisão de 10^{-5} .

E 3.2.3. O polinômio $p(x) = -4 + 8x - 5x^2 + x^3$ tem raízes $x_1 = 1$ e $x_2 = x_3 = 2$ no intervalo $[1/2, 3]$.

- a) Se o método da bisseção for usando com o intervalo inicial $[1/2, 3]$, para qual raiz as iterações convergem?
- b) É possível usar o método da bisseção para a raiz $x = 2$? Justifique sua resposta.

E 3.2.4. O polinômio $f(x) = x^4 - 4x^2 + 4$ possui raízes duplas em $\sqrt{2}$ e $-\sqrt{2}$. O método da bisseção pode ser aplicado a f ? Explique.

E 3.2.5. Mostre que a equação do Problema 4.1.7 possui uma solução no intervalo $[1, v + 1]$ para todo v positivo. Dica: defina $f(x) = \ln(x) + x - \frac{1}{x} - v$ e considere a seguinte estimativa:

$$f(v + 1) = f(1) + \int_1^{v+1} f'(x) dx \geq -v + \int_1^{v+1} dx = 0. \quad (3.19)$$

Use esta estimativa para iniciar o método de bisseção e obtenha o valor da raiz com pelo menos 6 algarismos significativos para $v = 1, 2, 3, 4$ e 5 .

E 3.2.6. (Estática) Considere o seguinte problema físico: uma plataforma está fixa a uma parede através de uma dobradiça cujo momento é dado por:

$$\tau = k\theta, \quad (3.20)$$

onde θ é ângulo da plataforma com a horizontal e k é uma constante positiva. A plataforma é feita de material homogêneo, seu peso é P e sua largura é l . Modele a relação entre o ângulo θ e o peso P próprio da plataforma. Encontre o valor de θ quando $l = 1$ m, $P = 200$ N, $k = 50$ Nm/rad, sabendo que o sistema está em equilíbrio. Use o método da bisseção e expresse o resultado com 4 algarismos significativos.

E 3.2.7. Considere a equação de Lambert dada por:

$$xe^x = t, \quad (3.21)$$

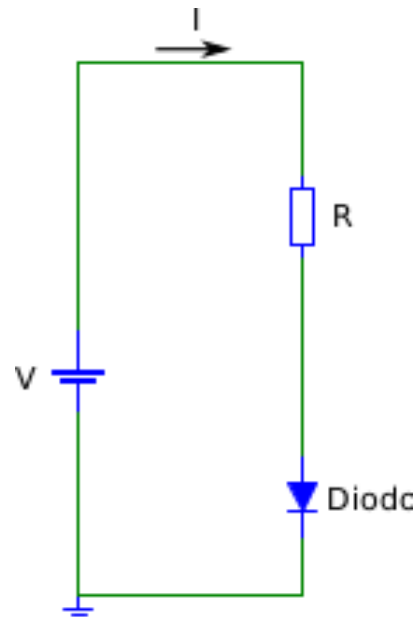
onde t é um número real positivo. Mostre que esta equação possui uma única solução x^* que pertence ao intervalo $[0, t]$. Usando esta estimativa como intervalo inicial, quantos passos são necessário para obter o valor numérico de x^* com erro absoluto inferior a 10^{-6} quando $t = 1$, $t = 10$ e $t = 100$ através do método da bisseção? Obtenha esses valores.

E 3.2.8. (Eletrônica) O desenho abaixo mostra um circuito não linear envolvendo uma fonte de tensão constante, um diodo retificador e um resistor. Sabendo que a relação entre a corrente (I_d) e a tensão (v_d) no diodo é dada pela seguinte expressão:

$$I_d = I_R \left(\exp \left(\frac{v_d}{v_t} \right) - 1 \right), \quad (3.22)$$

onde I_R é a corrente de condução reversa e v_t , a tensão térmica dada por $v_t = \frac{kT}{q}$ com k , a constante de Boltzmann, T a temperatura de operação e q , a carga do elétron. Aqui $I_R = 1 \text{ pA} = 10^{-12} \text{ A}$, $T = 300 \text{ K}$. Escreva o problema como uma equação na incógnita v_d e, usando o método da bisseção, resolva este problema com 3 algarismos significativos para os seguintes casos:

- a) $V = 30 \text{ V}$ e $R = 1 \text{ k}\Omega$.
- b) $V = 3 \text{ V}$ e $R = 1 \text{ k}\Omega$.
- c) $V = 3 \text{ V}$ e $R = 10 \text{ k}\Omega$.
- d) $V = 300 \text{ mV}$ e $R = 1 \text{ k}\Omega$.
- e) $V = -300 \text{ mV}$ e $R = 1 \text{ k}\Omega$.
- f) $V = -30 \text{ V}$ e $R = 1 \text{ k}\Omega$.
- g) $V = -30 \text{ V}$ e $R = 10 \text{ k}\Omega$.



Dica: $V = RI_d + v_d$.

E 3.2.9. (Propagação de erros) Obtenha os valores de I_d no Problema 4.2.8. Lembre que existem duas expressões disponíveis:

$$I_d = I_R \left(\exp \left(\frac{v_d}{v_t} \right) - 1 \right) \quad (3.23)$$

e

$$I_d = \frac{v - v_d}{R} \quad (3.24)$$

Faça o estudo da propagação do erro e decida qual a melhor expressão em cada caso.

3.3 Iteração de ponto fixo

Nesta seção, discutimos a abordagem da **iteração do ponto fixo** para a solução numérica de equações de uma variável real. Observamos que sempre podemos reescrever uma equação da forma $f(x) = 0$ (problema de encontrar os zeros de uma função) em uma equação equivalente na forma $g(x) = x$ (**problema de ponto fixo**). Um ponto $x = x^*$ tal que $g(x^*) = x^*$ é chamado de **ponto fixo** da função $g(x)$. Geometricamente, um ponto fixo de uma função é um ponto de interseção entre a reta $y = x$ com o gráfico da função $g(x)$ (veja Figura 4.3).

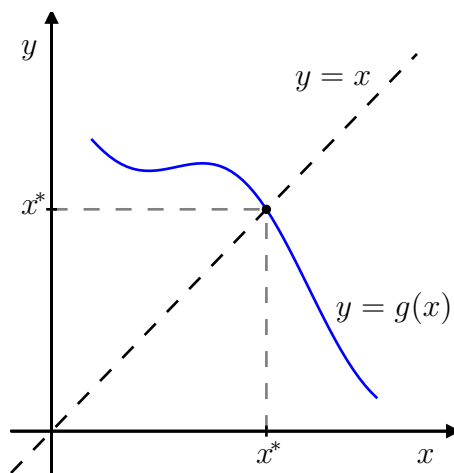


Figure 3.3: Ponto fixo $g(x^*) = x^*$.

Exemplo 3.3.1. Resolver a equação $e^x = x + 2$ é equivalente a resolver $f(x) = 0$, com $f(x) = e^x - x - 2$. Estes são equivalentes a resolver $g(x) = x$, com $g(x) = e^x - 2$, isto é:

$$e^x = x + 2 \Leftrightarrow e^x - x - 2 = 0 \Leftrightarrow e^x - 2 = x \quad (3.25)$$

Dada uma função $g(x)$, a **iteração do ponto fixo** consiste em computar a seguinte sequência recursiva:

$$x^{(n+1)} = g(x^{(n)}), \quad n \geq 1, \quad (3.26)$$

onde $x^{(1)}$ é uma aproximação inicial do ponto fixo.

Exemplo 3.3.2 (Método babilônico). O método babilônico⁴ é de uma iteração de ponto fixo para extrair a raiz quadrada de um número positivo A , isto é, resolver a equação $x^2 = A$.

Seja $r > 0$ uma aproximação para \sqrt{A} . Temos três possibilidades:

⁴Heron de Alexandria, 10 d.C. - 70 d.C., matemático grego.

- $r > \sqrt{A} \implies \frac{A}{r} < \sqrt{A} \implies \sqrt{A} \in \left(\frac{A}{r}, r\right)$;
- $r = \sqrt{A} \implies \frac{A}{r} = \sqrt{A}$;
- $r < \sqrt{A} \implies \frac{A}{r} > \sqrt{A} \implies \sqrt{A} \in \left(r, \frac{A}{r}\right)$.

Ou seja, \sqrt{A} sempre está no intervalo entre r e $\frac{A}{r}$, no qual podemos buscar uma nova aproximação como, por exemplo, pelo ponto médio:

$$x = \frac{r + \frac{A}{r}}{2}. \quad (3.27)$$

Aplicando esse método repetidas vezes, podemos construir a iteração (de ponto fixo):

$$x^{(1)} = r \quad (3.28)$$

$$x^{(n+1)} = \frac{x^{(n)}}{2} + \frac{A}{2x^{(n)}}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (3.29)$$

Por exemplo, para obter uma aproximação para $\sqrt{5}$, podemos iniciar com a aproximação inicial $r = 2$ e $A = 5$. Então, tomamos $x^{(1)} = 2$ e daí seguem as aproximações:

$$x^{(2)} = \frac{2}{2} + \frac{2,5}{2} = 2,25 \quad (3.30)$$

$$x^{(3)} = \frac{2,25}{2} + \frac{2,5}{2,25} = 2,2361111 \quad (3.31)$$

$$x^{(4)} = \frac{2,2361111}{2} + \frac{2,5}{2,2361111} = 2,236068 \quad (3.32)$$

$$x^{(5)} = \frac{2,236068}{2} + \frac{2,5}{2,236068} = 2,236068 \quad (3.33)$$

O método babilônico sugere que a iteração do ponto fixo pode ser uma abordagem eficiente para a solução de equações. Ficam, entretanto, as seguintes perguntas:

1. Será que a iteração do ponto fixo é convergente?
2. Caso seja convergente, será que o limite da sequência produzida, isto é, $x^* := \lim_{n \rightarrow \infty} x^{(n)}$ é um ponto fixo?
3. Caso seja convergente, qual é a taxa de convergência?

Table 3.2: Iterações do ponto fixo para o Exemplo 4.3.3.

n	$x_1^{(n)}$	$x_2^{(n)}$
1	1,700	1,700
2	2,047	1,735
3	-0,8812	1,743
4	4,3013	1,746
5	-149,4	1,746

A segunda pergunta é a mais fácil de ser respondida. No caso de $g(x)$ ser contínua, se $x^{(n)} \rightarrow x^* \in (g)$, então:

$$x^* = \lim_{n \rightarrow \infty} x^{(n)} = \lim_{n \rightarrow \infty} g(x^{(n-1)}) = g\left(\lim_{n \rightarrow \infty} x^{(n-1)}\right) = g(x^*). \quad (3.34)$$

Antes de respondermos as outras perguntas acima, vejamos mais um exemplo.

Exemplo 3.3.3. Considere o problema de encontrar o zero da função $f(x) = xe^x - 10$. Uma maneira geral de construir um problema de ponto fixo equivalente é o seguinte:

$$f(x) = 0 \Rightarrow \alpha f(x) = 0 \Rightarrow x - \alpha f(x) = x, \quad (3.35)$$

para qualquer parâmetro $\alpha \neq 0$. Consideremos, então, as seguintes duas funções:

$$g_1(x) = x - 0,5f(x) \quad \text{e} \quad g_2(x) = x - 0,05f(x). \quad (3.36)$$

Notamos que o ponto fixo destas duas funções coincide com o zero de $f(x)$. Construindo as iterações do ponto fixo:

$$x_1^{(n+1)} = g_1(x_1^{(n)}) \quad \text{e} \quad x_2^{(n+1)} = g_2(x_2^{(n)}), \quad (3.37)$$

tomando $x_1^{(1)} = x_2^{(1)} = 1,7$, obtemos os resultados apresentados na Tabela 4.2. Observamos que, enquanto, a iteração do ponto fixo com a função $g_1(x)$ ($\alpha = 0,5$) parece divergir, a iteração com a função $g_2(x)$ ($\alpha = 0,05$) parece convergir.

No GNU Octave, podemos computar as iterações do ponto fixo $x^{(n+1)} = g_1(x^{(n)})$ com o seguinte código:

```
>> f = @(x) x*exp(x)-10
f = f(x) = x*exp(x)-10
>> g1 = @(x) x - 0.5*f(x)
g1 = f(x) = x - 0.5*f(x)
```

```
>> x = 1.7;
>> x = g1(x)
x = 2.0471
>> x = g1(x)
x = -0.88119
```

e, assim, sucessivamente. Itere com a função $g_2(x)$ e verifique a convergência!

A fim de estudarmos a convergência da iteração do ponto fixo, apresentamos o teorema do ponto fixo.

3.3.1 Teorema do ponto fixo

O teorema do ponto fixo nos fornece condições suficientes para a existência e unicidade do ponto fixo, bem como para a convergência das iterações do método.

Definição 3.3.1. Uma **contração** é uma função real $g : [a, b] \rightarrow [a, b]$ tal que:

$$|g(x) - g(y)| \leq \beta |x - y|, \quad 0 \leq \beta < 1. \quad (3.38)$$

Observação 3.3.1. Seja $g : [a, b] \rightarrow [a, b]$, $y = g(x)$.

- Se $g(x)$ é uma contração, então $g(x)$ é uma função contínua.
- Se $|g'(x)| < k$, $0 < k < 1$, para todo $x \in [a, b]$, então $g(x)$ é uma contração.

Teorema 3.3.1 (Teorema do ponto fixo). Se $g : [a, b] \rightarrow [a, b]$ é uma contração, então existe um único ponto $x^* \in [a, b]$ tal que $g(x^*) = x^*$, isto é, x^* é ponto fixo de $g(x)$. Além disso, a sequência $\{x^{(n)}\}_{n \in \mathbb{N}}$ dada por:

$$x^{(n+1)} = g(x^{(n)}) \quad (3.39)$$

converge para x^* para qualquer $x^{(1)} \in [a, b]$.

Proof. Começamos demonstrando que existe pelo menos um ponto fixo. Para tal definimos a função $f(x) = x - g(x)$ e observamos que:

$$f(a) = a - g(a) \leq a - a = 0 \quad (3.40)$$

e

$$f(b) = b - g(b) \geq b - b = 0 \quad (3.41)$$

Se $f(a) = 0$ ou $f(b) = 0$, então o ponto fixo existe. Caso contrário, as desigualdades são estritas e a $f(x)$ muda de sinal no intervalo. Como esta função é contínua, pelo

teorema de Bolzano 4.1.1, existe um ponto x^* no intervalo (a, b) tal que $f(x^*) = 0$, ou seja, $g(x^*) = x^*$. Isto mostra a existência.

Para provar que o ponto fixo é único, observamos que se x^* e x^{**} são pontos fixos, eles devem ser iguais, pois:

$$|x^* - x^{**}| = |g(x^*) - g(x^{**})| \leq \beta |x^* - x^{**}|. \quad (3.42)$$

A desigualdade $|x^* - x^{**}| \leq \beta |x^* - x^{**}|$ com $0 \leq \beta < 1$ implica $|x^* - x^{**}| = 0$.

Para demonstrar a convergência da sequência, observamos que:

$$|x^{(n+1)} - x^*| = |g(x^{(n)}) - x^*| = |g(x^{(n)}) - g(x^*)| \leq \beta |x^{(n)} - x^*|. \quad (3.43)$$

Daí, temos:

$$|x^{(n)} - x^*| \leq \beta |x^{(n-1)} - x^*| \leq \beta^2 |x^{(n-2)} - x^*| \leq \dots \leq \beta^n |x^{(0)} - x^*|. \quad (3.44)$$

Portanto, como $0 \leq \beta < 1$, temos:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} |x^{(n)} - x^*| = 0, \quad (3.45)$$

ou seja, $x^{(n)} \rightarrow x^*$ quando $n \rightarrow \infty$. \square

Observação 3.3.2. Do teorema do ponto fixo, temos que se $g(x)$ é uma contração com constante $0 \leq \beta < 1$, então:

$$|x^{(n+1)} - x^*| \leq \beta |x^{(n)} - x^*|, \quad n \geq 1. \quad (3.46)$$

Isto é, as iterações do ponto fixo têm taxa de convergência linear.

Exemplo 3.3.4. Mostre que o teorema do ponto fixo se aplica a função $g(x) = \cos(x)$ no intervalo $[1/2, 1]$, isto é, a iteração de ponto fixo converge para a solução da equação $\cos x = x$. Então, calcule as iterações do ponto fixo com aproximação inicial $x^{(1)} = 0,7$, estime o erro absoluto da aproximação e verifique a taxa de convergência.

Solução. Basta mostrarmos que:

- a) $g([1/2, 1]) \subseteq [1/2, 1]$;
- b) $|g'(x)| < \beta$, $0 < \beta < 1$, $\forall x \in [1/2, 1]$.

Para provar a), observamos que $g(x)$ é decrescente no intervalo, pelo que temos:

$$0,54 < \cos(1) \leq \cos(x) \leq \cos(1/2) < 0,88 \quad (3.47)$$

Como $[0,54, 0,88] \subseteq [0,5, 1]$, temos o item a).

n	$x^{(n)}$	$\epsilon_n := x^{(n)} - x^* $
1	0,70000	3,9E-02
2	0,76484	2,6E-02
3	0,72149	1,8E-02
4	0,75082	1,2E-02
5	0,73113	8,0E-03
6	0,74442	5,3E-03
7	0,73548	3,6E-03

Table 3.3: Iteração do ponto fixo para o Exemplo 4.3.4.

Para provar o item b), observamos que:

$$g'(x) = -\sin(x). \quad (3.48)$$

Da mesma forma, temos a estimativa:

$$-0,85 < -\sin(1) \leq -\sin(x) \leq -\sin(1/2) < -0,47. \quad (3.49)$$

Assim, $|g'(x)| < 0,85$ e temos a desigualdade com $\beta = 0,85 < 1$.

A Tabela 4.3 apresenta o comportamento numérico da iteração do ponto fixo:

$$x^{(1)} = 0,7 \quad (3.50)$$

$$x^{(n+1)} = \cos(x^{(n)}), \quad n \geq 1. \quad (3.51)$$

Para estimar o erro, consideramos $x^* = 0,7390851605$. A Figura 4.4 mostrar o decaimento do erro $\epsilon_n = |x^{(n)} - x^*|$ comparado com a taxa de convergência linear com $\beta = 0,85$.

No GNU Octave, podemos computar estas iterações e o erro absoluto com o seguinte código:

```
#est. da solucao
f = @(x) cos(x)-x;
xe = fsolve(f, 0.7);

#funcao do pto. fixo
g = @(x) cos(x);

#aprox. inicial
```

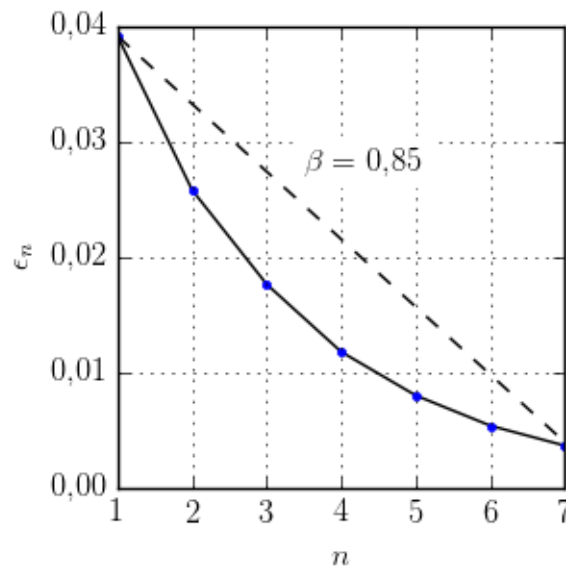


Figure 3.4: Decaimento do erro $\epsilon_n = |x^{(n)} - x^*|$ da iteração do ponto fixo estudada no Exemplo 4.3.4.

```
x0 = 0.7;
eps = abs(x0-xe);
printf("%1.5f %1.1e\n", x0, eps);

for i=2:7
    x = g(x0);
    eps = abs(x-xe);
    printf("%1.5f %1.1e\n", x, eps)
    x0 = x;
endfor
```

◇

3.3.2 Teste de convergência

Seja $g : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ uma função $C^0[a, b]$ e $x^* \in (a, b)$ um ponto fixo de g . Então x^* é dito estável se existe uma região $(x^* - \delta, x^* + \delta)$ chamada bacia de atração tal que $x^{(n+1)} = g(x^{(n)})$ é convergente sempre que $x^{(0)} \in (x^* - \delta, x^* + \delta)$.

Proposição 3.3.1 (Teste de convergência). *Se $g \in C^1[a, b]$ e $|g'(x^*)| < 1$, então x^* é estável. Se $|g'(x^*)| > 1$ é instável e o teste é inconclusivo quando $|g'(x^*)| = 1$.*

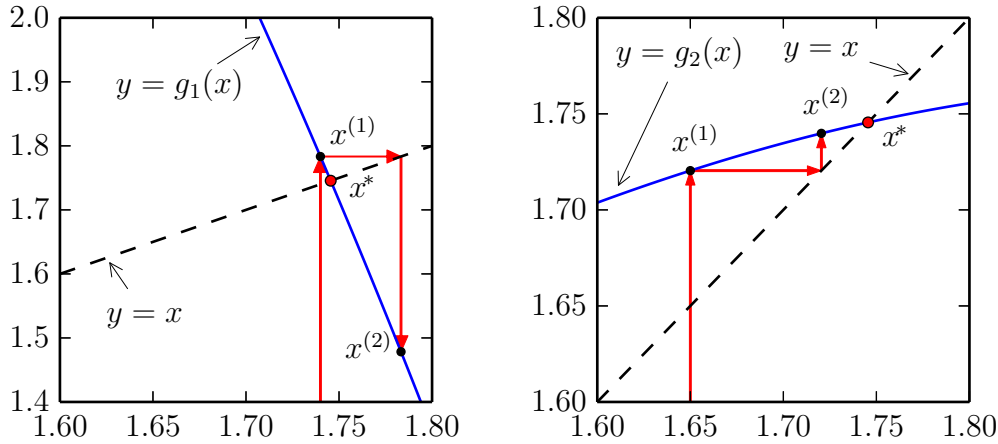


Figure 3.5: Ilustração das iterações do ponto fixo para: (esquerda) $y = g_1(x)$ e (direita) $y = g_2(x)$. Veja Exemplo 4.3.5.

Exemplo 3.3.5. No Exemplo 4.3.3, observamos que a função $g_1(x)$ nos forneceu uma iteração divergente, enquanto que a função $g_2(x)$ forneceu uma iteração convergente (veja a Figura 4.5). Estes comportamentos são explicados pelo teste da convergência. Com efeito, sabemos que o ponto fixo destas funções está no intervalo $[1,6, 1,8]$ e temos:

$$|g'_1(x)| = |1 - 0,5(x+1)e^x| > 4,8, \quad \forall x \in [1,6, 1,8], \quad (3.52)$$

enquanto:

$$|g'_2(x)| = |1 - 0,05(x+1)e^x| < 0,962, \quad \forall x \in [1,6, 1,8]. \quad (3.53)$$

3.3.3 Estabilidade e convergência

A fim de compreendermos melhor os conceitos de estabilidade e convergência, considere uma função $\Phi(x)$ com um ponto fixo $x^* = g(x^*)$ e analisemos o seguinte processo iterativo:

$$x^{(n+1)} = g(x^{(n)}) \quad (3.54)$$

$$x^{(0)} = x \quad (3.55)$$

Vamos supor que a função $g(x)$ pode ser aproximada por seu polinômio de Taylor em torno do ponto fixo:

$$g(x) = g(x^*) + (x - x^*)g'(x^*) + O((x - x^*)^2) \quad (3.56)$$

$$= x^* + (x - x^*)g'(x^*) + O((x - x^*)^2) \quad (3.57)$$

$$\approx x^* + (x - x^*)g'(x^*) \quad (3.58)$$

Substituindo na relação de recorrência, temos

$$x^{(n+1)} = g(x^{(n)}) \approx x^* + (x^{(n)} - x^*)g'(x^*) \quad (3.59)$$

Ou seja:

$$(x^{(n+1)} - x^*) \approx (x^{(n)} - x^*)g'(x^*) \quad (3.60)$$

Tomando módulos, temos:

$$\underbrace{|x^{(n+1)} - x^*|}_{\epsilon_{n+1}} \approx \underbrace{|x^{(n)} - x^*|}_{\epsilon_n} |g'(x^*)|, \quad (3.61)$$

onde $\epsilon_n = |x^{(n)} - x^*|$.

Observação 3.3.3. Da análise acima, concluímos:

- Se $|g'(x^*)| < 1$, então, a distância de $x^{(n)}$ até o ponto fixo x^* está diminuindo a cada passo.
- Se $|g'(x^*)| > 1$, então, a distância de $x^{(n)}$ até o ponto fixo x^* está aumentando a cada passo.
- Se $|g'(x^*)| = 1$, então, nossa aproximação de primeira ordem não é suficiente para compreender o comportamento da sequência.

3.3.4 Erro absoluto e tolerância

Na prática, quando se aplica uma iteração como esta, não se conhece de antemão o valor do ponto fixo x^* . Assim, o erro $\epsilon_n = |x^{(n)} - x^*|$ precisa ser estimado com base nos valores calculados $x^{(n)}$. Uma abordagem frequente é analisar a evolução da diferença entre dois elementos da sequência:

$$\Delta_n = |x^{(n+1)} - x^{(n)}| \quad (3.62)$$

A pergunta natural é: Será que o erro $\epsilon_n = |x^{(n)} - x^*|$ será pequeno quando $\Delta_n = |x^{(n+1)} - x^{(n)}|$ for pequeno?

Para responder a esta pergunta, observamos que

$$x^* = \lim_{n \rightarrow \infty} x^{(n)} \quad (3.63)$$

portanto:

$$x^* - x^{(N)} = (x^{(N+1)} - x^{(N)}) + (x^{(N+2)} - x^{(N+1)}) + (x^{(N+3)} - x^{(N+2)}) + \dots \quad (3.64)$$

$$= \sum_{k=0}^{\infty} (x^{(N+k+1)} - x^{(N+k)}) \quad (3.65)$$

Usamos também as expressões:

$$x^{(n+1)} \approx x^* + (x^{(n)} - x^*)g'(x^*) \quad (3.66)$$

$$x^{(n)} \approx x^* + (x^{(n-1)} - x^*)g'(x^*) \quad (3.67)$$

Subtraindo uma da outra, temos:

$$x^{(n+1)} - x^{(n)} \approx (x^{(n)} - x^{(n-1)})g'(x^*) \quad (3.68)$$

Portanto:

$$x^{(N+k+1)} - x^{(N+k)} \approx (x^{(N+1)} - x^{(N)}) (g'(x^*))^k \quad (3.69)$$

E temos:

$$x^* - x^{(N)} = \sum_{k=0}^{\infty} (x^{(N+k+1)} - x^{(N+k)}) \quad (3.70)$$

$$\approx \sum_{k=0}^{\infty} (x^{(N+1)} - x^{(N)}) (g'(x^*))^k \quad (3.71)$$

$$= (x^{(N+1)} - x^{(N)}) \frac{1}{1 - g'(x^*)}, \quad |g'(x^*)| < 1 \quad (3.72)$$

Tomando módulo, temos:

$$|x^* - x^{(N)}| \approx |x^{(N+1)} - x^{(N)}| \frac{1}{1 - g'(x^*)} \quad (3.73)$$

$$\epsilon_N \approx \frac{\Delta_N}{1 - g'(x^*)} \quad (3.74)$$

Observação 3.3.4. Tendo em mente a relação $x^{(n+1)} - x^{(n)} \approx (x^{(n)} - x^{(n-1)})g'(x^*)$, concluímos:

- Quando $g'(x^*) < 0$, o esquema é alternante, isto é, o sinal do erro se altera a cada passo. O erro ϵ_N pode ser estimado diretamente da diferença Δ_N , pois o denominador $1 - g'(x^*) > 1$.

- Quando $0 < g'(x^*) < 1$, o esquema é monótono e $\frac{1}{1-g'(x^*)} > 1$, pelo que o erro ϵ_N é maior que a diferença Δ_N . A relação será tão mais importante quando mais próximo da unidade for $g'(x^*)$, ou seja, quando mais lenta for a convergência. Para estimar o erro em função da diferença Δ_N , observamos que $g'(x^*) \approx \frac{x^{(n+1)} - x^{(n)}}{x^{(n)} - x^{(n-1)}}$ e

$$|g'(x^*)| \approx \frac{\Delta_n}{\Delta_{n-1}} \quad (3.75)$$

e portanto

$$\epsilon_N \approx \frac{\Delta_N}{1 - \frac{\Delta_n}{\Delta_{n-1}}}. \quad (3.76)$$

Exercícios

E 3.3.1. Resolver a equação $e^x = x + 2$ é equivalente a calcular os pontos fixos da função $g(x) = e^x - 2$ (veja o Exemplo 4.3.1). Use a iteração do ponto fixo $x^{(n+1)} = g(x^n)$ com $x^{(1)} = -1,8$ para obter uma aproximação de uma das soluções da equação dada com 8 dígitos significativos.

E 3.3.2. Mostre que a equação:

$$\cos(x) = x \quad (3.77)$$

possui uma única solução no intervalo $[0, 1]$. Use a iteração do ponto fixo e encontre uma aproximação para esta solução com 4 dígitos significativos.

E 3.3.3. Mostre que a equação $xe^x = 10$ é equivalente às seguintes equações:

$$x = \ln\left(\frac{10}{x}\right) \quad \text{e} \quad x = 10e^{-x}. \quad (3.78)$$

Destas, considere as seguintes iterações de ponto fixo:

a) $x^{(n+1)} = \ln\left(\frac{10}{x^{(n)}}\right)$

b) $x^{(n+1)} = 10e^{-x^{(n)}}$

Tomando $x^{(1)} = 1$, verifique se estas sequências são convergentes.

E 3.3.4. Verifique (analiticamente) que a única solução real da equação:

$$xe^x = 10 \quad (3.92)$$

é ponto fixo das seguintes funções:

Prof. M.e Daniel Cassimiro

a) $g(x) = \ln\left(\frac{10}{x}\right)$

b) $g(x) = x - \frac{xe^x - 10}{15}$

c) $g(x) = x - \frac{xe^x - 10}{10 + e^x}$

Implemente o processo iterativo $x^{(n+1)} = g(x^{(n)})$ para $n \geq 0$ e compare o comportamento. Discuta os resultados com base na teoria estudada.

E 3.3.5. Verifique (analiticamente) que a única solução real da equação:

$$\cos(x) = x \quad (3.93)$$

é ponto fixo das seguintes funções:

a) $g(x) = \cos(x)$

b) $g(x) = 0,4x + 0,6 \cos(x)$

c) $g(x) = x + \frac{\cos(x) - x}{1 + \sin(x)}$

Implemente o processo iterativo $x^{(n+1)} = g(x^{(n)})$ para $n \geq 0$ e compare o comportamento. Discuta os resultados com base na teoria estudada.

E 3.3.6. Encontre a solução de cada equação com erro absoluto inferior a 10^{-6} .

a) $e^x = x + 2$ no intervalo $(-2, 0)$.

b) $x^3 + 5x^2 - 12 = 0$ no intervalo $(1, 2)$.

c) $\sqrt{x} = \cos(x)$ no intervalo $(0, 1)$.

E 3.3.7. Encontre numericamente as três primeiras raízes positivas da equação dada por:

$$\cos(x) = \frac{x}{10 + x^2} \quad (3.94)$$

com erro absoluto inferior a 10^{-6} .

E 3.3.8. Considere os seguintes processos iterativos:

$$\begin{aligned} a \quad & \begin{cases} x^{(n+1)} = \cos(x^{(n)}) \\ x^{(1)} = .5 \end{cases} \\ & \text{e} \\ b \quad & \begin{cases} x^{(n+1)} = .4x^{(n)} + .6 \cos(x^{(n)}) \\ x^{(1)} = .5 \end{cases} \end{aligned} \quad (3.95)$$

Use o teorema do ponto fixo para verificar que cada um desses processos converge para a solução da equação x^* de $\cos(x) = x$. Observe o comportamento numérico dessas sequências. Qual estabiliza mais rápido com cinco casas decimais? Discuta.

Dica: Verifique que $\cos([0.5, 1]) \subseteq [0.5, 1]$ e depois a mesma identidade para a função $f(x) = 0.4x + 0.6 \cos(x)$.

E 3.3.9. Use o teorema do ponto fixo aplicado a um intervalo adequado para mostrar que a função $g(x) = \ln(100 - x)$ possui um ponto fixo estável.

E 3.3.10. (Fluidos) Na hidráulica, o fator de atrito de Darcy é dado pela implicitamente pela equação de Colebrook-White:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left(\frac{\varepsilon}{14.8 R_h} + \frac{2.51}{\text{Re} \sqrt{f}} \right) \quad (3.96)$$

onde f é o fator de atrito, ε é a rugosidade do tubo em metros, R_h é o raio hidráulico em metros e Re é o número de Reynolds. Considere $\varepsilon = 2\text{mm}$, $R_h = 5\text{cm}$ e $\text{Re} = 10000$ e obtenha o valor de f pela iteração:

$$x^{(n+1)} = -2 \log_{10} \left(\frac{\varepsilon}{14.8 R_h} + \frac{2.51 x^{(n)}}{\text{Re}} \right) \quad (3.97)$$

E 3.3.11. Encontre uma solução aproximada para a equação algébrica

$$180 - 100x = 0.052 \sinh^{-1}(10^{13}x) \quad (3.98)$$

com erro absoluto inferior a 10^{-3} usando um método iterativo. Estime o erro associado ao valor de $v = 180 - 100x = 0.052 \sinh^{-1}(10^{13}x)$, usando cada uma dessas expressões. Discuta sucintamente o resultado obtido. Dica: Este caso é semelhante ao Problema 4.2.8.

E 3.3.12. Considere que x_n satisfaz a seguinte relação de recorrência:

$$x_{n+1} = x_n - \beta (x_n - x^*) \quad (3.99)$$

onde β e x^* são constantes. Prove que

$$x_n - x^* = (1 - \beta)^{n-1} (x_1 - x^*). \quad (3.100)$$

Conclua que $x_n \rightarrow x^*$ quando $|1 - \beta| < 1$.

E 3.3.13. (Convergência lenta) Considere o seguinte esquema iterativo:

$$x^{(n+1)} = x_n + q^n, \quad (3.101)$$

$$x^{(0)} = 0, \quad (3.102)$$

onde $q = 1 - 10^{-6}$.

a) Calcule o limite

$$x_\infty = \lim_{n \rightarrow \infty} x^{(n)} \quad (3.103)$$

analiticamente.

- b) Considere que o problema de obter o limite da sequência numericamente usando como critério de parada que $|x^{(n+1)} - x^{(n)}| < 10^{-5}$. Qual o valor é produzido pelo esquema numérico? Qual o desvio entre o valor obtido pelo esquema numérico e o valor do limite obtido no item a? Discuta. (Dica: Você não deve implementar o esquema iterativo, obtendo o valor de $x^{(n)}$ analiticamente)
- c) Qual deve ser a tolerância especificada para obter o resultado com erro relativo inferior a 10^{-2} ?

E 3.3.14. (Convergência sublinear) Considere o seguinte esquema iterativo:

$$x^{(n+1)} = x^{(n)} - [x^{(n)}]^3, \quad x^{(n)} \geq 0 \quad (3.104)$$

com $x^{(0)} = 10^{-2}$. Prove que $\{x^{(n)}\}$ é sequência de número reais positivos convergindo para zero. Verifique que são necessários mais de mil passos para que $x^{(n)}$ se torne menor que $0.9x^{(0)}$.

E 3.3.15. (Taxa de convergência)

- a) Use o teorema do ponto fixo para mostrar que a função $g(x) = 1 - \sin(x)$ possui um único ponto fixo estável o intervalo $[\frac{1}{10}, 1]$. Construa um método iterativo $x^{(n+1)} = g(x^{(n)})$ para encontrar esse ponto fixo. Use o computador para encontrar o valor numérico do ponto fixo.
- b) Verifique que função $\psi(x) = \frac{1}{2}[x + 1 - \sin(x)]$ possui um ponto fixo x^* que também é o ponto fixo da função g do item a. Use o computador para encontrar o valor numérico do ponto fixo através da iteração $x^{(n+1)} = \psi(x^{(n)})$. Qual método é mais rápido?

E 3.3.16. (Esquemas oscilantes)(*Esquemas oscilantes*)

a) Considere a função $g(x)$ e a função composta $\psi(x) = g \circ g = g(g(x))$. Verifique todo ponto fixo de g também é ponto fixo de ψ .

b) Considere a função

$$g(x) = 10 \exp(-x) \quad (3.105)$$

e a função composta $\psi(x) = g \circ g = g(g(x))$. Mostre que ψ possui dois pontos fixos que não são pontos fixos de g .

c) No problema anterior, o que acontece quando o processo iterativo $x^{(n+1)} = g(x^{(n)})$ é inicializado com um ponto fixo de ψ que não é ponto fixo de g ?

E 3.3.17. (Aceleração de convergência - introdução ao método de Newton) Mostre que se $f(x)$ possui uma raiz x^* então a x^* é um ponto fixo de $\phi(x) = x + \gamma(x)f(x)$. Encontre uma condição em $\gamma(x)$ para que o ponto fixo x^* de ϕ seja estável. Encontre uma condição em $\gamma(x)$ para que $\phi'(x^*) = 0$.

E 3.3.18. (Aceleração de convergência - introdução ao método de Newton) Considere que $x^{(n)}$ satisfaz a seguinte relação de recorrência:

$$x^{(n+1)} = x^{(n)} - \gamma f(x^{(n)}) \quad (3.106)$$

onde γ é uma constante. Suponha que $f(x)$ possui um zero em x^* . Aproxime a função $f(x)$ em torno de x^* por

$$f(x) = f(x^*) + f'(x^*)(x - x^*) + O((x - x^*)^2). \quad (3.107)$$

Em vista do problema anterior, qual valor de γ você escolheria para que a sequência $x^{(n)}$ convirja rapidamente para x^* .

E 3.3.19. Considere o problema da Questão 4.2.8 e dois seguintes esquemas iterativos.

$$A \begin{cases} I^{(n+1)} = \frac{1}{R} \left[V - v_t \ln \left(1 + \frac{I^{(n)}}{I_R} \right) \right], n > 0 \\ I^{(0)} = 0 \end{cases} \quad \text{e} \quad (3.108)$$

$$B \begin{cases} I^{(n+1)} = I_R \left[\exp \left(\frac{V - RI^{(n)}}{v_t} \right) - 1 \right], n > 0 \\ I^{(0)} = 0 \end{cases}$$

Verifique numericamente que apenas o processo A é convergente para a, b e c; enquanto apenas o processo B é convergente para os outros itens.

3.4 Método de Newton-Raphson

Nesta seção, apresentamos o **método de Newton-Raphson**⁵⁶ para calcular o zero de funções reais de uma variável real.

Consideramos que x^* seja um zero de uma dada função $y = f(x)$ continuamente diferenciável, isto é, $f(x^*) = 0$. A fim de usar a iteração do ponto fixo, observamos que, equivalentemente, x^* é um ponto fixo da função:

$$g(x) = x + \alpha(x)f(x), \quad \alpha(x) \neq 0, \quad (3.109)$$

onde $\alpha(x)$ é uma função arbitrária, a qual escolheremos de forma que a iteração do ponto fixo tenha ótima taxa de convergência.

Do **teorema do ponto fixo**, a taxa de convergência é dada em função do valor absoluto da derivada de $g(x)$. Calculando a derivada temos:

$$g'(x) = 1 + \alpha(x)f'(x) + \alpha'(x)f(x). \quad (3.110)$$

No ponto $x = x^*$, temos:

$$g'(x^*) = 1 + \alpha(x^*)f'(x^*) + \alpha'(x^*)f(x^*). \quad (3.111)$$

Como $f(x^*) = 0$, temos:

$$g'(x^*) = 1 + \alpha(x^*)f'(x^*). \quad (3.112)$$

Sabemos que o processo iterativo converge tão mais rápido quanto menor for $|g'(x)|$ nas vizinhanças de x^* . Isto nos leva a escolher:

$$g'(x^*) = 0, \quad (3.113)$$

e, então, temos:

$$\alpha(x^*) = -\frac{1}{f'(x^*)}, \quad (3.114)$$

se $f'(x^*) \neq 0$.

A discussão acima nos motiva a introduzir o método de Newton, cujas iterações são dada por:

$$x^{(n+1)} = x^{(n)} - \frac{f(x^{(n)})}{f'(x^{(n)})}, \quad n \geq 1, \quad (3.115)$$

sendo $x^{(1)}$ uma aproximação inicial dada.

⁵Joseph Raphson, 1648 - 1715, matemático inglês.

⁶Também chamado apenas de método de Newton.

3.4.1 Interpretação geométrica

Seja uma dada função $f(x)$ conforme na Figura 4.6. Para tanto, escolhamos uma aproximação inicial $x^{(1)}$ e computamos:

$$x^{(2)} = x^{(1)} - \frac{f(x^{(1)})}{f'(x^{(1)})}. \quad (3.116)$$

Geometricamente, o ponto $x^{(2)}$ é a interseção da reta tangente ao gráfico da função $f(x)$ no ponto $x = x^{(1)}$ com o eixo das abscissas. Com efeito, a equação desta reta é:

$$y = f'(x^{(1)})(x - x^{(1)}) + f(x^{(1)}). \quad (3.117)$$

Assim, a interseção desta reta com o eixo das abscissas ($y = 0$) ocorre quando:

$$f'(x^{(1)})(x - x^{(1)}) + f(x^{(1)}) = 0 \Rightarrow x = x^{(1)} - \frac{f(x^{(1)})}{f'(x^{(1)})}. \quad (3.118)$$

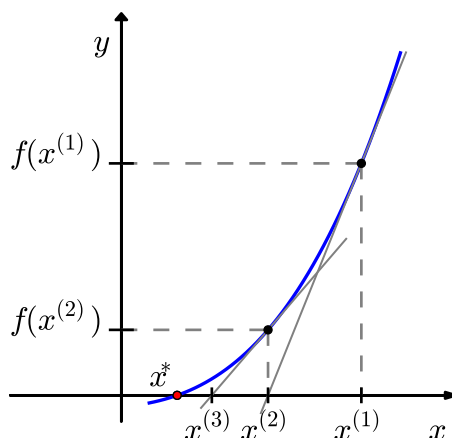


Figure 3.6: Interpretação do método de Newton.

Ou seja, dada aproximação $x^{(n)}$, a próxima aproximação $x^{(n+1)}$ é o ponto de interseção entre o eixo das abscissas e a reta tangente ao gráfico da função no ponto $x = x^{(n)}$. Observe a Figura 4.6.

3.4.2 Análise de convergência

Seja $y = f(x)$ uma função com derivadas primeira e segunda contínuas tal que $f(x^*) = 0$ e $f'(x^*) \neq 0$. Seja também a função $g(x)$ definida como:

$$g(x) = x - \frac{f(x)}{f'(x)}. \quad (3.119)$$

Prof. M.e Daniel Cassimiro

Expandindo em série de Taylor em torno de $x = x^*$, obtemos:

$$g(x) = g(x^*) + g'(x^*)(x - x^*) + \frac{g''(x^*)}{2}(x - x^*)^2 + O((x - x^*)^3). \quad (3.120)$$

Observamos que:

$$g(x^*) = x^* \quad (3.121)$$

$$g'(x^*) = 1 - \frac{f'(x^*)f'(x^*) - f(x^*)f''(x^*)}{(f'(x^*))^2} = 0 \quad (3.122)$$

Portanto:

$$g(x) = x^* + \frac{g''(x^*)}{2}(x - x^*)^2 + O((x - x^*)^3) \quad (3.123)$$

Com isso, temos:

$$x^{(n+1)} = g(x^{(n)}) = x^* + \frac{g''(x^*)}{2}(x^{(n)} - x^*)^2 + O((x^{(n)} - x^*)^3), \quad (3.124)$$

ou seja, para n suficientemente grande,

$$|x^{(n+1)} - x^*| \leq C |x^{(n)} - x^*|^2, \quad (3.125)$$

com constante $C = |g''(x^*)/2|$. Isto mostra que o método de Newton tem **taxa de convergência quadrática**. Mais precisamente, temos o seguinte teorema.

Teorema 3.4.1 (Método de Newton). *Sejam $f \in C^2([a, b])$ com $x^* \in (a, b)$ tal que $f(x^*) = 0$ e:*

$$m := \min_{x \in [a, b]} |f'(x)| > 0 \quad e \quad M := \max_{x \in [a, b]} |f''(x)|. \quad (3.126)$$

Escolhendo $\rho > 0$ tal que:

$$q := \frac{M}{2m}\rho < 1, \quad (3.127)$$

*definimos a **bacia de atração** do método de Newton pelo conjunto:*

$$K_\rho(x^*) := \{x \in \mathbb{R}; |x - x^*| \leq \rho\} \subset [a, b]. \quad (3.128)$$

Então, para qualquer $x^{(1)} \in K_\rho(x^)$ a iteração do método de Newton:*

$$x^{(n+1)} = x^{(n)} - \frac{f(x^{(n)})}{f'(x^{(n)})}, \quad (3.129)$$

Prof. M.e Daniel Cassimiro

fornece uma sequência $x^{(n)}$ que converge para x^* , isto é, $x^{(n)} \rightarrow x^*$ quando $n \rightarrow \infty$. Além disso, temos a seguinte estimativa de erro **a priori**:

$$|x^{(n)} - x^*| \leq \frac{2m}{M} q^{(2^{n-1})}, \quad n \geq 2, \quad (3.130)$$

e a seguinte estimativa de erro **a posteriori**:

$$|x^{(n)} - x^*| \leq \frac{M}{2m} |x^{(n)} - x^{(n-1)}|^2, \quad n \geq 2. \quad (3.131)$$

Proof. Para $n \in \mathbb{N}$, $n \geq 2$, temos:

$$x^{n+1} - x^* = x^{(n)} - \frac{f(x^{(n)})}{f'(x^{(n)})} - x^* = -\frac{1}{f'(x^{(n)})} \left[f(x^{(n)}) + (x^* - x^{(n)})f'(x^{(n)}) \right]. \quad (3.132)$$

Agora, para estimar o lado direito desta equação, usamos o polinômio de Taylor de grau 1 da função $f(x)$ em torno de $x = x^{(n)}$, isto é:

$$f(x^*) = f(x^{(n)}) + (x^* - x^{(n)})f'(x^{(n)}) + \int_{x^{(n)}}^{x^*} f''(t)(x^* - t) dt. \quad (3.133)$$

Pela mudança de variável $t = x^{(n)} + s(x^* - x^{(n)})$, observamos que o resto deste polinômio de Taylor na forma integral é igual a:

$$R(x^*, x^{(n)}) := (x^* - x^{(n)})^2 \int_0^1 f''(x^{(n)} + s(x^* - x^{(n)})) (1 - s) ds. \quad (3.134)$$

Assim, da cota da segunda derivada de $f(x)$, temos:

$$|R(x^*, x^{(n)})| \leq M |x^* - x^{(n)}|^2 \int_0^1 (1 - s) ds = \frac{M}{2} |x^* - x^{(n)}|^2. \quad (3.135)$$

Se $x^{(n)} \in K_\rho(x^*)$, então de (4.132) e (4.135) temos:

$$|x^{(n+1)} - x^*| \leq \frac{M}{2m} |x^{(n)} - x^*|^2 \leq \frac{M}{2m} \rho^2 < \rho. \quad (3.136)$$

Isto mostra que se $x^{(n)} \in K_\rho(x^*)$, então $x^{(n+1)} \in K_\rho(x^*)$, isto é, $x^{(n)} \in K_\rho(x^*)$ para todo $n \in \mathbb{N}$.

Agora, obtemos a estimativa **a priori** de (4.4.2), pois:

$$|x^{(n)} - x^*| \leq \frac{2m}{M} \left(\frac{M}{2m} |x^{(n-1)} - x^*| \right)^2 \leq \dots \leq \frac{2m}{M} \left(\frac{M}{2m} |x^{(1)} - x^*| \right)^{2^{n-1}}. \quad (3.137)$$

Logo:

$$|x^{(n)} - x^*| \leq \frac{2m}{M} q^{2^{n-1}}, \quad (3.138)$$

donde também vemos que $x^{(n)} \rightarrow x^*$ quando $n \rightarrow \infty$, pois $q < 1$.

Por fim, para provarmos a estimativa **a posteriori** tomamos a seguinte expansão em polinômio de Taylor:

$$f(x^{(n)}) = f(x^{(n-1)}) + (x^{(n)} - x^{(n-1)})f'(x^{(n-1)}) + R(x^{(n)}, x^{(n-1)}). \quad (3.139)$$

Aqui, temos:

$$f(x^{(n-1)}) + (x^{(n)} - x^{(n-1)})f'(x^{(n-1)}) = 0 \quad (3.140)$$

e, então, conforme acima:

$$|f(x^{(n)})| = |R(x^{(n)}, x^{(n-1)})| \leq \frac{M}{2} |x^{(n)} - x^{(n-1)}|^2. \quad (3.141)$$

Com isso e do teorema do valor médio, concluímos:

$$|x^{(n)} - x^*| \leq \frac{1}{m} |f(x^{(n)}) - f(x^*)| \leq \frac{M}{2m} |x^{(n)} - x^{(n-1)}|^2. \quad (3.142)$$

□

Exemplo 3.4.1. Estime o raio ρ da bacia de atração $K_\rho(x^*)$ para a função $f(x) = \cos(x) - x$ restrita ao intervalo $[0, \pi/2]$.

Solução. O raio da bacia de atração é tal que:

$$\rho < \frac{2m}{M} \quad (3.143)$$

onde $m := \min |f'(x)|$ e $M := \max |f''(x)|$ com o mínimo e o máximo tomados em um intervalo $[a, b]$ que contenha o zero da função $f(x)$. Aqui, por exemplo, podemos tomar $[a, b] = [0, \pi/2]$. Como, neste caso, $f'(x) = -\sin(x) - 1$, temos que $m = 1$. Também, como $f''(x) = -\cos(x)$, temos $M = 1$. Assim, concluímos que $\rho < 2$ (lembrando que $K_\rho(x^*) \subset [0, \pi/2]$). Ou seja, neste caso as iterações de Newton convergem para o zero de $f(x)$ para qualquer escolha da aproximação inicial $x^{(1)} \in [0, \pi/2]$. ◇

Exercícios

E 3.4.1. Encontre a raiz positiva da função $f(x) = \cos(x) - x^2$ pelo método de Newton inicializando-o com $x^{(0)} = 1$. Realize a iteração até obter estabilidade no *quinto* dígito significativo.

E 3.4.2. Considere o problema de calcular as soluções positivas da equação:

$$\operatorname{tg}(x) = 2x^2. \quad (3.144)$$

- a) Use o método gráfico para isolar as duas primeiras raízes positivas em pequenos intervalos. Use a teoria para argumentar quanto à existência e unicidade das raízes dentro intervalos escolhidos.
- b) Calcule cada uma das raízes pelo método de Newton com oito dígitos significativos e discuta a convergência.

E 3.4.3. Considere a equação

$$e^{-x^2} = x \quad (3.145)$$

trace o gráfico com auxílio do computador e verifique que ela possui uma raiz positiva. Encontre uma aproximação para esta raiz pelo gráfico e use este valor para inicializar o método de Newton e obtenha uma aproximação para a raiz com 8 dígitos significativos. (Use o comando `format('v',16)` para alterar a visualização no Scilab.)

E 3.4.4. Isole e encontre as cinco primeiras raízes positivas da equação com 6 dígitos corretos através de traçado de gráfico e do método de Newton.

$$\cos(10x) = e^{-x}. \quad (3.146)$$

Dica: a primeira raiz positiva está no intervalo $(0, 0,02)$. Fique atento.

E 3.4.5. Encontre as raízes do polinômio $f(x) = x^4 - 4x^2 + 4$ através do método de Newton. O que você observa em relação ao erro obtido? Compare com a situação do Problema 4.2.4.

E 3.4.6. Encontre as raízes reais do polinômio $f(x) = \frac{x^5}{100} + x^4 + 3x + 1$ isolando-as pelo método do gráfico e depois usando o método de Newton. Expresse a solução com 7 dígitos significativos.

E 3.4.7. Considere o método de Newton aplicado para encontrar a raiz de $f(x) = x^3 - 2x + 2$. O que acontece quando $x^{(0)} = 0$? Escolha um valor adequado para inicializar o método e obter a única raiz real desta equação.

E 3.4.8. Justifique a construção do processo iterativo do método de Newton através do conceito de estabilidade de ponto fixo e convergência do método da iteração. Dica: Considere os problemas 4.3.17 e 4.3.18.

E 3.4.9. Entenda a interpretação geométrica ao método de Newton. Encontre um valor para iniciar o método de Newton aplicado ao problema $f(x) = xe^{-x} = 0$ tal que o esquema iterativo divirja.

E 3.4.10. (Computação) Aplique o método de Newton à função $f(x) = \frac{1}{x} - A$ e construa um esquema computacional para calcular a inversa de A com base em operações de multiplicação e soma/subtração.

E 3.4.11. (Computação) Aplique o método de Newton à função $f(x) = x^n - A$ e construa um esquema computacional para calcular $\sqrt[n]{A}$ para $A > 0$ com base em operações de multiplicação e soma/subtração.

E 3.4.12. (Computação) Aplique o método de Newton à função $f(x) = \frac{1}{x^2} - A$ e construa um esquema computacional para calcular $\frac{1}{\sqrt{A}}$ para $A > 0$ com base em operações de multiplicação e soma/subtração.

E 3.4.13. Considere a função dada por

$$\psi(x) = \ln(15 - \ln(x)) \quad (3.155)$$

definida para $x \in (0, e^{15})$

- a) Use o teorema do ponto fixo para provar que se $x^{(0)}$ pertence ao intervalo $[1, 3]$, então a sequência dada iterativamente por

$$x^{(n+1)} = \psi(x^{(n)}), n \geq 0 \quad (3.156)$$

converge para o único ponto fixo, x^* , de ψ . Construa a iteração $x^{(n+1)} = \psi(x^{(n)})$ e obtenha numericamente o valor do ponto fixo x^* . Expresse a resposta com 5 algarismos significativos corretos.

- b) Construa a iteração do método de Newton para encontrar x^* , explicitando a relação de recorrência e iniciando com $x_0 = 2$. Use o computador para obter a raiz e expresse a resposta com oito dígitos significativos corretos.

3.5 Método das secantes

O **método das secantes** é uma variação do método de Newton, evitando a necessidade de conhecer-se a derivada analítica de $f(x)$. Dada uma função $f(x)$, a ideia é aproximar sua derivada pela razão fundamental:

$$f'(x) \approx \frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0}, \quad x \approx x_0. \quad (3.157)$$

Mais precisamente, o método de Newton é uma iteração de ponto fixo da forma:

$$x^{(n+1)} = x^{(n)} - \alpha(x^{(n)})f(x^{(n)}), \quad n \geq 1, \quad (3.158)$$

onde $x^{(1)}$ é uma aproximação inicial dada e $\alpha(x^{(n)}) = 1/f'(x^{(n)})$. Usando a aproximação da derivada acima, com $x = x^{(n)}$ e $x_0 = x^{(n-1)}$, temos:

$$\alpha(x^{(n)}) = \frac{1}{f'(x^{(n)})} \approx \frac{x^{(n)} - x^{(n-1)}}{f(x^{(n)}) - f(x^{(n-1)})}. \quad (3.159)$$

Isto nos motiva a introduzir a **iteração do método das secantes** dada por:

$$x^{(n+1)} = x^{(n)} - f(x^{(n)}) \frac{x^{(n)} - x^{(n-1)}}{f(x^{(n)}) - f(x^{(n-1)})}, \quad n \geq 2. \quad (3.160)$$

Observe que para inicializarmos a iteração acima precisamos de duas aproximações iniciais, a saber, $x^{(1)}$ e $x^{(2)}$. Maneiras apropriadas de escolher estas aproximações podem ser inferidas da interpretação geométrica do método.

Exemplo 3.5.1. Encontre as raízes de $f(x) = \cos(x) - x$.

Solução. Da inspeção do gráfico das funções $y = \cos(x)$ e $y = x$, sabemos que esta equação possui uma raiz em torno de $x = 0,8$. Iniciamos o método com $x_0 = 0,7$ e $x_1 = 0,8$.

$x^{(n-1)}$	$x^{(n)}$	m	$x^{(n+1)}$
		$\frac{f(0,8)-f(0,7)}{0,8-0,7} =$	$0,8 - \frac{f(0,8)}{-1,6813548} =$
0,7	0,8	-1,6813548	0,7385654
0,8	0,7385654	-1,6955107	0,7390784
0,7385654	0,7390784	-1,6734174	0,7390851
0,7390784	0,7390851	-1,6736095	0,7390851

◇

3.5.1 Interpretação geométrica

Enquanto, o método de Newton está relacionado às retas tangentes ao gráfico da função objetivo $f(x)$, o método das secantes, como o próprio nome indica, está relacionado às retas secantes.

Sejam $f(x)$ e as aproximações $x^{(1)}$ e $x^{(2)}$ do zero x^* desta função (veja Figura 4.7). A iteração do método das secantes fornece:

$$x^{(3)} = x^{(2)} - f(x^{(2)}) \frac{x^{(2)} - x^{(1)}}{f(x^{(2)}) - f(x^{(1)})}. \quad (3.161)$$

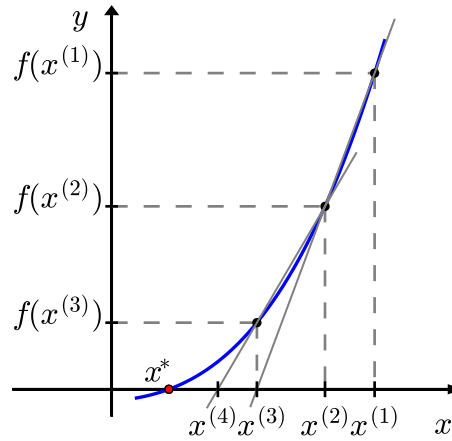


Figure 3.7: Método das secantes.

De fato, $x^{(3)}$ é o ponto de interseção da reta secante ao gráfico de $f(x)$ pelos pontos $x^{(1)}$ e $x^{(2)}$ com o eixo das abscissas. Com efeito, a equação desta reta secante é:

$$y = \frac{f(x^{(2)}) - f(x^{(1)})}{x^{(2)} - x^{(1)}}(x - x^{(2)}) + f(x^{(2)}). \quad (3.162)$$

Esta reta intercepta o eixo das abscissas no ponto x tal que $y = 0$, isto é:

$$\frac{f(x^{(2)}) - f(x^{(1)})}{x^{(2)} - x^{(1)}}(x - x^{(2)}) + f(x^{(2)}) = 0 \Rightarrow x = x^{(2)} - f(x^{(2)}) \frac{x^{(2)} - x^{(1)}}{f(x^{(2)}) - f(x^{(1)})}. \quad (3.163)$$

3.5.2 Análise de convergência

Uma análise assintótica semelhante àquela feita para o método de Newton na subseção 4.4.2 nos indica que, para uma função $f(x)$ duas vezes diferenciável, as iterações do método da secante satisfazem:

$$|x^{(n+1)} - x^*| \approx C|x^{(n)} - x^*||x^{(n-1)} - x^*|, \quad (3.164)$$

para aproximações iniciais suficientemente próximas de x^* , onde $f(x^*) = 0$. Além disso, veremos que:

$$|x^{(n+1)} - x^*| \leq C|x^{(n)} - x^*|^p, \quad p = \frac{\sqrt{5} + 1}{2} \approx 1,618 \quad (3.165)$$

sob certas condições. Ou seja, o método das secantes tem **taxa de convergência superlinear**.

Teorema 3.5.1 (Método das secantes). *Seja $f \in C^2([a, b])$ uma função com $x^* \in (a, b)$ tal que $f(x^*) = 0$. Sejam, também:*

$$m := \min_{x \in [a, b]} |f'(x)| > 0 \quad e \quad M := \max_{x \in [a, b]} |f''(x)| < \infty. \quad (3.166)$$

Além disso, seja $\rho > 0$ tal que:

$$q := \frac{M}{2m}\rho < 1, \quad K_\rho(x^*) := \{x \in \mathbb{R}; |x - x^*| \leq \rho\} \subset [a, b]. \quad (3.167)$$

Então, para aproximações iniciais $x^{(1)}, x^{(2)} \in K_\rho(x^*)$, com $x^{(1)} \neq x^{(2)}$, temos que as iterações do método das secantes $x^{(n)} \in K_\rho(x^*)$, $n \geq 1$, e $x^{(n)} \rightarrow x^*$, quando $n \rightarrow \infty$. Além disso, vale a seguinte estimativa de convergência **a priori**:

$$|x^{(n)} - x^*| \leq \frac{2m}{M} q^{\gamma_{n-1}}, \quad n \geq 1, \quad (3.168)$$

onde $\{\gamma_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ é a sequência de Fibonacci⁷⁸, bem como vale a estimativa **a posteriori**:

$$|x^{(n)} - x^*| \leq \frac{M}{2m} |x^{(n)} - x^{(n-1)}| |x^{(n-1)} - x^{(n-2)}|, \quad n \geq 3. \quad (3.169)$$

Proof. Sejam $n \in \mathbb{N}$ com $n \geq 2$ e $x^{(n)}, x^{(n-1)} \in K_\rho(x^*)$, tal que $x^{(n)} \neq x^{(n-1)}$, $x^{(n)} \neq x^*$ e $x^{(n-1)} \neq x^*$. Seja, também:

$$g(x^{(n)}, x^{(n-1)}) := x^{(n)} - f(x^{(n)}) \frac{x^{(n)} - x^{(n-1)}}{f(x^{(n)}) - f(x^{(n-1)})}. \quad (3.170)$$

Com isso, temos:

$$g(x^{(n)}, x^{(n-1)}) - x^* = x^{(n)} - f(x^{(n)}) \frac{x^{(n)} - x^{(n-1)}}{f(x^{(n)}) - f(x^{(n-1)})} - x^* \quad (3.171)$$

$$= \frac{x^{(n)} - x^{(n-1)}}{f(x^{(n)}) - f(x^{(n-1)})} \left\{ (x^{(n)} - x^*) \frac{f(x^{(n)}) - f(x^{(n-1)})}{x^{(n)} - x^{(n-1)}} \right. \quad (3.172)$$

$$\left. - f(x^{(n)}) + f(x^*) \right\}. \quad (3.173)$$

$$(3.174)$$

Então, da cota assumida para primeira derivada de $f(x)$ e do teorema do valor médio, temos:

$$|g(x^{(n)}, x^{(n-1)}) - x^*| \leq \frac{|x^{(n)} - x^*|}{m} \left| \frac{f(x^{(n)}) - f(x^{(n-1)})}{x^{(n)} - x^{(n-1)}} - \frac{f(x^{(n)}) - f(x^*)}{x^{(n)} - x^*} \right|. \quad (3.175)$$

⁷Leonardo Fibonacci, c. 1170 - c. 1250, matemático italiano.

⁸A sequência de Fibonacci $\{\gamma_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ é definida por $\gamma_0 = \gamma_1 = 1$ e $\gamma_{n+1} = \gamma_n + \gamma_{n-1}$, $n \geq 1$.

Agora, iremos estimar este último termo a direita. Para tanto, começamos observando que da expansão em polinômio de Taylor de ordem 0 da função $f(x)$ com resto na forma integral, temos:

$$\frac{f(x^{(n)}) - f(x^{(n-1)})}{x^{(n)} - x^{(n-1)}} = - \int_0^1 \frac{d}{dr} f(x^{(n)} + r(x^{(n-1)} - x^{(n)})) \frac{dr}{x^{(n)} - x^{(n-1)}} \quad (3.176)$$

$$= \int_0^1 f'(x^{(n)} + r(x^{(n-1)} - x^{(n)})) dr \quad (3.177)$$

De forma análoga, temos:

$$\frac{f(x^{(n)}) - f(x^*)}{x^{(n)} - x^*} = \int_0^1 f'(x^{(n)} + r(x^* - x^{(n)})) dr \quad (3.178)$$

Logo, temos:

$$\begin{aligned} \frac{f(x^{(n)}) - f(x^{(n-1)})}{x^{(n)} - x^{(n-1)}} - \frac{f(x^{(n)}) - f(x^*)}{x^{(n)} - x^*} = \\ \int_0^1 [f'(x^{(n)} + r(x^{(n-1)} - x^{(n)})) - f'(x^{(n)} + r(x^* - x^{(n)}))] dr. \end{aligned} \quad (3.179)$$

Agora, novamente temos:

$$\begin{aligned} & f'(x^{(n)} + r(x^{(n-1)} - x^{(n)})) - f'(x^{(n)} + r(x^* - x^{(n)})) \\ &= \int_0^r \frac{d}{ds} f'(x^{(n)} + r(x^{(n-1)} - x^{(n)}) + s(x^* - x^{(n-1)})) ds \\ &= \int_0^r f''(x^{(n)} + r(x^{(n-1)} - x^{(n)}) + s(x^* - x^{(n-1)})) ds (x^* - x^{(n-1)}). \end{aligned} \quad (3.180)$$

Retornando à Equação (4.179) e usando a cota para a segunda derivada, obtemos:

$$\left| \frac{f(x^{(n)}) - f(x^{(n-1)})}{x^{(n)} - x^{(n-1)}} - \frac{f(x^{(n)}) - f(x^*)}{x^{(n)} - x^*} \right| \leq \frac{M}{2} |x^{(n-1)} - x^*|. \quad (3.181)$$

Utilizando a Equação (4.175), obtemos:

$$|g(x^{(n)}, x^{(n-1)}) - x^*| \leq \frac{M}{2m} |x^{(n)} - x^*| |x^{(n-1)} - x^*| \leq \frac{M}{2m} \rho^2 < \rho. \quad (3.182)$$

Portanto, concluímos que as iterações do método da secantes $x^{(n)}$ permanecem no conjunto $K_\rho(x^*)$, se começarem nele. Além disso, temos demonstrado que:

$$|x^{(n+1)} - x^*| \leq \frac{M}{2m} |x^{(n)} - x^*| |x^{(n-1)} - x^*|. \quad (3.183)$$

Com isso, temos:

$$\rho_n := \frac{M}{2m} |x^{(n)} - x^*| \Rightarrow \rho_{n+1} \leq \rho_n \rho_{n-1}, \quad n \geq 2. \quad (3.184)$$

Como $\rho_1 \leq q$ e $\rho_2 \leq q$, temos $\rho_n \leq q^{\gamma_{n-1}}$, $n \geq 1$. Isto mostra a estimativa de convergência **a priori**:

$$|x^n - x^*| \leq \frac{2m}{M} q^{\gamma_{n-1}}. \quad (3.185)$$

Além disso, como $\gamma_n \rightarrow \infty$ quando $n \rightarrow \infty$ e $q < 1$, temos que as iterações do método das secantes $x^{(n)} \rightarrow x^*$ quando $n \rightarrow \infty$.

Por fim, mostramos a estimativa de convergência **a posteriori**. Para tanto, da cota assumida para a primeira derivada e do teorema do valor médio, temos, para $n \geq 3$:

$$|x^{(n)} - x^*| \leq \frac{1}{m} |f(x^{(n)} - f(x^*))| \quad (3.186)$$

$$= \frac{1}{m} \left| f(x^{(n-1)}) + (x^{(n)} - x^{(n-1)}) \frac{f(x^{(n)}) - f(x^{(n-1)})}{x^{(n)} - x^{(n-1)}} \right| \quad (3.187)$$

$$= \frac{1}{m} \left| x^{(n)} - x^{(n-1)} \right| \left| \frac{f(x^{(n)}) - f(x^{(n-1)})}{x^{(n)} - x^{(n-1)}} + \frac{f(x^{(n-1)})}{x^{(n)} - x^{(n-1)}} \right| \quad (3.188)$$

Agora, a iteração do método das secantes fornece:

$$x^{(n)} = x^{(n-1)} - f(x^{(n-1)}) \frac{x^{(n-1)} - x^{(n-2)}}{f(x^{(n-1)}) - f(x^{(n-2)})} \quad (3.189)$$

e temos:

$$\frac{f(x^{(n-1)})}{x^{(n)} - x^{(n-1)}} = - \frac{f(x^{(n-1)}) - f(x^{(n-2)})}{x^{(n-1)} - x^{(n-2)}}. \quad (3.190)$$

Portanto:

$$|x^{(n)} - x^*| \leq \frac{1}{m} |x^{(n)} - x^{(n-1)}| \left| \frac{f(x^{(n-1)}) - f(x^{(n)})}{x^{(n-1)} - x^{(n)}} - \frac{f(x^{(n-1)}) - f(x^{(n-2)})}{x^{(n-1)} - x^{(n-2)}} \right|. \quad (3.191)$$

Observamos que o último termo pode ser estimado como feito acima para o termo análogo na Inequação (4.175). Com isso, obtemos a estimativa desejada:

$$|x^{(n)} - x^*| \leq \frac{M}{2m} |x^{(n)} - x^{(n-1)}| |x^{(n)} - x^{(n-2)}|. \quad (3.192)$$

□

Proposição 3.5.1 (Sequência de Fibonacci). *A sequência de Fibonacci $\{\gamma_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ é assintótica a $\gamma_n \sim \lambda_1^{n+1}/\sqrt{5}$ e:*

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\gamma_{n+1}}{\gamma_n} = \lambda_1, \quad (3.193)$$

onde $\lambda_1 = (1 + \sqrt{5})/2 \approx 1,618$ é a porção áurea.

Proof. A sequência de Fibonacci $\{\gamma_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ é definida por $\gamma_0 = \gamma_1 = 1$ e $\gamma_{n+1} = \gamma_n + \gamma_{n-1}$, $n \geq 1$. Logo, satisfaz a seguinte equação de diferenças:

$$\gamma_{n+2} - \gamma_{n+1} - \gamma_n = 0, \quad n \in \mathbb{N}. \quad (3.194)$$

Tomando $\gamma_n = \lambda^n$, $\lambda \neq 0$ temos:

$$\lambda^n (\lambda^2 - \lambda - 1) = 0 \Rightarrow \lambda^2 - \lambda - 1 = 0 \Rightarrow \lambda_{1,2} = \frac{1 \pm \sqrt{5}}{2}. \quad (3.195)$$

Portanto, $\gamma_n = c_1 \lambda_1^n + c_2 \lambda_2^n$. Como $\gamma_0 = \gamma_1 = 1$, as constantes satisfazem:

$$\begin{aligned} c_1 + c_2 &= 1 \\ c_1 \lambda_1 + c_2 \lambda_2 &= 1 \end{aligned} \Rightarrow c_1 = \frac{1 + \sqrt{5}}{2\sqrt{5}}, \quad c_2 = -\frac{1 - \sqrt{5}}{2\sqrt{5}}. \quad (3.196)$$

Ou seja, obtemos a seguinte forma explícita para os números de Fibonacci:

$$\gamma_n = \frac{1}{\sqrt{5}} \left[\left(\frac{1 + \sqrt{5}}{2} \right)^{n+1} - \left(\frac{1 - \sqrt{5}}{2} \right)^{n+1} \right]. \quad (3.197)$$

Daí, segue imediatamente o enunciado. \square

Observação 3.5.1. Sob as hipóteses do Teorema 4.5.1 e da Proposição 4.5.1, temos:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{|x^{(n+1)} - x^*|}{|x^{(n)} - x^*|^{\lambda_1}} \leq \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{M}{2m} |x^{(n)} - x^*|^{1-\lambda_1} |x^{(n-1)} - x^*| \quad (3.198)$$

$$\leq \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{2m}{M} \right)^{1-\lambda_1} q^{(2-\lambda_1)\lambda_1^n / \sqrt{5}} = 0. \quad (3.199)$$

Isto mostra que o método das secantes (nestas hipóteses) tem taxa de convergência superlinear ($\lambda_1 \approx 1,6$).

3.6 Critérios de parada

Quando usamos métodos iterativos precisamos determinar um critério de parada. A Tabela 4.4 indica critérios de parada usuais para os métodos que estudamos neste capítulo.

Observação 3.6.1. O erro na tabela sempre se refere ao erro absoluto esperado. Nos três últimos métodos, é comum que se exija como critério de parada que a condição seja satisfeita por alguns poucos passos consecutivos. Outros critérios podem ser usados. No métodos das secantes, deve-se ter o cuidado de evitar divisões por zero quando $x_{n+1} - x_n$ muito pequeno em relação à resolução do sistema de numeração.

Table 3.4: Quadro comparativo.

Método	Convergência	Erro	Critério de parada
Bisseção	Linear ($p = 1$)	$\epsilon_{n+1} = \frac{1}{2}\epsilon$	$\frac{b_n - a_n}{2} < \text{erro}$
Iteração linear	Linear ($p = 1$)	$\epsilon_{n+1} \approx \phi'(x^*) \epsilon_n$	$\frac{ \Delta_n }{1 - \frac{\Delta_n}{\Delta_{n-1}}} < \text{erro}$ $\Delta_n < \Delta_{n-1}$
Newton	Quadrática ($p = 2$)	$\epsilon_{n+1} \approx \frac{1}{2} \left \frac{f''(x^*)}{f'(x^*)} \right \epsilon_n^2$	$ \Delta_n < \text{erro}$
Secante	$p = \frac{\sqrt{5} + 1}{2}$ $\approx 1,618$	$\epsilon_{n+1} \approx \left \frac{f''(x^*)}{f'(x^*)} \right \epsilon_n \epsilon_{n-1}$ $\approx M \epsilon_n^\phi$	$ \Delta_n < \text{erro}$

Exercícios

E 3.6.1. Refaça as questões 4.4.3, 4.4.4, 4.4.5 e 4.4.6, usando o método das secantes.

E 3.6.2. Dê uma interpretação geométrica ao método das secantes. Qual a vantagem do método das secantes sobre o método de Newton?

E 3.6.3. Aplique o método das secantes para resolver a equação

$$e^{-x^2} = 2x \quad (3.200)$$

E 3.6.4. Refaça o Problema 4.2.8 usando o método de Newton e das secantes.

E 3.6.5. Seja uma função $f(x)$ dada duas vezes continuamente diferenciável. Faça uma análise assintótica para mostrar que as iterações do método das secantes satisfazem:

$$|x^{(n+1)} - x^*| \approx C|x^{(n)} - x^*||x^{(n-1)} - x^*|, \quad (3.201)$$

para aproximações iniciais $x^{(1)}$ e $x^{(2)}$ suficientemente próximas de x^* , onde $f(x^*) = 0$.

3.7 Exercícios finais

E 3.7.1. Calcule uma equação da reta tangente a curva $y = e^{-(x-1)^2}$ que passa pelo ponto $(3, 1/2)$.

E 3.7.2. Resolva numericamente a inequação:

$$e^{-x^2} < 2x \quad (3.219)$$

E 3.7.3. A equação

$$\cos(\pi x) = e^{-2x} \quad (3.220)$$

tem infinitas raízes. Usando métodos numéricos encontre as primeiras raízes dessa equação. Verifique a j -ésima raiz (z_j) pode ser aproximada por $j - 1/2$ para j grande. Use o método de Newton para encontrar uma aproximação melhor para z_j .

E 3.7.4. (Eletricidade) A corrente elétrica, I , em Ampéres em uma lâmpada em função da tensão elétrica, V , é dada por

$$I = \left(\frac{V}{150} \right)^{0.8} \quad (3.221)$$

Qual a potência da lâmpada quando ligada em série com uma resistência de valor R a uma fonte de 150V quando. (procure erro inferior a 1%)

- a) $R = 0\Omega$
- b) $R = 10\Omega$
- c) $R = 50\Omega$
- d) $R = 100\Omega$
- E) $R = 500\Omega$

E 3.7.5. (Bioquímica) A concentração sanguínea de um medicamento é modelado pela seguinte expressão

$$c(t) = Ate^{-\lambda t} \quad (3.222)$$

onde $t > 0$ é o tempo em minutos decorrido desde a administração da droga. A é a quantidade administrada em mg/ml e λ é a constante de tempo em min^{-1} . Responda:

- Sendo $\lambda = 1/3$, em que instantes de tempo a concentração é metade do valor máximo. Calcule com precisão de segundos.
- Sendo $\lambda = 1/3$ e $A = 100mg/ml$, durante quanto tempo a concentração permanece maior que $10mg/ml$.

E 3.7.6. Considere o seguinte modelo para crescimento populacional em um país:

$$P(t) = A + Be^{\lambda t}. \quad (3.223)$$

onde t é dado em anos. Use t em anos e $t = 0$ para 1960. Encontre os parâmetros A , B e λ com base nos anos de 1960, 1970 e 1991 conforme tabela:

Ano	população
1960	70992343
1970	94508583
1980	121150573
1991	146917459

Use esses parâmetros para calcular a população em 1980 e compare com o valor do censo. Dica: considere $\frac{P(31)-P(0)}{P(10)-P(0)}$ e reduza o sistema a uma equação apenas na variável λ .

E 3.7.7. (Fluidos) Uma boia esférica flutua na água. Sabendo que a boia tem 10ℓ de volume e $2Kg$ de massa. Calcule a altura da porção molhada da boia.

E 3.7.8. (Fluidos) Uma boia cilíndrica tem secção transversal circular de raio $10cm$ e comprimento $2m$ e pesa $10Kg$. Sabendo que a boia flutua sobre água com o eixo do cilindro na posição horizontal, calcule a altura da parte molhada da boia.

E 3.7.9. Encontre com 6 casas decimais o ponto da curva $y = \ln x$ mais próximo da origem.

E 3.7.10. (Matemática financeira) Um computador é vendido pelo valor a vista de R\$2.000,00 ou em 1+15 prestações de R\$200,00. Calcule a taxa de juros associada à venda a prazo.

E 3.7.11. (Matemática financeira) O valor de R\$110.000,00 é financiado conforme a seguinte programa de pagamentos:

Mês	pagamento
1	20.000,00
2	20.000,00
3	20.000,00
4	19.000,00
5	18.000,00
6	17.000,00
7	16.000,00

Calcule a taxa de juros envolvida. A data do empréstimo é o mês zero.

E 3.7.12. (Controle de sistemas) Depois de acionado um sistema de aquecedores, a temperatura em um forno evolui conforme a seguinte equação

$$T(t) = 500 - 800e^{-t} + 600e^{-t/3}. \quad (3.224)$$

onde T é a temperatura em Kelvin e t é tempo em horas.

- Obtenha analiticamente o valor de $\lim_{t \rightarrow \infty} T(t)$.
- Obtenha analiticamente o valor máximo de $T(t)$ e o instante de tempo quando o máximo acontece
- Obtenha numericamente com precisão de minutos o tempo decorrido até que a temperatura passe pela primeira vez pelo valor de equilíbrio obtido no item a.
- Obtenha numericamente com precisão de minutos a duração do período durante o qual a temperatura permanece pelo menos 20% superior ao valor de equilíbrio.

E 3.7.13. Encontre os pontos onde a elipse que satisfaz $\frac{x^2}{3} + y^2 = 1$ intersepta a parábola $y = x^2 - 2$.

E 3.7.14. (Otimização) Encontre a área do maior retângulo que é possível inscrever entre a curva $e^{-x^2}(1 + \cos(x))$ e o eixo $y = 0$.

E 3.7.15. (Otimização) Uma indústria consome energia elétrica de duas usinas fornecedoras. O custo de fornecimento em reais por hora como função da potência consumida em kW é dada pelas seguintes funções

$$C_1(x) = 500 + .27x + 4.1 \cdot 10^{-5}x^2 + 2.1 \cdot 10^{-7}x^3 + 4.2 \cdot 10^{-10}x^4 \quad (3.225)$$

$$C_2(x) = 1000 + .22x + 6.3 \cdot 10^{-5}x^2 + 8.5 \cdot 10^{-7}x^3 \quad (3.226)$$

Onde $C_1(x)$ e $C_2(x)$ são os custos de fornecimento das usinas 1 e 2, respectivamente. Calcule o custo mínimo da energia elétrica quando a potência total consumida é $1500kW$. Obs: Para um problema envolvendo mais de duas usinas, veja ??.

E 3.7.16. (Termodinâmica) A pressão de saturação (em bar) de um dado hidrocarboneto pode ser modelada pela equação de Antoine:

$$\ln(P^{sat}) = A - \frac{B}{T + C} \quad (3.227)$$

onde T é a temperatura e A , B e C são constantes dadas conforme a seguir:

Hidrocarboneto	A	B	C
N-pentano	9.2131	2477.07	-39.94
N-heptano	9.2535	2911.32	-56.51

- a) Calcule a temperatura de bolha de uma mistura de N-pentano e N-heptano à pressão de 1.2bar quando as frações molares dos gases são $z_1 = z_2 = 0.5$. Para tal utilize a seguinte equação:

$$P = \sum_i z_i P_i^{sat} \quad (3.228)$$

- b) Calcule a temperatura de orvalho de uma mistura de N-pentano e N-heptano à pressão de 1.2bar quando as frações molares dos gases são $z_1 = z_2 = 0.5$. Para tal utilize a seguinte equação:

$$\frac{1}{P} = \sum_i \frac{z_i}{P_i^{sat}} \quad (3.229)$$

E 3.7.17. Encontre os três primeiros pontos de mínimo da função

$$f(x) = e^{-x/11} + x \cos(2x) \quad (3.230)$$

para $x > 0$ com erro inferior a 10^{-7} .

Chapter 4

Solução de equações de uma variável

Neste capítulo, construiremos aproximações numéricas para a solução de **equações algébricas em uma única variável real**. Observamos que obter uma solução para uma dada equação é equivalente a encontrar um **zero de uma função real** apropriada. Com isso, iniciamos este capítulo discutindo condições de existência e unicidade de raízes de funções de uma variável real. Então, apresentamos o **método da bisseção** como uma primeira abordagem numérica para a solução de tais equações.

Em seguida, exploramos outra abordagem via **iteração do ponto fixo**. Desta, obtemos o **método de Newton**¹, para o qual estudamos aplicações e critérios de convergência. Por fim, apresentamos o **método das secantes** como uma das possíveis variações do método de Newton.

Ao longo do capítulo, apresentamos algumas computações com Python. Nestas, assumiremos o que os seguintes módulos estão carregados:

```
>>> import numpy as np
>>> import matplotlib.pyplot as plt
>>> import scipy as sp
>>> from scipy import optimize
```

A segunda instrução carrega a biblioteca de computação científica [numpy](#) e a terceira carrega a biblioteca gráfica [matplotlib](#).

¹Sir Isaac Newton, 1642 - 1727, matemático e físico inglês.

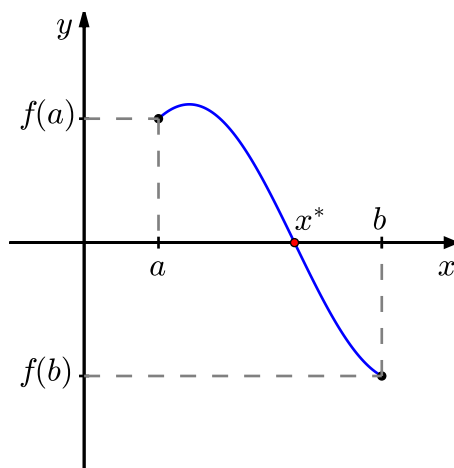


Figure 4.1: Teorema de Bolzano.

4.1 Existência e unicidade

O **teorema de Bolzano**² nos fornece condições suficientes para a existência do zero de uma função. Este é uma aplicação direta do **teorema do valor intermediário**.

Teorema 4.1.1 (Teorema de Bolzano). *Se $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$, $y = f(x)$, é uma função contínua tal que $f(a) \cdot f(b) < 0$ ³, então existe $x^* \in (a, b)$ tal que $f(x^*) = 0$.*

Proof. O resultado é uma consequência imediata do teorema do valor intermediário que estabelece que dada uma função contínua $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$, $y = f(x)$, tal que $f(a) < f(b)$ (ou $f(b) < f(a)$), então para qualquer $d \in (f(a), f(b))$ (ou $k \in (f(b), f(a))$) existe $x^* \in (a, b)$ tal que $f(x^*) = k$. Ou seja, nestas notações, se $f(a) \cdot f(b) < 0$, então $f(a) < 0 < f(b)$ (ou $f(b) < 0 < f(a)$). Logo, tomando $k = 0$, temos que existe $x^* \in (a, b)$ tal que $f(x^*) = k = 0$. \square

Em outras palavras, se $f(x)$ é uma função contínua em um dado intervalo no qual ela troca de sinal, então ela tem pelo menos um zero neste intervalo (veja a Figura 4.1).

Exemplo 4.1.1. Mostre que existe pelo menos uma solução da equação $e^x = x + 2$ no intervalo $(-2, 0)$.

²Bernhard Placidus Johann Gonzal Nepomuk Bolzano, 1781 - 1848, matemático do Reino da Boêmia.

³Esta condição é equivalente a dizer que a função troca de sinal no intervalo.

Solução. Primeiramente, observamos que resolver a equação $e^x = x+2$ é equivalente a resolver $f(x) = 0$ com $f(x) = e^x - x - 2$. Agora, como $f(-2) = e^{-2} > 0$ e $f(0) = -1 < 0$, temos do teorema de Bolzano que existe pelo menos um zero de $f(x)$ no intervalo $(-2, 0)$. E, portanto, existe pelo menos uma solução da equação dada no intervalo $(-2, 0)$.

Podemos usar o GNU Octave para estudar esta função. Por exemplo, podemos definir a função $f(x)$ e computá-la nos extremos do intervalo dado com os seguintes comandos:

```
>> f = @(x) exp(x)-x-2
f = f(x) = exp(x)-x-2
>> f(-2),f(0)
ans = 0.13534
ans = -1
```

Alternativamente (e com maior precisão), podemos verificar diretamente o sinal da função nos pontos desejados com comando `sign`:

```
>> sign(f(-2)),sign(f(0))
ans = 1
ans = -1
```

◇

Quando procuramos aproximações para zeros de funções, é aconselhável isolar cada raiz em um intervalo. Desta forma, gostaríamos de poder garantir a existência e a unicidade da raiz dentro de um dado intervalo. A seguinte proposição nos fornece condições suficientes para tanto.

Proposição 4.1.1. *Se $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ é uma função diferenciável, $f(a) \cdot f(b) < 0$ e $f'(x) > 0$ (ou $f'(x) < 0$) para todo $x \in (a, b)$, então existe um único $x^* \in (a, b)$ tal que $f(x^*) = 0$.*

Em outras palavras, para garantirmos que exista um único zero de uma dada função diferenciável em um intervalo, é suficiente que ela troque de sinal e seja monótona neste intervalo.

Exemplo 4.1.2. No Exemplo 4.1.1, mostramos que existe pelo menos um zero de $f(x) = e^x - x - 2$ no intervalo $(-2, 0)$, pois $f(x)$ é contínua e $f(-2) \cdot f(0) < 0$. Agora, observamos que, além disso, $f'(x) = e^x - 1$ e, portanto, $f'(x) < 0$ para todo $x \in (-2, 0)$. Logo, da Proposição 4.1.1, temos garantida a existência de um único zero no intervalo dado.

Podemos inspecionar o comportamento da função $f(x) = e^x - x - 2$ e de sua derivada fazendo seus gráficos no GNU Octave. Para tanto, podemos fazer o seguinte teste:

```
>> xx = linspace(-2,0,50);
>> f = @(x) exp(x)-x-2 #define f
f = f(x) = exp(x)-x-2
>> plot(xx,f(xx))grid on;hold on #gráfico de f
>> fl = @(x) exp(x)-1 #a derivada
fl = f(x) = exp(x)-1
>> plot(xx,fl(xx)) #gráfico de f'
```

A discussão feita nesta seção, especialmente o teorema de Bolzano, nos fornece os fundamentos para o método da bisseção, o qual discutimos na próxima seção.

Exercícios

E 4.1.1. Mostre que $\cos x = x$ tem solução no intervalo $[0, \pi/2]$.

E 4.1.2. Mostre que $\cos x = x$ tem uma única solução no intervalo $[0, \pi/2]$.

E 4.1.3. Interprete a equação $\cos(x) = kx$ como o problema de encontrar a intersecção da curva $y = \cos(x)$ com $y = kx$. Encontre o valor positivo k para o qual essa equação admite exatamente duas raízes positivas distintas.

E 4.1.4. Mostre que a equação:

$$\ln(x) + x^3 - \frac{1}{x} = 10 \quad (4.1)$$

possui uma única solução positiva.

E 4.1.5. Use o teorema de Bolzano para mostrar que o erro absoluto ao aproximar o zero da função $f(x) = e^x - x - 2$ por $\bar{x} = -1,841$ é menor que 10^{-3} .

E 4.1.6. Mostre que o erro absoluto associado à aproximação $\bar{x} = 1,962$ para a solução exata x^* de:

$$e^x + \sin(x) + x = 10 \quad (4.2)$$

é menor que 10^{-4} .

E 4.1.7. Mostre que a equação

$$\ln(x) + x - \frac{1}{x} = v \quad (4.3)$$

possui uma solução para cada v real e que esta solução é única.

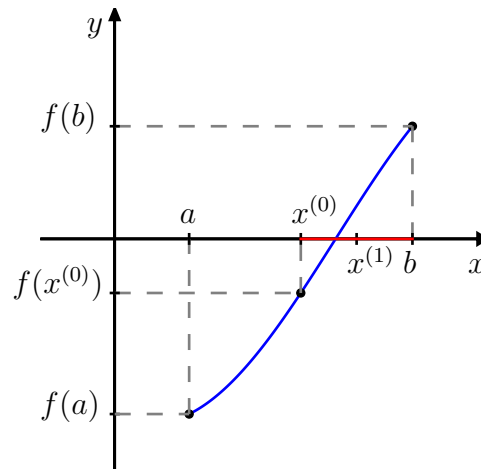


Figure 4.2: Método da biseção.

4.2 Método da biseção

O **método da biseção** explora o fato de que uma função contínua $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ com $f(a) \cdot f(b) < 0$ tem um zero no intervalo (a, b) (veja o teorema de Bolzano 4.1.1). Assim, a ideia para aproximar o zero de uma tal função $f(x)$ é tomar, como aproximação inicial, o ponto médio do intervalo $[a, b]$, isto é:

$$x^{(0)} = \frac{(a + b)}{2}. \quad (4.4)$$

Pode ocorrer de $f(x^{(0)}) = 0$ e, neste caso, o zero de $f(x)$ é $x^* = x^{(0)}$. Caso contrário, se $f(a) \cdot f(x^{(0)}) < 0$, então $x^* \in (a, x^{(0)})$. Neste caso, tomamos como nova aproximação do zero de $f(x)$ o ponto médio do intervalo $[a, x^{(0)}]$, isto é, $x^{(1)} = (a + x^{(0)})/2$. No outro caso, temos $f(x^{(0)}) \cdot f(b) < 0$ e, então, tomamos $x^{(1)} = (x^{(0)} + b)/2$. Repetimos este procedimento até obtermos a aproximação desejada (veja Figura 4.2).

De forma mais precisa, suponha que queiramos calcular uma aproximação com uma certa precisão TOL para um zero x^* de uma dada função contínua $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ tal que $f(a) \cdot f(b) < 0$. Iniciamos, tomando $n = 0$ e:

$$a^{(n)} = a, \quad b^{(n)} = b \quad \text{e} \quad x^{(n)} = \frac{a^{(n)} + b^{(n)}}{2}. \quad (4.5)$$

Verificamos o **critério de parada**, isto é, se $f(x^{(n)}) = 0$ ou:

$$\frac{|b^{(n)} - a^{(n)}|}{2} < TOL, \quad (4.6)$$

Table 4.1: Iteração do método da bisseção para o Exemplo 4.2.1.

n	$a^{(n)}$	$b^{(n)}$	$x^{(n)}$	$f(a^{(n)})f(x^{(n)})$	$\frac{ b^{(n)} - a^{(n)} }{2}$
0	-2	0	-1	< 0	1
1	-2	-1	-1,5	< 0	0,5
2	-2	-1,5	-1,75	< 0	0,25
3	-2	-1,75	-1,875	> 0	0,125
4	-1,875	-1,75	-1,8125	< 0	0,0625

então $x^{(n)}$ é a aproximação desejada. Caso contrário, preparamos a próxima iteração $n+1$ da seguinte forma: se $f(a^{(n)}) \cdot f(x^{(n)}) < 0$, então definimos $a^{(n+1)} = a^{(n)}$ e $b^{(n+1)} = x^{(n)}$; no outro caso, se $f(x^{(n)}) \cdot f(b^{(n)}) < 0$, então definimos $a^{(n+1)} = x^{(n)}$ e $b^{(n+1)} = b^{(n)}$. Trocando n por $n+1$, temos a nova aproximação do zero de $f(x)$ dada por:

$$x^{(n+1)} = \frac{a^{(n+1)} + b^{(n+1)}}{2}. \quad (4.7)$$

Voltamos a verificar o critério de parada acima e, caso não satisfeito, iteramos novamente. Iteramos até obtermos a aproximação desejada ou o número máximo de iterações ter sido atingido.

Exemplo 4.2.1. Use o método da bisseção para calcular uma solução de $e^x = x+2$ no intervalo $[-2, 0]$ com precisão $TOL = 10^{-1}$.

Solução. Primeiramente, observamos que resolver a equação dada é equivalente a calcular o zero de $f(x) = e^x - x - 2$. Além disso, temos $f(-2) \cdot f(0) < 0$. Desta forma, podemos iniciar o método da bisseção tomando o intervalo inicial $[a^{(0)}, b^{(0)}] = [-2, 0]$ e:

$$x^{(0)} = \frac{a^{(0)} + b^{(0)}}{2} = -1. \quad (4.8)$$

Apresentamos as iterações na Tabela 4.1. Observamos que a precisão $TOL = 10^{-1}$ foi obtida aproximando o zero de $f(x)$ por $x^{(4)} = -1,8125$.

Usando o GNU Octave neste exemplo, temos:

```
>> f = @(x) exp(x) - x - 2
f = f(x) = exp(x) - x - 2
>> a=-2, b=0, x=(a+b)/2, TOL = (b-a)/2, sign(f(a)*f(x))
a = -2
b = 0
```

```

x = -1
TOL = 1
ans = -1
>> b=x, x=(a+b)/2, TOL = (b-a)/2, sign(f(a)*f(x))
b = -1
x = -1.5000
TOL = 0.50000
ans = -1

```

e, assim, sucessivamente. Veja o código completo na Seção 4.2.1. \diamond

Vamos agora discutir sobre a **convergência** do método da bisseção, que é garantida pelo Teorema 4.2.1.

Teorema 4.2.1 (Convergência do método da bisseção). *Sejam $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ uma função contínua tal que $f(a) \cdot f(b) < 0$ e x^* o único zero de $f(x)$ no intervalo (a, b) . Então, a sequência $\{x^{(n)}\}_{n \geq 0}$ do método da bisseção satisfaz:*

$$|x^{(n)} - x^*| < \frac{b - a}{2^{n+1}}, \quad \forall n \geq 0. \quad (4.9)$$

Em particular, $x^{(n)} \rightarrow x^*$ quando $n \rightarrow \infty$.

Proof. Notemos que, a cada iteração, a distância entre a aproximação $x^{(n)}$ e o zero x^* da função é menor ou igual que a metade do tamanho do intervalo $[a^{(n)}, b^{(n)}]$ (veja Figura 4.2), isto é:

$$|x^{(n)} - x^*| \leq \frac{b^{(n)} - a^{(n)}}{2}. \quad (4.10)$$

Por construção do método, temos $[a^{(n)}, b^{(n)}] \subset [a^{(n-1)}, b^{(n-1)}]$ quando $n \geq 1$ e:

$$b^{(n)} - a^{(n)} = \frac{b^{(n-1)} - a^{(n-1)}}{2}. \quad (4.11)$$

Desta forma:

$$|x^{(n)} - x^*| \leq \frac{b^{(n)} - a^{(n)}}{2} = \frac{b^{(n-1)} - a^{(n-1)}}{2^2} = \dots = \frac{b^{(0)} - a^{(0)}}{2^{n+1}}, \quad \forall n \geq 1. \quad (4.12)$$

Logo, vemos que:

$$|x^{(n)} - x^*| \leq \frac{b - a}{2^{n+1}}, \quad \forall n \geq 0. \quad (4.13)$$

\square

Observamos que a hipótese de que $f(x)$ tenha um único zero no intervalo não é realmente necessária. Se a função tiver mais de um zero no intervalo inicial, as iterações ainda convergem para um dos zeros. Veja o Exercício 4.2.3.

Observação 4.2.1. O Teorema 4.2.1 nos fornece uma estimativa para a convergência do método da bisseção. Aproximadamente, temos:

$$|x^{(n+1)} - x^*| \lesssim \frac{1}{2}|x^{(n)} - x^*|. \quad (4.14)$$

Isto nos leva a concluir que o método da bisseção tem **taxa de convergência** linear.

Exemplo 4.2.2. No Exemplo 4.2.1, depois de escolhida a aproximação inicial $x^{(0)} = -1 \in [a, b] = [-2, 0]$, precisamos de 4 iterações do método da bisseção para computar uma aproximação com precisão de 10^{-1} do zero de $f(x) = e^x - x - 2$. Poderíamos ter estimado o número de iterações **a priori**, pois, como vimos acima:

$$|x^{(n)} - x^*| \leq \frac{b-a}{2^{n+1}}, \quad n \geq 0. \quad (4.15)$$

Logo, temos:

$$|x^{(n)} - x^*| < \frac{b-a}{2^{n+1}} = \frac{2}{2^{n+1}} \quad (4.16)$$

$$= 2^{-n} < 10^{-1} \Rightarrow n > -\log_2 10^{-1} \approx 3,32. \quad (4.17)$$

Isto está de acordo com o experimento numérico realizado naquele exemplo.

O método da bisseção tem a boa propriedade de garantia de convergência, bem como de fornecer uma simples estimativa do erro na aproximação calculada. Entretanto, a taxa de convergência linear é superada por outros métodos. A construção de tais métodos está, normalmente, associada à iteração do ponto fixo, a qual exploramos na próxima seção.

4.2.1 Código GNU Octave: método da bisseção

O seguinte código é uma implementação no GNU Octave do algoritmo da bisseção. As variáveis de entrada são:

- **f** - função objetivo
- **a** - extremo esquerdo do intervalo de inspeção $[a, b]$
- **b** - extremo direito do intervalo de inspeção $[a, b]$

Prof. M.e Daniel Cassimiro

- TOL - tolerância para o erro absoluto (critério de parada)
- N - número máximo de iterações depois da aproximação inicial

A variável de saída é:

- p - aproximação de uma raiz x^* de f, satisfazendo $|p - x^*| < TOL$ ou $f(p) = 0$.

```
function [p] = bissecao(f, a, b, TOL, N)
    i = 1;
    fa = f(a);
    while (i <= N)
        #iteracao da bissecao
        p = a + (b-a)/2;
        fp = f(p);
        #condicao de parada
        if ((fp == 0) || ((b-a)/2 < TOL))
            return;
        endif
        #bissecta o intervalo
        i = i+1;
        if (fa * fp > 0)
            a = p;
            fa = fp;
        else
            b = p;
        endif
    endwhile
    error('Num. max. de iter. excedido!');
endfunction
```

Exercícios

E 4.2.1. Considere a equação $\sqrt{x} = \cos(x)$. Use o método da bisseção com intervalo inicial $[a, b] = [0, 1]$ e $x^{(1)} = (a + b)/2$ para calcular a aproximação $x^{(4)}$ da solução desta equação.

E 4.2.2. Trace o gráfico e isole as três primeiras raízes positivas da função:

$$f(x) = 5 \sin(x^2) - \exp\left(\frac{x}{10}\right) \quad (4.18)$$

em intervalos de comprimento 0,1. Então, use o método da bisseção para obter aproximações dos zeros desta função com precisão de 10^{-5} .

E 4.2.3. O polinômio $p(x) = -4 + 8x - 5x^2 + x^3$ tem raízes $x_1 = 1$ e $x_2 = x_3 = 2$ no intervalo $[1/2, 3]$.

- Se o método da bisseção for usando com o intervalo inicial $[1/2, 3]$, para qual raiz as iterações convergem?
- É possível usar o método da bisseção para a raiz $x = 2$? Justifique sua resposta.

E 4.2.4. O polinômio $f(x) = x^4 - 4x^2 + 4$ possui raízes duplas em $\sqrt{2}$ e $-\sqrt{2}$. O método da bisseção pode ser aplicado a f ? Explique.

E 4.2.5. Mostre que a equação do Problema 4.1.7 possui uma solução no intervalo $[1, v + 1]$ para todo v positivo. Dica: defina $f(x) = \ln(x) + x - \frac{1}{x} - v$ e considere a seguinte estimativa:

$$f(v + 1) = f(1) + \int_1^{v+1} f'(x) dx \geq -v + \int_1^{v+1} dx = 0. \quad (4.19)$$

Use esta estimativa para iniciar o método de bisseção e obtenha o valor da raiz com pelo menos 6 algarismos significativos para $v = 1, 2, 3, 4$ e 5 .

E 4.2.6. (Estática) Considere o seguinte problema físico: uma plataforma está fixa a uma parede através de uma dobradiça cujo momento é dado por:

$$\tau = k\theta, \quad (4.20)$$

onde θ é ângulo da plataforma com a horizontal e k é uma constante positiva. A plataforma é feita de material homogêneo, seu peso é P e sua largura é l . Modele a relação entre o ângulo θ e o peso P próprio da plataforma. Encontre o valor de θ quando $l = 1$ m, $P = 200$ N, $k = 50$ Nm/rad, sabendo que o sistema está em equilíbrio. Use o método da bisseção e expresse o resultado com 4 algarismos significativos.

E 4.2.7. Considere a equação de Lambert dada por:

$$xe^x = t, \quad (4.21)$$

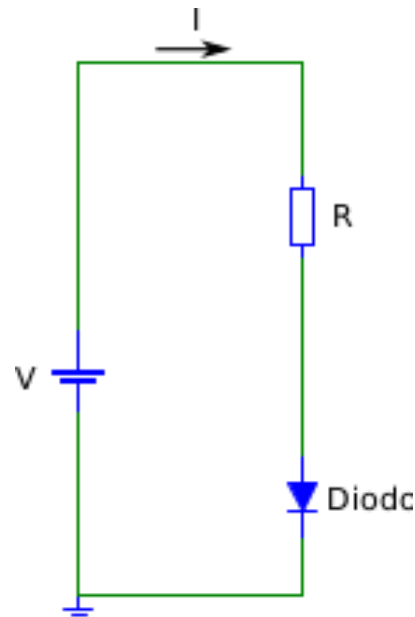
onde t é um número real positivo. Mostre que esta equação possui uma única solução x^* que pertence ao intervalo $[0, t]$. Usando esta estimativa como intervalo inicial, quantos passos são necessário para obter o valor numérico de x^* com erro absoluto inferior a 10^{-6} quando $t = 1$, $t = 10$ e $t = 100$ através do método da bisseção? Obtenha esses valores.

E 4.2.8. (Eletrônica) O desenho abaixo mostra um circuito não linear envolvendo uma fonte de tensão constante, um diodo retificador e um resistor. Sabendo que a relação entre a corrente (I_d) e a tensão (v_d) no diodo é dada pela seguinte expressão:

$$I_d = I_R \left(\exp \left(\frac{v_d}{v_t} \right) - 1 \right), \quad (4.22)$$

onde I_R é a corrente de condução reversa e v_t , a tensão térmica dada por $v_t = \frac{kT}{q}$ com k , a constante de Boltzmann, T a temperatura de operação e q , a carga do elétron. Aqui $I_R = 1 \text{ pA} = 10^{-12} \text{ A}$, $T = 300 \text{ K}$. Escreva o problema como uma equação na incógnita v_d e, usando o método da bisseção, resolva este problema com 3 algarismos significativos para os seguintes casos:

- a) $V = 30 \text{ V}$ e $R = 1 \text{ k}\Omega$.
- b) $V = 3 \text{ V}$ e $R = 1 \text{ k}\Omega$.
- c) $V = 3 \text{ V}$ e $R = 10 \text{ k}\Omega$.
- d) $V = 300 \text{ mV}$ e $R = 1 \text{ k}\Omega$.
- e) $V = -300 \text{ mV}$ e $R = 1 \text{ k}\Omega$.
- f) $V = -30 \text{ V}$ e $R = 1 \text{ k}\Omega$.
- g) $V = -30 \text{ V}$ e $R = 10 \text{ k}\Omega$.



Dica: $V = RI_d + v_d$.

E 4.2.9. (Propagação de erros) Obtenha os valores de I_d no Problema 4.2.8. Lembre que existem duas expressões disponíveis:

$$I_d = I_R \left(\exp \left(\frac{v_d}{v_t} \right) - 1 \right) \quad (4.23)$$

e

$$I_d = \frac{v - v_d}{R} \quad (4.24)$$

Faça o estudo da propagação do erro e decida qual a melhor expressão em cada caso.

4.3 Iteração de ponto fixo

Nesta seção, discutimos a abordagem da **iteração do ponto fixo** para a solução numérica de equações de uma variável real. Observamos que sempre podemos reescrever uma equação da forma $f(x) = 0$ (problema de encontrar os zeros de uma função) em uma equação equivalente na forma $g(x) = x$ (**problema de ponto fixo**). Um ponto $x = x^*$ tal que $g(x^*) = x^*$ é chamado de **ponto fixo** da função $g(x)$. Geometricamente, um ponto fixo de uma função é um ponto de interseção entre a reta $y = x$ com o gráfico da função $g(x)$ (veja Figura 4.3).

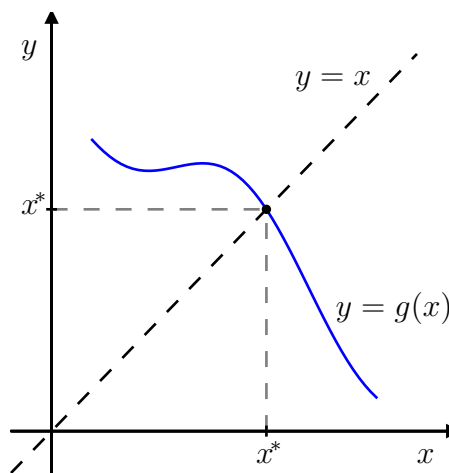


Figure 4.3: Ponto fixo $g(x^*) = x^*$.

Exemplo 4.3.1. Resolver a equação $e^x = x + 2$ é equivalente a resolver $f(x) = 0$, com $f(x) = e^x - x - 2$. Estes são equivalentes a resolver $g(x) = x$, com $g(x) = e^x - 2$, isto é:

$$e^x = x + 2 \Leftrightarrow e^x - x - 2 = 0 \Leftrightarrow e^x - 2 = x \quad (4.25)$$

Dada uma função $g(x)$, a **iteração do ponto fixo** consiste em computar a seguinte sequência recursiva:

$$x^{(n+1)} = g(x^{(n)}), \quad n \geq 1, \quad (4.26)$$

onde $x^{(1)}$ é uma aproximação inicial do ponto fixo.

Exemplo 4.3.2 (Método babilônico). O método babilônico⁴ é de uma iteração de ponto fixo para extrair a raiz quadrada de um número positivo A , isto é, resolver a equação $x^2 = A$.

Seja $r > 0$ uma aproximação para \sqrt{A} . Temos três possibilidades:

⁴Heron de Alexandria, 10 d.C. - 70 d.C., matemático grego.

- $r > \sqrt{A} \implies \frac{A}{r} < \sqrt{A} \implies \sqrt{A} \in \left(\frac{A}{r}, r\right)$;
- $r = \sqrt{A} \implies \frac{A}{r} = \sqrt{A}$;
- $r < \sqrt{A} \implies \frac{A}{r} > \sqrt{A} \implies \sqrt{A} \in \left(r, \frac{A}{r}\right)$.

Ou seja, \sqrt{A} sempre está no intervalo entre r e $\frac{A}{r}$, no qual podemos buscar uma nova aproximação como, por exemplo, pelo ponto médio:

$$x = \frac{r + \frac{A}{r}}{2}. \quad (4.27)$$

Aplicando esse método repetidas vezes, podemos construir a iteração (de ponto fixo):

$$x^{(1)} = r \quad (4.28)$$

$$x^{(n+1)} = \frac{x^{(n)}}{2} + \frac{A}{2x^{(n)}}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (4.29)$$

Por exemplo, para obter uma aproximação para $\sqrt{5}$, podemos iniciar com a aproximação inicial $r = 2$ e $A = 5$. Então, tomamos $x^{(1)} = 2$ e daí seguem as aproximações:

$$x^{(2)} = \frac{2}{2} + \frac{2,5}{2} = 2,25 \quad (4.30)$$

$$x^{(3)} = \frac{2,25}{2} + \frac{2,5}{2,25} = 2,2361111 \quad (4.31)$$

$$x^{(4)} = \frac{2,2361111}{2} + \frac{2,5}{2,2361111} = 2,236068 \quad (4.32)$$

$$x^{(5)} = \frac{2,236068}{2} + \frac{2,5}{2,236068} = 2,236068 \quad (4.33)$$

O método babilônico sugere que a iteração do ponto fixo pode ser uma abordagem eficiente para a solução de equações. Ficam, entretanto, as seguintes perguntas:

1. Será que a iteração do ponto fixo é convergente?
2. Caso seja convergente, será que o limite da sequência produzida, isto é, $x^* := \lim_{n \rightarrow \infty} x^{(n)}$ é um ponto fixo?
3. Caso seja convergente, qual é a taxa de convergência?

Table 4.2: Iterações do ponto fixo para o Exemplo 4.3.3.

n	$x_1^{(n)}$	$x_2^{(n)}$
1	1,700	1,700
2	2,047	1,735
3	-0,8812	1,743
4	4,3013	1,746
5	-149,4	1,746

A segunda pergunta é a mais fácil de ser respondida. No caso de $g(x)$ ser contínua, se $x^{(n)} \rightarrow x^* \in (g)$, então:

$$x^* = \lim_{n \rightarrow \infty} x^{(n)} = \lim_{n \rightarrow \infty} g(x^{(n-1)}) = g\left(\lim_{n \rightarrow \infty} x^{(n-1)}\right) = g(x^*). \quad (4.34)$$

Antes de respondermos as outras perguntas acima, vejamos mais um exemplo.

Exemplo 4.3.3. Considere o problema de encontrar o zero da função $f(x) = xe^x - 10$. Uma maneira geral de construir um problema de ponto fixo equivalente é o seguinte:

$$f(x) = 0 \Rightarrow \alpha f(x) = 0 \Rightarrow x - \alpha f(x) = x, \quad (4.35)$$

para qualquer parâmetro $\alpha \neq 0$. Consideremos, então, as seguintes duas funções:

$$g_1(x) = x - 0,5f(x) \quad \text{e} \quad g_2(x) = x - 0,05f(x). \quad (4.36)$$

Notamos que o ponto fixo destas duas funções coincide com o zero de $f(x)$. Construindo as iterações do ponto fixo:

$$x_1^{(n+1)} = g_1(x_1^{(n)}) \quad \text{e} \quad x_2^{(n+1)} = g_2(x_2^{(n)}), \quad (4.37)$$

tomando $x_1^{(1)} = x_2^{(1)} = 1,7$, obtemos os resultados apresentados na Tabela 4.2. Observamos que, enquanto, a iteração do ponto fixo com a função $g_1(x)$ ($\alpha = 0,5$) parece divergir, a iteração com a função $g_2(x)$ ($\alpha = 0,05$) parece convergir.

No GNU Octave, podemos computar as iterações do ponto fixo $x^{(n+1)} = g_1(x^{(n)})$ com o seguinte código:

```
>> f = @(x) x*exp(x)-10
f = f(x) = x*exp(x)-10
>> g1 = @(x) x - 0.5*f(x)
g1 = f(x) = x - 0.5*f(x)
```

```
>> x = 1.7;
>> x = g1(x)
x = 2.0471
>> x = g1(x)
x = -0.88119
```

e, assim, sucessivamente. Itere com a função $g_2(x)$ e verifique a convergência!

A fim de estudarmos a convergência da iteração do ponto fixo, apresentamos o teorema do ponto fixo.

4.3.1 Teorema do ponto fixo

O teorema do ponto fixo nos fornece condições suficientes para a existência e unicidade do ponto fixo, bem como para a convergência das iterações do método.

Definição 4.3.1. Uma **contração** é uma função real $g : [a, b] \rightarrow [a, b]$ tal que:

$$|g(x) - g(y)| \leq \beta |x - y|, \quad 0 \leq \beta < 1. \quad (4.38)$$

Observação 4.3.1. Seja $g : [a, b] \rightarrow [a, b]$, $y = g(x)$.

- Se $g(x)$ é uma contração, então $g(x)$ é uma função contínua.
- Se $|g'(x)| < k$, $0 < k < 1$, para todo $x \in [a, b]$, então $g(x)$ é uma contração.

Teorema 4.3.1 (Teorema do ponto fixo). Se $g : [a, b] \rightarrow [a, b]$ é uma contração, então existe um único ponto $x^* \in [a, b]$ tal que $g(x^*) = x^*$, isto é, x^* é ponto fixo de $g(x)$. Além disso, a sequência $\{x^{(n)}\}_{n \in \mathbb{N}}$ dada por:

$$x^{(n+1)} = g(x^{(n)}) \quad (4.39)$$

converge para x^* para qualquer $x^{(1)} \in [a, b]$.

Proof. Começamos demonstrando que existe pelo menos um ponto fixo. Para tal definimos a função $f(x) = x - g(x)$ e observamos que:

$$f(a) = a - g(a) \leq a - a = 0 \quad (4.40)$$

e

$$f(b) = b - g(b) \geq b - b = 0 \quad (4.41)$$

Se $f(a) = 0$ ou $f(b) = 0$, então o ponto fixo existe. Caso contrário, as desigualdades são estritas e a $f(x)$ muda de sinal no intervalo. Como esta função é contínua, pelo

teorema de Bolzano 4.1.1, existe um ponto x^* no intervalo (a, b) tal que $f(x^*) = 0$, ou seja, $g(x^*) = x^*$. Isto mostra a existência.

Para provar que o ponto fixo é único, observamos que se x^* e x^{**} são pontos fixos, eles devem ser iguais, pois:

$$|x^* - x^{**}| = |g(x^*) - g(x^{**})| \leq \beta |x^* - x^{**}|. \quad (4.42)$$

A desigualdade $|x^* - x^{**}| \leq \beta |x^* - x^{**}|$ com $0 \leq \beta < 1$ implica $|x^* - x^{**}| = 0$.

Para demonstrar a convergência da sequência, observamos que:

$$|x^{(n+1)} - x^*| = |g(x^{(n)}) - x^*| = |g(x^{(n)}) - g(x^*)| \leq \beta |x^{(n)} - x^*|. \quad (4.43)$$

Daí, temos:

$$|x^{(n)} - x^*| \leq \beta |x^{(n-1)} - x^*| \leq \beta^2 |x^{(n-2)} - x^*| \leq \dots \leq \beta^n |x^{(0)} - x^*|. \quad (4.44)$$

Portanto, como $0 \leq \beta < 1$, temos:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} |x^{(n)} - x^*| = 0, \quad (4.45)$$

ou seja, $x^{(n)} \rightarrow x^*$ quando $n \rightarrow \infty$. \square

Observação 4.3.2. Do teorema do ponto fixo, temos que se $g(x)$ é uma contração com constante $0 \leq \beta < 1$, então:

$$|x^{(n+1)} - x^*| \leq \beta |x^{(n)} - x^*|, \quad n \geq 1. \quad (4.46)$$

Isto é, as iterações do ponto fixo têm taxa de convergência linear.

Exemplo 4.3.4. Mostre que o teorema do ponto fixo se aplica a função $g(x) = \cos(x)$ no intervalo $[1/2, 1]$, isto é, a iteração de ponto fixo converge para a solução da equação $\cos x = x$. Então, calcule as iterações do ponto fixo com aproximação inicial $x^{(1)} = 0,7$, estime o erro absoluto da aproximação e verifique a taxa de convergência.

Solução. Basta mostrarmos que:

- a) $g([1/2, 1]) \subseteq [1/2, 1]$;
- b) $|g'(x)| < \beta$, $0 < \beta < 1$, $\forall x \in [1/2, 1]$.

Para provar a), observamos que $g(x)$ é decrescente no intervalo, pelo que temos:

$$0,54 < \cos(1) \leq \cos(x) \leq \cos(1/2) < 0,88 \quad (4.47)$$

Como $[0,54, 0,88] \subseteq [0,5, 1]$, temos o item a).

n	$x^{(n)}$	$\epsilon_n := x^{(n)} - x^* $
1	0,70000	3,9E-02
2	0,76484	2,6E-02
3	0,72149	1,8E-02
4	0,75082	1,2E-02
5	0,73113	8,0E-03
6	0,74442	5,3E-03
7	0,73548	3,6E-03

Table 4.3: Iteração do ponto fixo para o Exemplo 4.3.4.

Para provar o item b), observamos que:

$$g'(x) = -\sin(x). \quad (4.48)$$

Da mesma forma, temos a estimativa:

$$-0,85 < -\sin(1) \leq -\sin(x) \leq -\sin(1/2) < -0,47. \quad (4.49)$$

Assim, $|g'(x)| < 0,85$ e temos a desigualdade com $\beta = 0,85 < 1$.

A Tabela 4.3 apresenta o comportamento numérico da iteração do ponto fixo:

$$x^{(1)} = 0,7 \quad (4.50)$$

$$x^{(n+1)} = \cos(x^{(n)}), \quad n \geq 1. \quad (4.51)$$

Para estimar o erro, consideramos $x^* = 0,7390851605$. A Figura 4.4 mostrar o decaimento do erro $\epsilon_n = |x^{(n)} - x^*|$ comparado com a taxa de convergência linear com $\beta = 0,85$.

No GNU Octave, podemos computar estas iterações e o erro absoluto com o seguinte código:

```
#est. da solucao
f = @(x) cos(x)-x;
xe = fsolve(f, 0.7);

#funcao do pto. fixo
g = @(x) cos(x);

#aprox. inicial
```

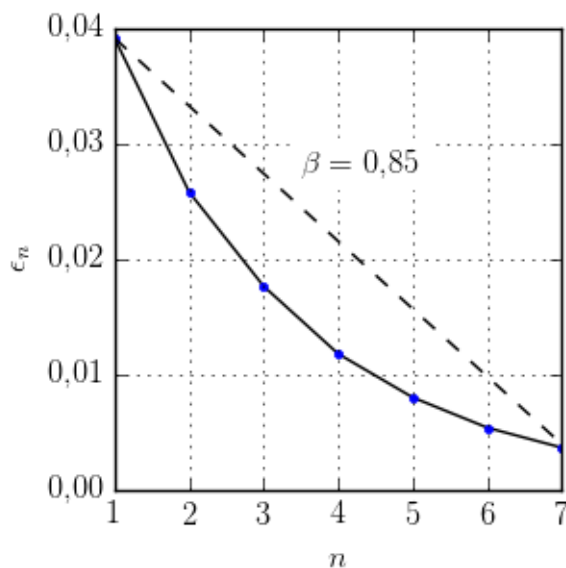


Figure 4.4: Decaimento do erro $\epsilon_n = |x^{(n)} - x^*|$ da iteração do ponto fixo estudada no Exemplo 4.3.4.

```
x0 = 0.7;
eps = abs(x0-xe);
printf("%1.5f %1.1e\n", x0, eps);

for i=2:7
    x = g(x0);
    eps = abs(x-xe);
    printf("%1.5f %1.1e\n", x, eps)
    x0 = x;
endfor
```

◇

4.3.2 Teste de convergência

Seja $g : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ uma função $C^0[a, b]$ e $x^* \in (a, b)$ um ponto fixo de g . Então x^* é dito estável se existe uma região $(x^* - \delta, x^* + \delta)$ chamada bacia de atração tal que $x^{(n+1)} = g(x^{(n)})$ é convergente sempre que $x^{(0)} \in (x^* - \delta, x^* + \delta)$.

Proposição 4.3.1 (Teste de convergência). *Se $g \in C^1[a, b]$ e $|g'(x^*)| < 1$, então x^* é estável. Se $|g'(x^*)| > 1$ é instável e o teste é inconclusivo quando $|g'(x^*)| = 1$.*

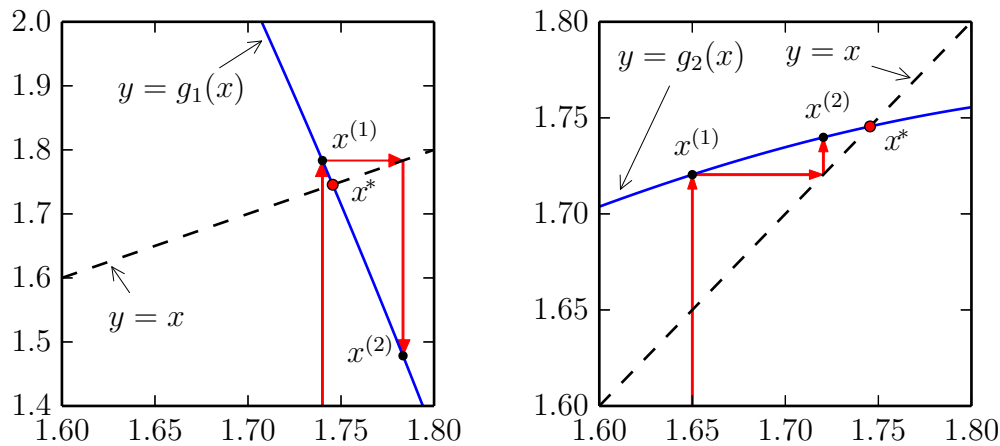


Figure 4.5: Ilustração das iterações do ponto fixo para: (esquerda) $y = g_1(x)$ e (direita) $y = g_2(x)$. Veja Exemplo 4.3.5.

Exemplo 4.3.5. No Exemplo 4.3.3, observamos que a função $g_1(x)$ nos forneceu uma iteração divergente, enquanto que a função $g_2(x)$ forneceu uma iteração convergente (veja a Figura 4.5). Estes comportamentos são explicados pelo teste da convergência. Com efeito, sabemos que o ponto fixo destas funções está no intervalo $[1,6, 1,8]$ e temos:

$$|g_1'(x)| = |1 - 0,5(x + 1)e^x| > 4,8, \quad \forall x \in [1,6, 1,8], \quad (4.52)$$

enquanto:

$$|g_2'(x)| = |1 - 0,05(x + 1)e^x| < 0,962, \quad \forall x \in [1,6, 1,8]. \quad (4.53)$$

4.3.3 Estabilidade e convergência

A fim de compreendermos melhor os conceitos de estabilidade e convergência, considere uma função $\Phi(x)$ com um ponto fixo $x^* = g(x^*)$ e analisemos o seguinte processo iterativo:

$$x^{(n+1)} = g(x^{(n)}) \quad (4.54)$$

$$x^{(0)} = x \quad (4.55)$$

Vamos supor que a função $g(x)$ pode ser aproximada por seu polinômio de Taylor em torno do ponto fixo:

$$g(x) = g(x^*) + (x - x^*)g'(x^*) + O((x - x^*)^2) \quad (4.56)$$

$$= x^* + (x - x^*)g'(x^*) + O((x - x^*)^2) \quad (4.57)$$

$$\approx x^* + (x - x^*)g'(x^*) \quad (4.58)$$

Substituindo na relação de recorrência, temos

$$x^{(n+1)} = g(x^{(n)}) \approx x^* + (x^{(n)} - x^*)g'(x^*) \quad (4.59)$$

Ou seja:

$$(x^{(n+1)} - x^*) \approx (x^{(n)} - x^*)g'(x^*) \quad (4.60)$$

Tomando módulos, temos:

$$\underbrace{|x^{(n+1)} - x^*|}_{\epsilon_{n+1}} \approx \underbrace{|x^{(n)} - x^*|}_{\epsilon_n} |g'(x^*)|, \quad (4.61)$$

onde $\epsilon_n = |x^{(n)} - x^*|$.

Observação 4.3.3. Da análise acima, concluímos:

- Se $|g'(x^*)| < 1$, então, a distância de $x^{(n)}$ até o ponto fixo x^* está diminuindo a cada passo.
- Se $|g'(x^*)| > 1$, então, a distância de $x^{(n)}$ até o ponto fixo x^* está aumentando a cada passo.
- Se $|g'(x^*)| = 1$, então, nossa aproximação de primeira ordem não é suficiente para compreender o comportamento da sequência.

4.3.4 Erro absoluto e tolerância

Na prática, quando se aplica uma iteração como esta, não se conhece de antemão o valor do ponto fixo x^* . Assim, o erro $\epsilon_n = |x^{(n)} - x^*|$ precisa ser estimado com base nos valores calculados $x^{(n)}$. Uma abordagem frequente é analisar a evolução da diferença entre dois elementos da sequência:

$$\Delta_n = |x^{(n+1)} - x^{(n)}| \quad (4.62)$$

A pergunta natural é: Será que o erro $\epsilon_n = |x^{(n)} - x^*|$ será pequeno quando $\Delta_n = |x^{(n+1)} - x^{(n)}|$ for pequeno?

Para responder a esta pergunta, observamos que

$$x^* = \lim_{n \rightarrow \infty} x^{(n)} \quad (4.63)$$

portanto:

$$x^* - x^{(N)} = (x^{(N+1)} - x^{(N)}) + (x^{(N+2)} - x^{(N+1)}) + (x^{(N+3)} - x^{(N+2)}) + \dots \quad (4.64)$$

$$= \sum_{k=0}^{\infty} (x^{(N+k+1)} - x^{(N+k)}) \quad (4.65)$$

Usamos também as expressões:

$$x^{(n+1)} \approx x^* + (x^{(n)} - x^*)g'(x^*) \quad (4.66)$$

$$x^{(n)} \approx x^* + (x^{(n-1)} - x^*)g'(x^*) \quad (4.67)$$

Subtraindo uma da outra, temos:

$$x^{(n+1)} - x^{(n)} \approx (x^{(n)} - x^{(n-1)})g'(x^*) \quad (4.68)$$

Portanto:

$$x^{(N+k+1)} - x^{(N+k)} \approx (x^{(N+1)} - x^{(N)}) (g'(x^*))^k \quad (4.69)$$

E temos:

$$x^* - x^{(N)} = \sum_{k=0}^{\infty} (x^{(N+k+1)} - x^{(N+k)}) \quad (4.70)$$

$$\approx \sum_{k=0}^{\infty} (x^{(N+1)} - x^{(N)}) (g'(x^*))^k \quad (4.71)$$

$$= (x^{(N+1)} - x^{(N)}) \frac{1}{1 - g'(x^*)}, \quad |g'(x^*)| < 1 \quad (4.72)$$

Tomando módulo, temos:

$$|x^* - x^{(N)}| \approx |x^{(N+1)} - x^{(N)}| \frac{1}{1 - g'(x^*)} \quad (4.73)$$

$$\epsilon_N \approx \frac{\Delta_N}{1 - g'(x^*)} \quad (4.74)$$

Observação 4.3.4. Tendo em mente a relação $x^{(n+1)} - x^{(n)} \approx (x^{(n)} - x^{(n-1)})g'(x^*)$, concluímos:

- Quando $g'(x^*) < 0$, o esquema é alternante, isto é, o sinal do erro se altera a cada passo. O erro ϵ_N pode ser estimado diretamente da diferença Δ_N , pois o denominador $1 - g'(x^*) > 1$.

- Quando $0 < g'(x^*) < 1$, o esquema é monótono e $\frac{1}{1-g'(x^*)} > 1$, pelo que o erro ϵ_N é maior que a diferença Δ_N . A relação será tão mais importante quando mais próximo da unidade for $g'(x^*)$, ou seja, quando mais lenta for a convergência. Para estimar o erro em função da diferença Δ_N , observamos que $g'(x^*) \approx \frac{x^{(n+1)} - x^{(n)}}{x^{(n)} - x^{(n-1)}}$ e

$$|g'(x^*)| \approx \frac{\Delta_n}{\Delta_{n-1}} \quad (4.75)$$

e portanto

$$\epsilon_N \approx \frac{\Delta_N}{1 - \frac{\Delta_n}{\Delta_{n-1}}}. \quad (4.76)$$

Exercícios

E 4.3.1. Resolver a equação $e^x = x + 2$ é equivalente a calcular os pontos fixos da função $g(x) = e^x - 2$ (veja o Exemplo 4.3.1). Use a iteração do ponto fixo $x^{(n+1)} = g(x^n)$ com $x^{(1)} = -1,8$ para obter uma aproximação de uma das soluções da equação dada com 8 dígitos significativos.

E 4.3.2. Mostre que a equação:

$$\cos(x) = x \quad (4.77)$$

possui uma única solução no intervalo $[0, 1]$. Use a iteração do ponto fixo e encontre uma aproximação para esta solução com 4 dígitos significativos.

E 4.3.3. Mostre que a equação $xe^x = 10$ é equivalente às seguintes equações:

$$x = \ln\left(\frac{10}{x}\right) \quad \text{e} \quad x = 10e^{-x}. \quad (4.78)$$

Destas, considere as seguintes iterações de ponto fixo:

a) $x^{(n+1)} = \ln\left(\frac{10}{x^{(n)}}\right)$

b) $x^{(n+1)} = 10e^{-x^{(n)}}$

Tomando $x^{(1)} = 1$, verifique se estas sequências são convergentes.

E 4.3.4. Verifique (analiticamente) que a única solução real da equação:

$$xe^x = 10 \quad (4.92)$$

é ponto fixo das seguintes funções:

Prof. M.e Daniel Cassimiro

a) $g(x) = \ln\left(\frac{10}{x}\right)$

b) $g(x) = x - \frac{xe^x - 10}{15}$

c) $g(x) = x - \frac{xe^x - 10}{10 + e^x}$

Implemente o processo iterativo $x^{(n+1)} = g(x^{(n)})$ para $n \geq 0$ e compare o comportamento. Discuta os resultados com base na teoria estudada.

E 4.3.5. Verifique (analiticamente) que a única solução real da equação:

$$\cos(x) = x \quad (4.93)$$

é ponto fixo das seguintes funções:

a) $g(x) = \cos(x)$

b) $g(x) = 0,4x + 0,6 \cos(x)$

c) $g(x) = x + \frac{\cos(x) - x}{1 + \sin(x)}$

Implemente o processo iterativo $x^{(n+1)} = g(x^{(n)})$ para $n \geq 0$ e compare o comportamento. Discuta os resultados com base na teoria estudada.

E 4.3.6. Encontre a solução de cada equação com erro absoluto inferior a 10^{-6} .

a) $e^x = x + 2$ no intervalo $(-2, 0)$.

b) $x^3 + 5x^2 - 12 = 0$ no intervalo $(1, 2)$.

c) $\sqrt{x} = \cos(x)$ no intervalo $(0, 1)$.

E 4.3.7. Encontre numericamente as três primeiras raízes positivas da equação dada por:

$$\cos(x) = \frac{x}{10 + x^2} \quad (4.94)$$

com erro absoluto inferior a 10^{-6} .

E 4.3.8. Considere os seguintes processos iterativos:

$$\begin{aligned} a \left\{ \begin{array}{l} x^{(n+1)} = \cos(x^{(n)}) \\ x^{(1)} = .5 \end{array} \right. \\ \text{e} \\ b \left\{ \begin{array}{l} x^{(n+1)} = .4x^{(n)} + .6 \cos(x^{(n)}) \\ x^{(1)} = .5 \end{array} \right. \end{aligned} \quad (4.95)$$

Use o teorema do ponto fixo para verificar que cada um desses processos converge para a solução da equação x^* de $\cos(x) = x$. Observe o comportamento numérico dessas sequências. Qual estabiliza mais rápido com cinco casas decimais? Discuta.

Dica: Verifique que $\cos([0.5, 1]) \subseteq [0.5, 1]$ e depois a mesma identidade para a função $f(x) = 0.4x + 0.6 \cos(x)$.

E 4.3.9. Use o teorema do ponto fixo aplicado a um intervalo adequado para mostrar que a função $g(x) = \ln(100 - x)$ possui um ponto fixo estável.

E 4.3.10. (Fluidos) Na hidráulica, o fator de atrito de Darcy é dado pela implicitamente pela equação de Colebrook-White:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left(\frac{\varepsilon}{14.8 R_h} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (4.96)$$

onde f é o fator de atrito, ε é a rugosidade do tubo em metros, R_h é o raio hidráulico em metros e Re é o número de Reynolds. Considere $\varepsilon = 2mm$, $R_h = 5cm$ e $Re = 10000$ e obtenha o valor de f pela iteração:

$$x^{(n+1)} = -2 \log_{10} \left(\frac{\varepsilon}{14.8 R_h} + \frac{2.51 x^{(n)}}{Re} \right) \quad (4.97)$$

E 4.3.11. Encontre uma solução aproximada para a equação algébrica

$$180 - 100x = 0.052 \sinh^{-1}(10^{13}x) \quad (4.98)$$

com erro absoluto inferior a 10^{-3} usando um método iterativo. Estime o erro associado ao valor de $v = 180 - 100x = 0.052 \sinh^{-1}(10^{13}x)$, usando cada uma dessas expressões. Discuta sucintamente o resultado obtido. Dica: Este caso é semelhante ao Problema 4.2.8.

E 4.3.12. Considere que x_n satisfaz a seguinte relação de recorrência:

$$x_{n+1} = x_n - \beta (x_n - x^*) \quad (4.99)$$

onde β e x^* são constantes. Prove que

$$x_n - x^* = (1 - \beta)^{n-1} (x_1 - x^*). \quad (4.100)$$

Conclua que $x_n \rightarrow x^*$ quando $|1 - \beta| < 1$.

E 4.3.13. (Convergência lenta) Considere o seguinte esquema iterativo:

$$x^{(n+1)} = x_n + q^n, \quad (4.101)$$

$$x^{(0)} = 0, \quad (4.102)$$

onde $q = 1 - 10^{-6}$.

a) Calcule o limite

$$x_\infty = \lim_{n \rightarrow \infty} x^{(n)} \quad (4.103)$$

analiticamente.

- b) Considere que o problema de obter o limite da sequência numericamente usando como critério de parada que $|x^{(n+1)} - x^{(n)}| < 10^{-5}$. Qual o valor é produzido pelo esquema numérico? Qual o desvio entre o valor obtido pelo esquema numérico e o valor do limite obtido no item a? Discuta. (Dica: Você não deve implementar o esquema iterativo, obtendo o valor de $x^{(n)}$ analiticamente)
- c) Qual deve ser a tolerância especificada para obter o resultado com erro relativo inferior a 10^{-2} ?

E 4.3.14. (Convergência sublinear) Considere o seguinte esquema iterativo:

$$x^{(n+1)} = x^{(n)} - [x^{(n)}]^3, \quad x^{(n)} \geq 0 \quad (4.104)$$

com $x^{(0)} = 10^{-2}$. Prove que $\{x^{(n)}\}$ é sequência de número reais positivos convergindo para zero. Verifique que são necessários mais de mil passos para que $x^{(n)}$ se torne menor que $0.9x^{(0)}$.

E 4.3.15. (Taxa de convergência)

- a) Use o teorema do ponto fixo para mostrar que a função $g(x) = 1 - \sin(x)$ possui um único ponto fixo estável o intervalo $[\frac{1}{10}, 1]$. Construa um método iterativo $x^{(n+1)} = g(x^{(n)})$ para encontrar esse ponto fixo. Use o computador para encontrar o valor numérico do ponto fixo.
- b) Verifique que função $\psi(x) = \frac{1}{2}[x + 1 - \sin(x)]$ possui um ponto fixo x^* que também é o ponto fixo da função g do item a. Use o computador para encontrar o valor numérico do ponto fixo através da iteração $x^{(n+1)} = \psi(x^{(n)})$. Qual método é mais rápido?

E 4.3.16. (Esquemas oscilantes)(*Esquemas oscilantes*)

a) Considere a função $g(x)$ e a função composta $\psi(x) = g \circ g = g(g(x))$. Verifique todo ponto fixo de g também é ponto fixo de ψ .

b) Considere a função

$$g(x) = 10 \exp(-x) \quad (4.105)$$

e a função composta $\psi(x) = g \circ g = g(g(x))$. Mostre que ψ possui dois pontos fixos que não são pontos fixos de g .

c) No problema anterior, o que acontece quando o processo iterativo $x^{(n+1)} = g(x^{(n)})$ é inicializado com um ponto fixo de ψ que não é ponto fixo de g ?

E 4.3.17. (Aceleração de convergência - introdução ao método de Newton) Mostre que se $f(x)$ possui uma raiz x^* então a x^* é um ponto fixo de $\phi(x) = x + \gamma(x)f(x)$. Encontre uma condição em $\gamma(x)$ para que o ponto fixo x^* de ϕ seja estável. Encontre uma condição em $\gamma(x)$ para que $\phi'(x^*) = 0$.

E 4.3.18. (Aceleração de convergência - introdução ao método de Newton) Considere que $x^{(n)}$ satisfaz a seguinte relação de recorrência:

$$x^{(n+1)} = x^{(n)} - \gamma f(x^{(n)}) \quad (4.106)$$

onde γ é uma constante. Suponha que $f(x)$ possui um zero em x^* . Aproxime a função $f(x)$ em torno de x^* por

$$f(x) = f(x^*) + f'(x^*)(x - x^*) + O((x - x^*)^2). \quad (4.107)$$

Em vista do problema anterior, qual valor de γ você escolheria para que a sequência $x^{(n)}$ convirja rapidamente para x^* .

E 4.3.19. Considere o problema da Questão 4.2.8 e dois seguintes esquemas iterativos.

$$\begin{aligned} A \left\{ \begin{array}{l} I^{(n+1)} = \frac{1}{R} \left[V - v_t \ln \left(1 + \frac{I^{(n)}}{I_R} \right) \right], n > 0 \\ I^{(0)} = 0 \end{array} \right. \\ \text{e} \\ B \left\{ \begin{array}{l} I^{(n+1)} = I_R \left[\exp \left(\frac{V - RI^{(n)}}{v_t} \right) - 1 \right], n > 0 \\ I^{(0)} = 0 \end{array} \right. \end{aligned} \quad (4.108)$$

Verifique numericamente que apenas o processo A é convergente para a, b e c; enquanto apenas o processo B é convergente para os outros itens.

4.4 Método de Newton-Raphson

Nesta seção, apresentamos o **método de Newton-Raphson**⁵⁶ para calcular o zero de funções reais de uma variável real.

Consideramos que x^* seja um zero de uma dada função $y = f(x)$ continuamente diferenciável, isto é, $f(x^*) = 0$. A fim de usar a iteração do ponto fixo, observamos que, equivalentemente, x^* é um ponto fixo da função:

$$g(x) = x + \alpha(x)f(x), \quad \alpha(x) \neq 0, \quad (4.109)$$

onde $\alpha(x)$ é uma função arbitrária, a qual escolheremos de forma que a iteração do ponto fixo tenha ótima taxa de convergência.

Do **teorema do ponto fixo**, a taxa de convergência é dada em função do valor absoluto da derivada de $g(x)$. Calculando a derivada temos:

$$g'(x) = 1 + \alpha(x)f'(x) + \alpha'(x)f(x). \quad (4.110)$$

No ponto $x = x^*$, temos:

$$g'(x^*) = 1 + \alpha(x^*)f'(x^*) + \alpha'(x^*)f(x^*). \quad (4.111)$$

Como $f(x^*) = 0$, temos:

$$g'(x^*) = 1 + \alpha(x^*)f'(x^*). \quad (4.112)$$

Sabemos que o processo iterativo converge tão mais rápido quanto menor for $|g'(x)|$ nas vizinhanças de x^* . Isto nos leva a escolher:

$$g'(x^*) = 0, \quad (4.113)$$

e, então, temos:

$$\alpha(x^*) = -\frac{1}{f'(x^*)}, \quad (4.114)$$

se $f'(x^*) \neq 0$.

A discussão acima nos motiva a introduzir o método de Newton, cujas iterações são dada por:

$$x^{(n+1)} = x^{(n)} - \frac{f(x^{(n)})}{f'(x^{(n)})}, \quad n \geq 1, \quad (4.115)$$

sendo $x^{(1)}$ uma aproximação inicial dada.

⁵Joseph Raphson, 1648 - 1715, matemático inglês.

⁶Também chamado apenas de método de Newton.

4.4.1 Interpretação geométrica

Seja uma dada função $f(x)$ conforme na Figura 4.6. Para tanto, escolhamos uma aproximação inicial $x^{(1)}$ e computamos:

$$x^{(2)} = x^{(1)} - \frac{f(x^{(1)})}{f'(x^{(1)})}. \quad (4.116)$$

Geometricamente, o ponto $x^{(2)}$ é a interseção da reta tangente ao gráfico da função $f(x)$ no ponto $x = x^{(1)}$ com o eixo das abscissas. Com efeito, a equação desta reta é:

$$y = f'(x^{(1)})(x - x^{(1)}) + f(x^{(1)}). \quad (4.117)$$

Assim, a interseção desta reta com o eixo das abscissas ($y = 0$) ocorre quando:

$$f'(x^{(1)})(x - x^{(1)}) + f(x^{(1)}) = 0 \Rightarrow x = x^{(1)} - \frac{f(x^{(1)})}{f'(x^{(1)})}. \quad (4.118)$$

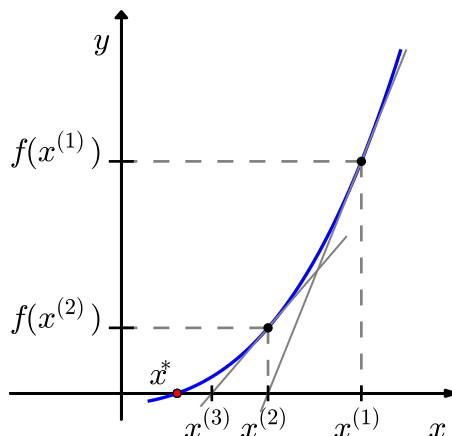


Figure 4.6: Interpretação do método de Newton.

Ou seja, dada aproximação $x^{(n)}$, a próxima aproximação $x^{(n+1)}$ é o ponto de interseção entre o eixo das abscissas e a reta tangente ao gráfico da função no ponto $x = x^{(n)}$. Observe a Figura 4.6.

4.4.2 Análise de convergência

Seja $y = f(x)$ uma função com derivadas primeira e segunda contínuas tal que $f(x^*) = 0$ e $f'(x^*) \neq 0$. Seja também a função $g(x)$ definida como:

$$g(x) = x - \frac{f(x)}{f'(x)}. \quad (4.119)$$

Expandindo em série de Taylor em torno de $x = x^*$, obtemos:

$$g(x) = g(x^*) + g'(x^*)(x - x^*) + \frac{g''(x^*)}{2}(x - x^*)^2 + O((x - x^*)^3). \quad (4.120)$$

Observamos que:

$$g(x^*) = x^* \quad (4.121)$$

$$g'(x^*) = 1 - \frac{f'(x^*)f'(x^*) - f(x^*)f''(x^*)}{(f'(x^*))^2} = 0 \quad (4.122)$$

Portanto:

$$g(x) = x^* + \frac{g''(x^*)}{2}(x - x^*)^2 + O((x - x^*)^3) \quad (4.123)$$

Com isso, temos:

$$x^{(n+1)} = g(x^{(n)}) = x^* + \frac{g''(x^*)}{2}(x^{(n)} - x^*)^2 + O((x^{(n)} - x^*)^3), \quad (4.124)$$

ou seja, para n suficientemente grande,

$$|x^{(n+1)} - x^*| \leq C |x^{(n)} - x^*|^2, \quad (4.125)$$

com constante $C = |g''(x^*)/2|$. Isto mostra que o método de Newton tem **taxa de convergência quadrática**. Mais precisamente, temos o seguinte teorema.

Teorema 4.4.1 (Método de Newton). *Sejam $f \in C^2([a, b])$ com $x^* \in (a, b)$ tal que $f(x^*) = 0$ e:*

$$m := \min_{x \in [a, b]} |f'(x)| > 0 \quad e \quad M := \max_{x \in [a, b]} |f''(x)|. \quad (4.126)$$

Escolhendo $\rho > 0$ tal que:

$$q := \frac{M}{2m}\rho < 1, \quad (4.127)$$

*definimos a **bacia de atração** do método de Newton pelo conjunto:*

$$K_\rho(x^*) := \{x \in \mathbb{R}; |x - x^*| \leq \rho\} \subset [a, b]. \quad (4.128)$$

Então, para qualquer $x^{(1)} \in K_\rho(x^)$ a iteração do método de Newton:*

$$x^{(n+1)} = x^{(n)} - \frac{f(x^{(n)})}{f'(x^{(n)})}, \quad (4.129)$$

fornece uma sequência $x^{(n)}$ que converge para x^* , isto é, $x^{(n)} \rightarrow x^*$ quando $n \rightarrow \infty$. Além disso, temos a seguinte estimativa de erro **a priori**:

$$|x^{(n)} - x^*| \leq \frac{2m}{M} q^{(2^{n-1})}, \quad n \geq 2, \quad (4.130)$$

e a seguinte estimativa de erro **a posteriori**:

$$|x^{(n)} - x^*| \leq \frac{M}{2m} |x^{(n)} - x^{(n-1)}|^2, \quad n \geq 2. \quad (4.131)$$

Proof. Para $n \in \mathbb{N}$, $n \geq 2$, temos:

$$x^{n+1} - x^* = x^{(n)} - \frac{f(x^{(n)})}{f'(x^{(n)})} - x^* = -\frac{1}{f'(x^{(n)})} \left[f(x^{(n)}) + (x^* - x^{(n)})f'(x^{(n)}) \right]. \quad (4.132)$$

Agora, para estimar o lado direito desta equação, usamos o polinômio de Taylor de grau 1 da função $f(x)$ em torno de $x = x^{(n)}$, isto é:

$$f(x^*) = f(x^{(n)}) + (x^* - x^{(n)})f'(x^{(n)}) + \int_{x^{(n)}}^{x^*} f''(t)(x^* - t) dt. \quad (4.133)$$

Pela mudança de variável $t = x^{(n)} + s(x^* - x^{(n)})$, observamos que o resto deste polinômio de Taylor na forma integral é igual a:

$$R(x^*, x^{(n)}) := (x^* - x^{(n)})^2 \int_0^1 f''(x^{(n)} + s(x^* - x^{(n)})) (1 - s) ds. \quad (4.134)$$

Assim, da cota da segunda derivada de $f(x)$, temos:

$$|R(x^*, x^{(n)})| \leq M |x^* - x^{(n)}|^2 \int_0^1 (1 - s) ds = \frac{M}{2} |x^* - x^{(n)}|^2. \quad (4.135)$$

Se $x^{(n)} \in K_\rho(x^*)$, então de (4.132) e (4.135) temos:

$$|x^{(n+1)} - x^*| \leq \frac{M}{2m} |x^{(n)} - x^*|^2 \leq \frac{M}{2m} \rho^2 < \rho. \quad (4.136)$$

Isto mostra que se $x^{(n)} \in K_\rho(x^*)$, então $x^{(n+1)} \in K_\rho(x^*)$, isto é, $x^{(n)} \in K_\rho(x^*)$ para todo $n \in \mathbb{N}$.

Agora, obtemos a estimativa **a priori** de (4.4.2), pois:

$$|x^{(n)} - x^*| \leq \frac{2m}{M} \left(\frac{M}{2m} |x^{(n-1)} - x^*| \right)^2 \leq \dots \leq \frac{2m}{M} \left(\frac{M}{2m} |x^{(1)} - x^*| \right)^{2^{n-1}}. \quad (4.137)$$

Logo:

$$|x^{(n)} - x^*| \leq \frac{2m}{M} q^{2^{n-1}}, \quad (4.138)$$

donde também vemos que $x^{(n)} \rightarrow x^*$ quando $n \rightarrow \infty$, pois $q < 1$.

Por fim, para provarmos a estimativa **a posteriori** tomamos a seguinte expansão em polinômio de Taylor:

$$f(x^{(n)}) = f(x^{(n-1)}) + (x^{(n)} - x^{(n-1)})f'(x^{(n-1)}) + R(x^{(n)}, x^{(n-1)}). \quad (4.139)$$

Aqui, temos:

$$f(x^{(n-1)}) + (x^{(n)} - x^{(n-1)})f'(x^{(n-1)}) = 0 \quad (4.140)$$

e, então, conforme acima:

$$|f(x^{(n)})| = |R(x^{(n)}, x^{(n-1)})| \leq \frac{M}{2} |x^{(n)} - x^{(n-1)}|^2. \quad (4.141)$$

Com isso e do teorema do valor médio, concluímos:

$$|x^{(n)} - x^*| \leq \frac{1}{m} |f(x^{(n)}) - f(x^*)| \leq \frac{M}{2m} |x^{(n)} - x^{(n-1)}|^2. \quad (4.142)$$

□

Exemplo 4.4.1. Estime o raio ρ da bacia de atração $K_\rho(x^*)$ para a função $f(x) = \cos(x) - x$ restrita ao intervalo $[0, \pi/2]$.

Solução. O raio da bacia de atração é tal que:

$$\rho < \frac{2m}{M} \quad (4.143)$$

onde $m := \min |f'(x)|$ e $M := \max |f''(x)|$ com o mínimo e o máximo tomados em um intervalo $[a, b]$ que contenha o zero da função $f(x)$. Aqui, por exemplo, podemos tomar $[a, b] = [0, \pi/2]$. Como, neste caso, $f'(x) = -\sin(x) - 1$, temos que $m = 1$. Também, como $f''(x) = -\cos(x)$, temos $M = 1$. Assim, concluímos que $\rho < 2$ (lembrando que $K_\rho(x^*) \subset [0, \pi/2]$). Ou seja, neste caso as iterações de Newton convergem para o zero de $f(x)$ para qualquer escolha da aproximação inicial $x^{(1)} \in [0, \pi/2]$. ◇

Exercícios

E 4.4.1. Encontre a raiz positiva da função $f(x) = \cos(x) - x^2$ pelo método de Newton inicializando-o com $x^{(0)} = 1$. Realize a iteração até obter estabilidade no *quinto* dígito significativo.

E 4.4.2. Considere o problema de calcular as soluções positivas da equação:

$$\operatorname{tg}(x) = 2x^2. \quad (4.144)$$

- a) Use o método gráfico para isolar as duas primeiras raízes positivas em pequenos intervalos. Use a teoria para argumentar quanto à existência e unicidade das raízes dentro intervalos escolhidos.
- b) Calcule cada uma das raízes pelo método de Newton com oito dígitos significativos e discuta a convergência.

E 4.4.3. Considere a equação

$$e^{-x^2} = x \quad (4.145)$$

trace o gráfico com auxílio do computador e verifique que ela possui uma raiz positiva. Encontre uma aproximação para esta raiz pelo gráfico e use este valor para inicializar o método de Newton e obtenha uma aproximação para a raiz com 8 dígitos significativos. (Use o comando `format('v',16)` para alterar a visualização no Scilab.)

E 4.4.4. Isole e encontre as cinco primeiras raízes positivas da equação com 6 dígitos corretos através de traçado de gráfico e do método de Newton.

$$\cos(10x) = e^{-x}. \quad (4.146)$$

Dica: a primeira raiz positiva está no intervalo $(0, 0,02)$. Fique atento.

E 4.4.5. Encontre as raízes do polinômio $f(x) = x^4 - 4x^2 + 4$ através do método de Newton. O que você observa em relação ao erro obtido? Compare com a situação do Problema 4.2.4.

E 4.4.6. Encontre as raízes reais do polinômio $f(x) = \frac{x^5}{100} + x^4 + 3x + 1$ isolando-as pelo método do gráfico e depois usando o método de Newton. Expresse a solução com 7 dígitos significativos.

E 4.4.7. Considere o método de Newton aplicado para encontrar a raiz de $f(x) = x^3 - 2x + 2$. O que acontece quando $x^{(0)} = 0$? Escolha um valor adequado para inicializar o método e obter a única raiz real desta equação.

E 4.4.8. Justifique a construção do processo iterativo do método de Newton através do conceito de estabilidade de ponto fixo e convergência do método da iteração. Dica: Considere os problemas 4.3.17 e 4.3.18.

E 4.4.9. Entenda a interpretação geométrica ao método de Newton. Encontre um valor para iniciar o método de Newton aplicado ao problema $f(x) = xe^{-x} = 0$ tal que o esquema iterativo divirja.

E 4.4.10. (Computação) Aplique o método de Newton à função $f(x) = \frac{1}{x} - A$ e construa um esquema computacional para calcular a inversa de A com base em operações de multiplicação e soma/subtração.

E 4.4.11. (Computação) Aplique o método de Newton à função $f(x) = x^n - A$ e construa um esquema computacional para calcular $\sqrt[n]{A}$ para $A > 0$ com base em operações de multiplicação e soma/subtração.

E 4.4.12. (Computação) Aplique o método de Newton à função $f(x) = \frac{1}{x^2} - A$ e construa um esquema computacional para calcular $\frac{1}{\sqrt{A}}$ para $A > 0$ com base em operações de multiplicação e soma/subtração.

E 4.4.13. Considere a função dada por

$$\psi(x) = \ln(15 - \ln(x)) \quad (4.155)$$

definida para $x \in (0, e^{15})$

- a) Use o teorema do ponto fixo para provar que se $x^{(0)}$ pertence ao intervalo $[1, 3]$, então a sequência dada iterativamente por

$$x^{(n+1)} = \psi(x^{(n)}), n \geq 0 \quad (4.156)$$

converge para o único ponto fixo, x^* , de ψ . Construa a iteração $x^{(n+1)} = \psi(x^{(n)})$ e obtenha numericamente o valor do ponto fixo x^* . Expresse a resposta com 5 algarismos significativos corretos.

- b) Construa a iteração do método de Newton para encontrar x^* , explicitando a relação de recorrência e iniciando com $x_0 = 2$. Use o computador para obter a raiz e expresse a resposta com oito dígitos significativos corretos.

4.5 Método das secantes

O **método das secantes** é uma variação do método de Newton, evitando a necessidade de conhecer-se a derivada analítica de $f(x)$. Dada uma função $f(x)$, a ideia é aproximar sua derivada pela razão fundamental:

$$f'(x) \approx \frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0}, \quad x \approx x_0. \quad (4.157)$$

Mais precisamente, o método de Newton é uma iteração de ponto fixo da forma:

$$x^{(n+1)} = x^{(n)} - \alpha(x^{(n)})f(x^{(n)}), \quad n \geq 1, \quad (4.158)$$

onde $x^{(1)}$ é uma aproximação inicial dada e $\alpha(x^{(n)}) = 1/f'(x^{(n)})$. Usando a aproximação da derivada acima, com $x = x^{(n)}$ e $x_0 = x^{(n-1)}$, temos:

$$\alpha(x^{(n)}) = \frac{1}{f'(x^{(n)})} \approx \frac{x^{(n)} - x^{(n-1)}}{f(x^{(n)}) - f(x^{(n-1)})}. \quad (4.159)$$

Isto nos motiva a introduzir a **iteração do método das secantes** dada por:

$$x^{(n+1)} = x^{(n)} - f(x^{(n)}) \frac{x^{(n)} - x^{(n-1)}}{f(x^{(n)}) - f(x^{(n-1)})}, \quad n \geq 2. \quad (4.160)$$

Observe que para inicializarmos a iteração acima precisamos de duas aproximações iniciais, a saber, $x^{(1)}$ e $x^{(2)}$. Maneiras apropriadas de escolher estas aproximações podem ser inferidas da interpretação geométrica do método.

Exemplo 4.5.1. Encontre as raízes de $f(x) = \cos(x) - x$.

Solução. Da inspeção do gráfico das funções $y = \cos(x)$ e $y = x$, sabemos que esta equação possui uma raiz em torno de $x = 0,8$. Iniciamos o método com $x_0 = 0,7$ e $x_1 = 0,8$.

$x^{(n-1)}$	$x^{(n)}$	m	$x^{(n+1)}$
		$\frac{f(0,8)-f(0,7)}{0,8-0,7} =$	$0,8 - \frac{f(0,8)}{-1,6813548} =$
0,7	0,8	-1,6813548	0,7385654
0,8	0,7385654	-1,6955107	0,7390784
0,7385654	0,7390784	-1,6734174	0,7390851
0,7390784	0,7390851	-1,6736095	0,7390851

◇

4.5.1 Interpretação geométrica

Enquanto, o método de Newton está relacionado às retas tangentes ao gráfico da função objetivo $f(x)$, o método das secantes, como o próprio nome indica, está relacionado às retas secantes.

Sejam $f(x)$ e as aproximações $x^{(1)}$ e $x^{(2)}$ do zero x^* desta função (veja Figura 4.7). A iteração do método das secantes fornece:

$$x^{(3)} = x^{(2)} - f(x^{(2)}) \frac{x^{(2)} - x^{(1)}}{f(x^{(2)}) - f(x^{(1)})}. \quad (4.161)$$

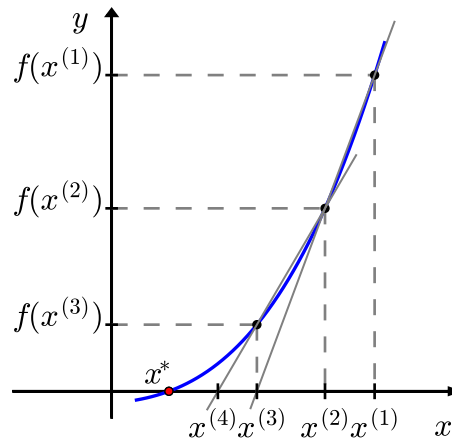


Figure 4.7: Método das secantes.

De fato, $x^{(3)}$ é o ponto de interseção da reta secante ao gráfico de $f(x)$ pelos pontos $x^{(1)}$ e $x^{(2)}$ com o eixo das abscissas. Com efeito, a equação desta reta secante é:

$$y = \frac{f(x^{(2)}) - f(x^{(1)})}{x^{(2)} - x^{(1)}}(x - x^{(2)}) + f(x^{(2)}). \quad (4.162)$$

Esta reta intercepta o eixo das abscissas no ponto x tal que $y = 0$, isto é:

$$\frac{f(x^{(2)}) - f(x^{(1)})}{x^{(2)} - x^{(1)}}(x - x^{(2)}) + f(x^{(2)}) = 0 \Rightarrow x = x^{(2)} - f(x^{(2)}) \frac{x^{(2)} - x^{(1)}}{f(x^{(2)}) - f(x^{(1)})}. \quad (4.163)$$

4.5.2 Análise de convergência

Uma análise assintótica semelhante àquela feita para o método de Newton na subseção 4.4.2 nos indica que, para uma função $f(x)$ duas vezes diferenciável, as iterações do método da secante satisfazem:

$$|x^{(n+1)} - x^*| \approx C|x^{(n)} - x^*||x^{(n-1)} - x^*|, \quad (4.164)$$

para aproximações iniciais suficientemente próximas de x^* , onde $f(x^*) = 0$. Além disso, veremos que:

$$|x^{(n+1)} - x^*| \leq C|x^{(n)} - x^*|^p, \quad p = \frac{\sqrt{5} + 1}{2} \approx 1,618 \quad (4.165)$$

sob certas condições. Ou seja, o método das secantes tem **taxa de convergência superlinear**.

Teorema 4.5.1 (Método das secantes). *Seja $f \in C^2([a, b])$ uma função com $x^* \in (a, b)$ tal que $f(x^*) = 0$. Sejam, também:*

$$m := \min_{x \in [a, b]} |f'(x)| > 0 \quad e \quad M := \max_{x \in [a, b]} |f''(x)| < \infty. \quad (4.166)$$

Além disso, seja $\rho > 0$ tal que:

$$q := \frac{M}{2m}\rho < 1, \quad K_\rho(x^*) := \{x \in \mathbb{R}; |x - x^*| \leq \rho\} \subset [a, b]. \quad (4.167)$$

Então, para aproximações iniciais $x^{(1)}, x^{(2)} \in K_\rho(x^*)$, com $x^{(1)} \neq x^{(2)}$, temos que as iterações do método das secantes $x^{(n)} \in K_\rho(x^*)$, $n \geq 1$, e $x^{(n)} \rightarrow x^*$, quando $n \rightarrow \infty$. Além disso, vale a seguinte estimativa de convergência **a priori**:

$$|x^{(n)} - x^*| \leq \frac{2m}{M} q^{\gamma_{n-1}}, \quad n \geq 1, \quad (4.168)$$

onde $\{\gamma_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ é a sequência de Fibonacci⁷⁸, bem como vale a estimativa **a posteriori**:

$$|x^{(n)} - x^*| \leq \frac{M}{2m} |x^{(n)} - x^{(n-1)}| |x^{(n-1)} - x^{(n-2)}|, \quad n \geq 3. \quad (4.169)$$

Proof. Sejam $n \in \mathbb{N}$ com $n \geq 2$ e $x^{(n)}, x^{(n-1)} \in K_\rho(x^*)$, tal que $x^{(n)} \neq x^{(n-1)}$, $x^{(n)} \neq x^*$ e $x^{(n-1)} \neq x^*$. Seja, também:

$$g(x^{(n)}, x^{(n-1)}) := x^{(n)} - f(x^{(n)}) \frac{x^{(n)} - x^{(n-1)}}{f(x^{(n)}) - f(x^{(n-1)})}. \quad (4.170)$$

Com isso, temos:

$$g(x^{(n)}, x^{(n-1)}) - x^* = x^{(n)} - f(x^{(n)}) \frac{x^{(n)} - x^{(n-1)}}{f(x^{(n)}) - f(x^{(n-1)})} - x^* \quad (4.171)$$

$$= \frac{x^{(n)} - x^{(n-1)}}{f(x^{(n)}) - f(x^{(n-1)})} \left\{ (x^{(n)} - x^*) \frac{f(x^{(n)}) - f(x^{(n-1)})}{x^{(n)} - x^{(n-1)}} \right. \quad (4.172)$$

$$\left. - f(x^{(n)}) + f(x^*) \right\}. \quad (4.173)$$

$$(4.174)$$

Então, da cota assumida para primeira derivada de $f(x)$ e do teorema do valor médio, temos:

$$|g(x^{(n)}, x^{(n-1)}) - x^*| \leq \frac{|x^{(n)} - x^*|}{m} \left| \frac{f(x^{(n)}) - f(x^{(n-1)})}{x^{(n)} - x^{(n-1)}} - \frac{f(x^{(n)}) - f(x^*)}{x^{(n)} - x^*} \right|. \quad (4.175)$$

⁷Leonardo Fibonacci, c. 1170 - c. 1250, matemático italiano.

⁸A sequência de Fibonacci $\{\gamma_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ é definida por $\gamma_0 = \gamma_1 = 1$ e $\gamma_{n+1} = \gamma_n + \gamma_{n-1}$, $n \geq 1$.

Agora, iremos estimar este último termo a direita. Para tanto, começamos observando que da expansão em polinômio de Taylor de ordem 0 da função $f(x)$ com resto na forma integral, temos:

$$\frac{f(x^{(n)}) - f(x^{(n-1)})}{x^{(n)} - x^{(n-1)}} = - \int_0^1 \frac{d}{dr} f(x^{(n)} + r(x^{(n-1)} - x^{(n)})) \frac{dr}{x^{(n)} - x^{(n-1)}} \quad (4.176)$$

$$= \int_0^1 f'(x^{(n)} + r(x^{(n-1)} - x^{(n)})) dr \quad (4.177)$$

De forma análoga, temos:

$$\frac{f(x^{(n)}) - f(x^*)}{x^{(n)} - x^*} = \int_0^1 f'(x^{(n)} + r(x^* - x^{(n)})) dr \quad (4.178)$$

Logo, temos:

$$\begin{aligned} \frac{f(x^{(n)}) - f(x^{(n-1)})}{x^{(n)} - x^{(n-1)}} - \frac{f(x^{(n)}) - f(x^*)}{x^{(n)} - x^*} = \\ \int_0^1 [f'(x^{(n)} + r(x^{(n-1)} - x^{(n)})) - f'(x^{(n)} + r(x^* - x^{(n)}))] dr. \end{aligned} \quad (4.179)$$

Agora, novamente temos:

$$\begin{aligned} & f'(x^{(n)} + r(x^{(n-1)} - x^{(n)})) - f'(x^{(n)} + r(x^* - x^{(n)})) \\ &= \int_0^r \frac{d}{ds} f'(x^{(n)} + r(x^{(n-1)} - x^{(n)}) + s(x^* - x^{(n-1)})) ds \\ &= \int_0^r f''(x^{(n)} + r(x^{(n-1)} - x^{(n)}) + s(x^* - x^{(n-1)})) ds (x^* - x^{(n-1)}). \end{aligned} \quad (4.180)$$

Retornando à Equação (4.179) e usando a cota para a segunda derivada, obtemos:

$$\left| \frac{f(x^{(n)}) - f(x^{(n-1)})}{x^{(n)} - x^{(n-1)}} - \frac{f(x^{(n)}) - f(x^*)}{x^{(n)} - x^*} \right| \leq \frac{M}{2} |x^{(n-1)} - x^*|. \quad (4.181)$$

Utilizando a Equação (4.175), obtemos:

$$|g(x^{(n)}, x^{(n-1)}) - x^*| \leq \frac{M}{2m} |x^{(n)} - x^*| |x^{(n-1)} - x^*| \leq \frac{M}{2m} \rho^2 < \rho. \quad (4.182)$$

Portanto, concluímos que as iterações do método da secantes $x^{(n)}$ permanecem no conjunto $K_\rho(x^*)$, se começarem nele. Além disso, temos demonstrado que:

$$|x^{(n+1)} - x^*| \leq \frac{M}{2m} |x^{(n)} - x^*| |x^{(n-1)} - x^*|. \quad (4.183)$$

Com isso, temos:

$$\rho_n := \frac{M}{2m} |x^{(n)} - x^*| \Rightarrow \rho_{n+1} \leq \rho_n \rho_{n-1}, \quad n \geq 2. \quad (4.184)$$

Como $\rho_1 \leq q$ e $\rho_2 \leq q$, temos $\rho_n \leq q^{\gamma_{n-1}}$, $n \geq 1$. Isto mostra a estimativa de convergência **a priori**:

$$|x^n - x^*| \leq \frac{2m}{M} q^{\gamma_{n-1}}. \quad (4.185)$$

Além disso, como $\gamma_n \rightarrow \infty$ quando $n \rightarrow \infty$ e $q < 1$, temos que as iterações do método das secantes $x^{(n)} \rightarrow x^*$ quando $n \rightarrow \infty$.

Por fim, mostramos a estimativa de convergência **a posteriori**. Para tanto, da cota assumida para a primeira derivada e do teorema do valor médio, temos, para $n \geq 3$:

$$|x^{(n)} - x^*| \leq \frac{1}{m} |f(x^{(n)}) - f(x^*)| \quad (4.186)$$

$$= \frac{1}{m} \left| f(x^{(n-1)}) + (x^{(n)} - x^{(n-1)}) \frac{f(x^{(n)}) - f(x^{(n-1)})}{x^{(n)} - x^{(n-1)}} \right| \quad (4.187)$$

$$= \frac{1}{m} |x^{(n)} - x^{(n-1)}| \left| \frac{f(x^{(n)}) - f(x^{(n-1)})}{x^{(n)} - x^{(n-1)}} + \frac{f(x^{(n-1)})}{x^{(n)} - x^{(n-1)}} \right| \quad (4.188)$$

Agora, a iteração do método das secantes fornece:

$$x^{(n)} = x^{(n-1)} - f(x^{(n-1)}) \frac{x^{(n-1)} - x^{(n-2)}}{f(x^{(n-1)}) - f(x^{(n-2)})} \quad (4.189)$$

e temos:

$$\frac{f(x^{(n-1)})}{x^{(n)} - x^{(n-1)}} = - \frac{f(x^{(n-1)}) - f(x^{(n-2)})}{x^{(n-1)} - x^{(n-2)}}. \quad (4.190)$$

Portanto:

$$|x^{(n)} - x^*| \leq \frac{1}{m} |x^{(n)} - x^{(n-1)}| \left| \frac{f(x^{(n-1)}) - f(x^{(n)})}{x^{(n-1)} - x^{(n)}} - \frac{f(x^{(n-1)}) - f(x^{(n-2)})}{x^{(n-1)} - x^{(n-2)}} \right|. \quad (4.191)$$

Observamos que o último termo pode ser estimado como feito acima para o termo análogo na Inequação (4.175). Com isso, obtemos a estimativa desejada:

$$|x^{(n)} - x^*| \leq \frac{M}{2m} |x^{(n)} - x^{(n-1)}| |x^{(n)} - x^{(n-2)}|. \quad (4.192)$$

□

Proposição 4.5.1 (Sequência de Fibonacci). *A sequência de Fibonacci $\{\gamma_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ é assintótica a $\gamma_n \sim \lambda_1^{n+1}/\sqrt{5}$ e:*

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\gamma_{n+1}}{\gamma_n} = \lambda_1, \quad (4.193)$$

onde $\lambda_1 = (1 + \sqrt{5})/2 \approx 1,618$ é a porção áurea.

Proof. A sequência de Fibonacci $\{\gamma_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ é definida por $\gamma_0 = \gamma_1 = 1$ e $\gamma_{n+1} = \gamma_n + \gamma_{n-1}$, $n \geq 1$. Logo, satisfaz a seguinte equação de diferenças:

$$\gamma_{n+2} - \gamma_{n+1} - \gamma_n = 0, \quad n \in \mathbb{N}. \quad (4.194)$$

Tomando $\gamma_n = \lambda^n$, $\lambda \neq 0$ temos:

$$\lambda^n (\lambda^2 - \lambda - 1) = 0 \Rightarrow \lambda^2 - \lambda - 1 = 0 \Rightarrow \lambda_{1,2} = \frac{1 \pm \sqrt{5}}{2}. \quad (4.195)$$

Portanto, $\gamma_n = c_1 \lambda_1^n + c_2 \lambda_2^n$. Como $\gamma_0 = \gamma_1 = 1$, as constantes satisfazem:

$$\begin{aligned} c_1 + c_2 &= 1 \\ c_1 \lambda_1 + c_2 \lambda_2 &= 1 \end{aligned} \Rightarrow c_1 = \frac{1 + \sqrt{5}}{2\sqrt{5}}, \quad c_2 = -\frac{1 - \sqrt{5}}{2\sqrt{5}}. \quad (4.196)$$

Ou seja, obtemos a seguinte forma explícita para os números de Fibonacci:

$$\gamma_n = \frac{1}{\sqrt{5}} \left[\left(\frac{1 + \sqrt{5}}{2} \right)^{n+1} - \left(\frac{1 - \sqrt{5}}{2} \right)^{n+1} \right]. \quad (4.197)$$

Daí, segue imediatamente o enunciado. \square

Observação 4.5.1. Sob as hipóteses do Teorema 4.5.1 e da Proposição 4.5.1, temos:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{|x^{(n+1)} - x^*|}{|x^{(n)} - x^*|^{\lambda_1}} \leq \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{M}{2m} |x^{(n)} - x^*|^{1-\lambda_1} |x^{(n-1)} - x^*| \quad (4.198)$$

$$\leq \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{2m}{M} \right)^{1-\lambda_1} q^{(2-\lambda_1)\lambda_1^n / \sqrt{5}} = 0. \quad (4.199)$$

Isto mostra que o método das secantes (nestas hipóteses) tem taxa de convergência superlinear ($\lambda_1 \approx 1,6$).

4.6 Critérios de parada

Quando usamos métodos iterativos precisamos determinar um critério de parada. A Tabela 4.4 indica critérios de parada usuais para os métodos que estudamos neste capítulo.

Observação 4.6.1. O erro na tabela sempre se refere ao erro absoluto esperado. Nos três últimos métodos, é comum que se exija como critério de parada que a condição seja satisfeita por alguns poucos passos consecutivos. Outros critérios podem ser usados. No métodos das secantes, deve-se ter o cuidado de evitar divisões por zero quando $x_{n+1} - x_n$ muito pequeno em relação à resolução do sistema de numeração.

Table 4.4: Quadro comparativo.

Método	Convergência	Erro	Critério de parada
Bisseção	Linear ($p = 1$)	$\epsilon_{n+1} = \frac{1}{2}\epsilon$	$\frac{b_n - a_n}{2} < \text{erro}$
Iteração linear	Linear ($p = 1$)	$\epsilon_{n+1} \approx \phi'(x^*) \epsilon_n$	$\frac{ \Delta_n }{1 - \frac{\Delta_n}{\Delta_{n-1}}} < \text{erro}$ $\Delta_n < \Delta_{n-1}$
Newton	Quadrática ($p = 2$)	$\epsilon_{n+1} \approx \frac{1}{2} \left \frac{f''(x^*)}{f'(x^*)} \right \epsilon_n^2$	$ \Delta_n < \text{erro}$
Secante	$p = \frac{\sqrt{5} + 1}{2}$ $\approx 1,618$	$\epsilon_{n+1} \approx \left \frac{f''(x^*)}{f'(x^*)} \right \epsilon_n \epsilon_{n-1}$ $\approx M \epsilon_n^\phi$	$ \Delta_n < \text{erro}$

Exercícios

E 4.6.1. Refaça as questões 4.4.3, 4.4.4, 4.4.5 e 4.4.6, usando o método das secantes.

E 4.6.2. Dê uma interpretação geométrica ao método das secantes. Qual a vantagem do método das secantes sobre o método de Newton?

E 4.6.3. Aplique o método das secantes para resolver a equação

$$e^{-x^2} = 2x \quad (4.200)$$

E 4.6.4. Refaça o Problema 4.2.8 usando o método de Newton e das secantes.

E 4.6.5. Seja uma função $f(x)$ dada duas vezes continuamente diferenciável. Faça uma análise assintótica para mostrar que as iterações do método das secantes satisfazem:

$$|x^{(n+1)} - x^*| \approx C|x^{(n)} - x^*||x^{(n-1)} - x^*|, \quad (4.201)$$

para aproximações iniciais $x^{(1)}$ e $x^{(2)}$ suficientemente próximas de x^* , onde $f(x^*) = 0$.

4.7 Exercícios finais

E 4.7.1. Calcule uma equação da reta tangente a curva $y = e^{-(x-1)^2}$ que passa pelo ponto $(3, 1/2)$.

E 4.7.2. Resolva numericamente a inequação:

$$e^{-x^2} < 2x \quad (4.219)$$

E 4.7.3. A equação

$$\cos(\pi x) = e^{-2x} \quad (4.220)$$

tem infinitas raízes. Usando métodos numéricos encontre as primeiras raízes dessa equação. Verifique a j -ésima raiz (z_j) pode ser aproximada por $j - 1/2$ para j grande. Use o método de Newton para encontrar uma aproximação melhor para z_j .

E 4.7.4. (Eletricidade) A corrente elétrica, I , em Ampéres em uma lâmpada em função da tensão elétrica, V , é dada por

$$I = \left(\frac{V}{150} \right)^{0.8} \quad (4.221)$$

Qual a potência da lâmpada quando ligada em série com uma resistência de valor R a uma fonte de 150V quando. (procure erro inferior a 1%)

- a) $R = 0\Omega$
- b) $R = 10\Omega$
- c) $R = 50\Omega$
- d) $R = 100\Omega$
- E) $R = 500\Omega$

E 4.7.5. (Bioquímica) A concentração sanguínea de um medicamento é modelado pela seguinte expressão

$$c(t) = Ate^{-\lambda t} \quad (4.222)$$

onde $t > 0$ é o tempo em minutos decorrido desde a administração da droga. A é a quantidade administrada em mg/ml e λ é a constante de tempo em min^{-1} . Responda:

- Sendo $\lambda = 1/3$, em que instantes de tempo a concentração é metade do valor máximo. Calcule com precisão de segundos.
- Sendo $\lambda = 1/3$ e $A = 100mg/ml$, durante quanto tempo a concentração permanece maior que $10mg/ml$.

E 4.7.6. Considere o seguinte modelo para crescimento populacional em um país:

$$P(t) = A + Be^{\lambda t}. \quad (4.223)$$

onde t é dado em anos. Use t em anos e $t = 0$ para 1960. Encontre os parâmetros A , B e λ com base nos anos de 1960, 1970 e 1991 conforme tabela:

Ano	população
1960	70992343
1970	94508583
1980	121150573
1991	146917459

Use esses parâmetros para calcular a população em 1980 e compare com o valor do censo. Dica: considere $\frac{P(31)-P(0)}{P(10)-P(0)}$ e reduza o sistema a uma equação apenas na variável λ .

E 4.7.7. (Fluidos) Uma boia esférica flutua na água. Sabendo que a boia tem 10ℓ de volume e 2Kg de massa. Calcule a altura da porção molhada da boia.

E 4.7.8. (Fluidos) Uma boia cilíndrica tem secção transversal circular de raio 10cm e comprimento 2m e pesa 10Kg . Sabendo que a boia flutua sobre água com o eixo do cilindro na posição horizontal, calcule a altura da parte molhada da boia.

E 4.7.9. Encontre com 6 casas decimais o ponto da curva $y = \ln x$ mais próximo da origem.

E 4.7.10. (Matemática financeira) Um computador é vendido pelo valor a vista de R\$2.000,00 ou em 1+15 prestações de R\$200,00. Calcule a taxa de juros associada à venda a prazo.

E 4.7.11. (Matemática financeira) O valor de R\$110.000,00 é financiado conforme a seguinte programa de pagamentos:

Mês	pagamento
1	20.000,00
2	20.000,00
3	20.000,00
4	19.000,00
5	18.000,00
6	17.000,00
7	16.000,00

Calcule a taxa de juros envolvida. A data do empréstimo é o mês zero.

E 4.7.12. (Controle de sistemas) Depois de acionado um sistema de aquecedores, a temperatura em um forno evolui conforme a seguinte equação

$$T(t) = 500 - 800e^{-t} + 600e^{-t/3}. \quad (4.224)$$

onde T é a temperatura em Kelvin e t é tempo em horas.

- Obtenha analiticamente o valor de $\lim_{t \rightarrow \infty} T(t)$.
- Obtenha analiticamente o valor máximo de $T(t)$ e o instante de tempo quando o máximo acontece
- Obtenha numericamente com precisão de minutos o tempo decorrido até que a temperatura passe pela primeira vez pelo valor de equilíbrio obtido no item a.
- Obtenha numericamente com precisão de minutos a duração do período durante o qual a temperatura permanece pelo menos 20% superior ao valor de equilíbrio.

E 4.7.13. Encontre os pontos onde a elipse que satisfaz $\frac{x^2}{3} + y^2 = 1$ intersepta a parábola $y = x^2 - 2$.

E 4.7.14. (Otimização) Encontre a área do maior retângulo que é possível inscrever entre a curva $e^{-x^2}(1 + \cos(x))$ e o eixo $y = 0$.

E 4.7.15. (Otimização) Uma indústria consome energia elétrica de duas usinas fornecedoras. O custo de fornecimento em reais por hora como função da potência consumida em kW é dada pelas seguintes funções

$$C_1(x) = 500 + .27x + 4.1 \cdot 10^{-5}x^2 + 2.1 \cdot 10^{-7}x^3 + 4.2 \cdot 10^{-10}x^4 \quad (4.225)$$

$$C_2(x) = 1000 + .22x + 6.3 \cdot 10^{-5}x^2 + 8.5 \cdot 10^{-7}x^3 \quad (4.226)$$

Onde $C_1(x)$ e $C_2(x)$ são os custos de fornecimento das usinas 1 e 2, respectivamente. Calcule o custo mínimo da energia elétrica quando a potência total consumida é $1500kW$. Obs: Para um problema envolvendo mais de duas usinas, veja ??.

E 4.7.16. (Termodinâmica) A pressão de saturação (em bar) de um dado hidrocarboneto pode ser modelada pela equação de Antoine:

$$\ln(P^{sat}) = A - \frac{B}{T + C} \quad (4.227)$$

onde T é a temperatura e A , B e C são constantes dadas conforme a seguir:

Hidrocarboneto	A	B	C
N-pentano	9.2131	2477.07	-39.94
N-heptano	9.2535	2911.32	-56.51

- a) Calcule a temperatura de bolha de uma mistura de N-pentano e N-heptano à pressão de 1.2bar quando as frações molares dos gases são $z_1 = z_2 = 0.5$. Para tal utilize a seguinte equação:

$$P = \sum_i z_i P_i^{sat} \quad (4.228)$$

- b) Calcule a temperatura de orvalho de uma mistura de N-pentano e N-heptano à pressão de 1.2bar quando as frações molares dos gases são $z_1 = z_2 = 0.5$. Para tal utilize a seguinte equação:

$$\frac{1}{P} = \sum_i \frac{z_i}{P_i^{sat}} \quad (4.229)$$

E 4.7.17. Encontre os três primeiros pontos de mínimo da função

$$f(x) = e^{-x/11} + x \cos(2x) \quad (4.230)$$

para $x > 0$ com erro inferior a 10^{-7} .

Chapter 5

Ajuste de curvas

Neste capítulo, abordamos os problemas de **ajuste de curvas** pelo **método dos mínimos quadrados**. Mais precisamente, dado um conjunto de N pontos $\{(x_j, y_j) \in \mathbb{R}^2\}_{j=1}^N$ e uma família de funções $\mathcal{F} = \{f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}; y = f(x)\}$, o problema de ajuste de curvas consiste em encontrar uma função da família \mathcal{F} que melhor se ajusta aos pontos dados, não necessariamente que os interpola.

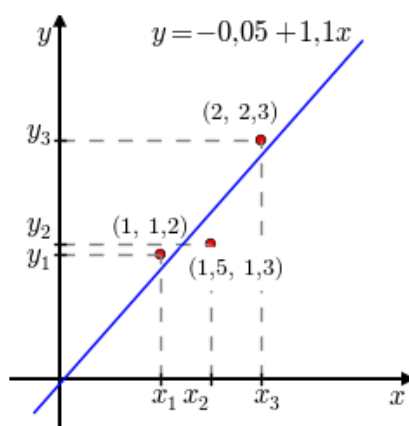


Figure 5.1: Exemplo de um problema de ajuste de uma reta entre três pontos, veja o Exemplo ??.

Aqui, o termo “melhor se ajusta” é entendido no sentido de mínimos quadrados, isto é, buscamos encontrar uma função $f \in \mathcal{F}$ tal que $f(x)$ resolve o seguinte problema de minimização

$$\min_{f \in \mathcal{F}} \sum_{j=1}^N (f(x_j) - y_j)^2, \quad (5.1)$$

ou seja, $f(x)$ é a função da família \mathcal{F} cujo erro quadrático entre y_j e $f(x_j)$, $j = 1, 2, \dots, N$, é mínimo. A expressão

$$\begin{aligned} R &:= \sum_{j=1}^N (f(x_j) - y_j)^2 \\ &= (f(x_1) - y_1)^2 + (f(x_2) - y_2)^2 + \dots + (f(x_N) - y_N)^2 \end{aligned} \quad (5.2)$$

é chamada de **soma do quadrado dos resíduos** e consiste na soma dos quadrados das diferenças entre a ordenadas y_j e o valor da função procurada $f(x_j)$.

Exemplo 5.0.1. Dado o conjunto de pontos $\{(1, 1, 2), (1, 5, 1, 3), (2, 2, 3)\}$ e a família de retas $f(x) = a + bx$, podemos mostrar que $f(x) = -0,05 + 1,1x$ é a reta que melhor aproxima os pontos dados no sentido de mínimos quadrados. Os pontos e a reta ajustada e são esboçados na Figura ??.

Na sequência, discutimos o procedimento de ajuste de uma reta, então, mostramos a generalização da técnica para problemas lineares de ajuste e, por fim, discutimos alguns problemas de ajuste não lineares.

5.1 Ajuste de uma reta

Nesta seção, discutiremos o procedimento de ajuste de uma reta a um conjunto de pontos dados. Em outras palavras, discutiremos o método de solução para o problema de encontrar o polinômio do primeiro grau que melhor se aproxima a um dado conjunto de pontos pelo método dos mínimos quadrados.

Seja, então, $\{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_N, y_N)\}$ um conjunto de N pontos dados. Buscamos encontrar a função $f(x) = a_1 + a_2x$ tal que o resíduo

$$R = \sum_{j=1}^N (f(x_j) - y_j)^2 \quad (5.3)$$

seja mínimo.

Para tal, primeiro observamos que $f(x_j) = a_1 + a_2x_j$ e, portanto, o resíduo pode ser escrito explicitamente como uma função de a_1 e a_2 conforme a seguinte expressão:

$$R(a_1, a_2) = \sum_{j=1}^N (a_1 + a_2x_j - y_j)^2. \quad (5.4)$$

Observamos que $R(a_1, a_2)$ é uma forma quadrática e que seu mínimo ocorre

quando suas derivadas parciais primeiras são iguais a zero, isto é,

$$\frac{\partial R}{\partial a_1} = \frac{\partial}{\partial a_1} \sum_{j=1}^N (a_1 + a_2 x_j - y_j)^2 = 0, \quad (5.5)$$

$$\frac{\partial R}{\partial a_2} = \frac{\partial}{\partial a_2} \sum_{j=1}^N (a_1 + a_2 x_j - y_j)^2 = 0. \quad (5.6)$$

Ou seja,

$$2 \sum_{j=1}^N (a_1 + a_2 x_j - y_j) \cdot 1 = 0, \quad (5.7)$$

$$2 \sum_{j=1}^N (a_1 + a_2 x_j - y_j) \cdot x_j = 0, \quad (5.8)$$

e isolando as incógnitas temos

$$a_1 \sum_{j=1}^N 1 + a_2 \sum_{j=1}^N x_j = \sum_{j=1}^N y_j, \quad (5.9)$$

$$a_1 \sum_{j=1}^N x_j + a_2 \sum_{j=1}^N x_j^2 = \sum_{j=1}^N y_j x_j. \quad (5.10)$$

Observando que $\sum_{j=1}^N 1 = N$, o sistema linear acima pode ser escrito na forma matricial $Ma = w$, isto é,

$$\underbrace{\begin{bmatrix} N & \sum_{j=1}^N x_j \\ \sum_{j=1}^N x_j & \sum_{j=1}^N x_j^2 \end{bmatrix}}_M \underbrace{\begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix}}_a = \underbrace{\begin{bmatrix} \sum_{j=1}^N y_j \\ \sum_{j=1}^N x_j y_j \end{bmatrix}}_w. \quad (5.11)$$

Este sistema linear de duas equações e duas incógnitas admite uma única solução quando o determinante da matriz dos coeficientes for não nulo, isto é,

$$N \sum_{j=1}^N x_j^2 - \left(\sum_{j=1}^N x_j \right)^2 \neq 0 \quad (5.12)$$

Pode-se mostrar usando a **desigualdade de Cauchy–Schwarz** que isto acontece quando existem pelo menos duas abscissas diferentes envolvidas no ajuste. Usando a fórmula da inversa de uma matriz dois-por-dois, chegamos às seguintes fórmulas

Prof. M.e Daniel Cassimiro

para os coeficientes a_1 e a_2 :

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{\sum_{j=1}^N x_j^2 \cdot \sum_{j=1}^N y_j - \sum_{j=1}^N x_j \cdot \sum_{j=1}^N x_j y_j}{N \sum_{j=1}^N x_j^2 - \left(\sum_{j=1}^N x_j\right)^2} \\ a_2 &= \frac{N \sum_{j=1}^N x_j y_j - \sum_{j=1}^N x_j \cdot \sum_{j=1}^N y_j}{N \sum_{j=1}^N x_j^2 - \left(\sum_{j=1}^N x_j\right)^2} \end{aligned} \quad (5.13)$$

Por fim, observamos que o sistema $Ma = w$ descrito na Equação (??) pode ser reescrito na forma $V^T V a = V^T y$, onde $V := [1 \ x]$ é a matriz dos coeficientes do seguinte sistema linear sobre determinado:

$$\begin{aligned} a_1 + a_2 x_1 &= y_1 \\ a_1 + a_2 x_2 &= y_2 \\ &\vdots \\ a_1 + a_2 x_N &= y_N \end{aligned} \quad (5.14)$$

Se os pontos dados não são colineares, este sistema não tem solução. Mas, sempre que pelo menos duas abscissas foram diferentes, $M = V^T V$ é uma matriz invertível e (veja o Exercício ??), então

$$a = (V^T V)^{-1} V^T y, \quad (5.15)$$

nos fornece a chamada solução por mínimos quadrados do sistema (??). Note que esta é uma forma de obter os coeficientes $a = (a_1, a_2)$ equivalente àquela dada em (??).

Exemplo 5.1.1. Retornemos ao Exemplo ???. Isto é, dado o conjunto de pontos $\{(1, 1, 2), (1, 5, 1, 3), (2, 2, 3)\}$, encontrar a função do tipo $f(x) = a_1 + a_2 x$ que melhor se ajusta os pontos dados no sentido de mínimos quadrados.

Solução. Usando as fórmulas em (??), obtemos

$$a_1 = \frac{7,25 \cdot 4,8 - 4,5 \cdot 7,75}{3 \cdot 7,25 - 20,25} = -0,05, \quad (5.16)$$

$$a_2 = \frac{3 \cdot 7,75 - 4,5 \cdot 4,8}{3 \cdot 7,25 - 20,25} = 1,1. \quad (5.17)$$

Ou seja, verificamos que, de fato, a função $f(x) = -0,05 + 1,1x$ corresponde à reta que melhor ajusta os pontos dados no sentido de mínimos quadrados. Os pontos e a reta ajustada estão esboçados na Figura ??.

Deixamos ao leitor a verificação de que os coeficientes a_1 e a_2 também podem ser obtidos pela expressão (??).

Os coeficientes a_1 e a_2 podem ser rapidamente calculados no **Scilab** usando a expressão (??). Para tanto, digitamos:

Prof. M.e Daniel Cassimiro

```
-->xj = [1, 1.5, 2]';
-->yj = [1.2, 1.3, 2.3]';
-->V = [ones(3,1) xj];
-->a = inv(V'*V)*V'*yj
a =
    - 0.05
    1.1
```

Então, o gráfico da função ajustada e dos pontos pode ser obtido com os comandos:

```
-->deff('y = f(x)', 'y = a(1) + a(2)*x')
-->xx = linspace(0.5, 2.5);
-->plot(xj, yj, 'ro', xx, f(xx), 'b-')
```

◇

O procedimento apresentado de ajuste de uma reta por mínimos quadrados pode ser generalizado para qualquer família de funções que seja um espaço vetorial de dimensão finita. Problemas de ajuste com tais famílias de funções é o que chamamos de problemas de ajuste linear, os quais exploramos em detalhe na próxima seção.

Exercício resolvido

ER 5.1.1. a) Mostre que o sistema linear $Ma = w$ descrito na Equação ?? pode ser reescrito na forma $V^T V a = V^T y$, onde $V = [1 \ x]$.

b) Mostre que V , como definido no item a), tem posto igual a 2 quando pelo menos duas abscissas do conjunto de pontos $\{(x_j, y_j)\}_{j=1}^N$ são diferentes. E, portanto, $M = V^T V$ é uma matriz invertível.

Solução. a) Basta observar que

$$V^T V = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ x_1 & x_2 & \cdots & x_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & x_1 \\ 1 & x_2 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & x_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N & \sum_{j=1}^N x_j \\ \sum_{j=1}^N x_j & \sum_{j=1}^N x_j^2 \end{bmatrix} = M \quad (5.18)$$

e

$$V^T y = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ x_1 & x_2 & \cdots & x_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^N y_j \\ \sum_{j=1}^N x_j y_j \end{bmatrix} = w. \quad (5.19)$$

- b) Sejam $x_i \neq x_j$ duas abscissas diferentes. Então, a i -ésima e j -ésima linhas na matriz V são linearmente independentes e, portanto, o posto de V é igual a 2. Por fim, $V^T V$ é não singular, pois, se u é tal que $V^T V u = 0$, então

$$0 = u^T V^T V u = (Vu)^T (Vu) = (Vu) \cdot (Vu) \Rightarrow Vu = 0. \quad (5.20)$$

Agora, $Vu = 0$ é uma combinação linear das linhas de V igual a zero, logo $u = 0$, pois as linhas de V são linearmente independentes como mostrado antes. Concluimos que se $V^T V u = 0$, então $u = 0$, isto é, $V^T V$ é não singular. \diamond

Exercícios

E 5.1.1. Sejam dados o conjunto de pontos $\{(0,23, -0,54), (-0,30, -0,54), (0,04, -0,57)\}$. Encontre a função $f(x) = a_1 + a_2 x$ que melhor se ajusta no sentido de mínimos quadrados aos pontos dados. Faça, então, um gráfico com os pontos e o esboço da função ajustada.

E 5.1.2. Seja dado o conjunto de pontos $\{(-0,35, 0,2), (0,15, -0,5), (0,23, 0,54), (0,35, 0,7)\}$. Encontre a função $f(x) = a_1 + a_2 x$ que melhor se ajusta no sentido de mínimos quadrados aos pontos dados. Faça, então, um gráfico com os pontos e o esboço da função ajustada.

E 5.1.3. Seja dado o conjunto de pontos $\{(-1,94, 1,02), (-1,44, 0,59), (0,93, -0,28), (1,39, -1,04)\}$. Encontre a função $f(x) = a_1 + a_2 x$ que melhor se ajusta no sentido de mínimos quadrados aos pontos dados. Então, responda cada item:

- Encontre o valor de $f(1)$.
- Encontre o valor de $f(0,93)$.
- Encontre o valor de $|f(0,93) - (-0,28)|$.
- Encontre o valor do resíduo $R = \sum_{j=1}^N (f(x_j) - y_j)^2$.

Forneça os valores calculados com 7 dígitos significativo por arredondamento.

5.2 Ajuste linear geral

O problema geral de ajuste linear consiste em dada uma família \mathcal{F} gerada pelo conjunto de m funções $\{f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x)\}$ e um conjunto de n pares ordenados $\{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)\}$, calcular os coeficientes a_1, a_2, \dots, a_m tais que a função dada por

$$f(x) = \sum_{j=1}^m a_j f_j(x) = a_1 f_1(x) + a_2 f_2(x) + \dots + a_m f_m(x) \quad (5.21)$$

minimiza o resíduo

$$R = \sum_{i=1}^n [f(x_i) - y_i]^2. \quad (5.22)$$

Aqui, a minimização é feita por todas as possíveis escolhas dos coeficientes a_1, a_2, \dots, a_m .

Com o objetivo de tornar a desenvolvimento mais claro, vamos escrever R como a soma dos resíduos parciais:

$$R = \sum_{i=1}^n R_i, \quad \text{onde} \quad R_i := [f(x_i) - y_i]^2. \quad (5.23)$$

Do fato que $f(x_i) = \sum_{j=1}^m a_j f_j(x_i)$, temos que cada resíduo pode ser escrito como

$$R_i = \left[\sum_{j=1}^m a_j f_j(x_i) - y_i \right]^2. \quad (5.24)$$

A fim de encontrar o ponto de mínimo, resolvemos o sistema oriundo de igualar a zero cada uma das derivadas parciais de R em relação aos m coeficientes a_j , isto é, devemos resolver:

$$\frac{\partial R}{\partial a_1} = 2 \sum_{i=1}^n \frac{\partial R_i}{\partial a_1} = 2 \sum_{i=1}^n \left[\sum_{j=1}^m a_j f_j(x_i) - y_i \right] f_1(x_i) = 0, \quad (5.25)$$

$$\frac{\partial R}{\partial a_2} = 2 \sum_{i=1}^n \frac{\partial R_i}{\partial a_2} = 2 \sum_{i=1}^n \left[\sum_{j=1}^m a_j f_j(x_i) - y_i \right] f_2(x_i) = 0, \quad (5.26)$$

$$\vdots \quad (5.27)$$

$$\frac{\partial R}{\partial a_m} = 2 \sum_{i=1}^n \frac{\partial R_i}{\partial a_m} = 2 \sum_{i=1}^n \left[\sum_{j=1}^m a_j f_j(x_i) - y_i \right] f_m(x_i) = 0. \quad (5.28)$$

Dividindo cada equação por 2 e escrevendo na forma matricial, obtemos $Ma = w$, onde a matriz M é dada por:

$$M = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n f_1(x_i)^2 & \sum_{i=1}^n f_2(x_i)f_1(x_i) & \cdots & \sum_{i=1}^n f_m(x_i)f_1(x_i) \\ \sum_{i=1}^n f_1(x_i)f_2(x_i) & \sum_{i=1}^n f_2(x_i)^2 & \cdots & \sum_{i=1}^n f_m(x_i)f_2(x_i) \\ \sum_{i=1}^n f_1(x_i)f_3(x_i) & \sum_{i=1}^n f_2(x_i)f_3(x_i) & \cdots & \sum_{i=1}^n f_m(x_i)f_3(x_i) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{i=1}^n f_1(x_i)f_m(x_i) & \sum_{i=1}^n f_2(x_i)f_m(x_i) & \cdots & \sum_{i=1}^n f_m(x_i)^2 \end{bmatrix}. \quad (5.29)$$

E os vetores a e w são dados por:

$$a = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_m \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad w = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n f_1(x_i)y_i \\ \sum_{i=1}^n f_2(x_i)y_i \\ \sum_{i=1}^n f_3(x_i)y_i \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^n f_m(x_i)y_i \end{bmatrix}. \quad (5.30)$$

Agora, observamos que $M = V^T V$ e $w = V^T y$, onde a matriz V é dada por:

$$V = \begin{bmatrix} f_1(x_1) & f_2(x_1) & \cdots & f_m(x_1) \\ f_1(x_2) & f_2(x_2) & \cdots & f_m(x_2) \\ f_1(x_3) & f_2(x_3) & \cdots & f_m(x_3) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_1(x_n) & f_2(x_n) & \cdots & f_m(x_n) \end{bmatrix} \quad (5.31)$$

e y é o vetor coluna $y = (y_1, y_2, \dots, y_N)$.

Assim, o problema de ajuste se reduz a resolver o sistema linear $Ma = w$, ou $V^T V a = V^T y$. Este sistema linear tem solução única se a matriz M for inversível. O teorema a seguir mostra que isto acontece sempre a matriz V possui posto m , ou seja, o número de linhas linearmente independentes for igual ao número de colunas.¹

¹Nota-se que o posto não pode ultrapassar o número de colunas.

Teorema 5.2.1. *A matriz $M = V^T V$ é quadrada de ordem m e é inversível sempre que o posto da matriz V é igual a número de colunas m .*

Proof. Para provar que M é inversível, precisamos mostrar que se v é um vetor de ordem m e $Mv = 0$, então $v = 0$. Suponha, então, que $Mv = 0$, isto é, $V^T V v = 0$. Tomando o produto interno da expressão $V^T V v = 0$ com v , temos:

$$0 = \langle V^T V v, v \rangle = \langle V v, V v \rangle = \|V v\|^2 \quad (5.32)$$

Portanto $Mv = 0$ implica obrigatoriamente $Vv = 0$. Como o posto de V é igual ao número de colunas, v precisar ser o vetor nulo. \square

Observação 5.2.1. Este problema é equivalente a resolver pelo métodos dos mínimos quadrados o seguinte sistema linear:

$$\begin{bmatrix} f_1(x_1) & f_2(x_1) & \cdots & f_m(x_1) \\ f_1(x_2) & f_2(x_2) & \cdots & f_m(x_2) \\ f_1(x_3) & f_2(x_3) & \cdots & f_m(x_3) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_1(x_n) & f_2(x_n) & \cdots & f_m(x_n) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} \quad (5.33)$$

Observação 5.2.2. O caso de ajuste de uma reta para um conjunto de pontos é um caso particular de ajuste linear.

Exemplo 5.2.1. Encontre a reta que melhor se ajusta aos pontos dados na seguinte tabela:

i	1	2	3	4	5
x_i	0,01	1,02	2,04	2,95	3,55
y_i	1,99	4,55	7,20	9,51	10,82

Solução. O problema consiste em ajustar uma função da forma $f(x) = a_1 + a_2 x$ no conjunto de pontos dados. Notamos que $f(x)$ é uma função da família gerada pelo conjunto de funções $\{f_1(x) = 1, f_2(x) = x\}$. Então, aplicando o procedimento acima, temos que o vetor dos coeficientes $a = (a_1, a_2)$ é solução por mínimos

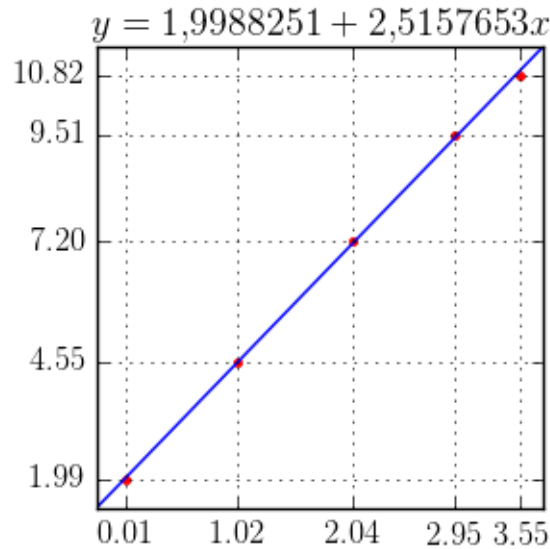


Figure 5.2: Gráfico da solução do problema apresentado no Exemplo 5.2.1.

quadrados do sistema linear $Va = y$, onde:

$$V = \begin{bmatrix} f_1(x_1) & f_2(x_1) \\ f_1(x_2) & f_2(x_2) \\ f_1(x_3) & f_2(x_3) \\ f_1(x_4) & f_2(x_4) \\ f_1(x_5) & f_2(x_5) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0,01 \\ 1 & 1,02 \\ 1 & 2,04 \\ 1 & 2,95 \\ 1 & 3,55 \end{bmatrix}. \quad (5.34)$$

Ou seja, é a solução do sistema $V^T Va = V^T y$ dado por

$$\begin{bmatrix} 5 & 9,57 \\ 9,57 & 26,5071 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 34,07 \\ 85,8144 \end{bmatrix} \quad (5.35)$$

A solução desse sistema é $a_1 = 1,9988251$ e $a_2 = 2,5157653$. A Figura 5.2, apresenta um gráfico dos pontos e da reta ajustada.

◇

Exemplo 5.2.2. Encontre a função $f(x) = a_1 \sin(\pi x) + a_2 \cos(\pi x)$ que melhor se ajusta pelo critérios dos mínimos quadrados aos seguintes pontos dados

Prof. M.e Daniel Cassimiro

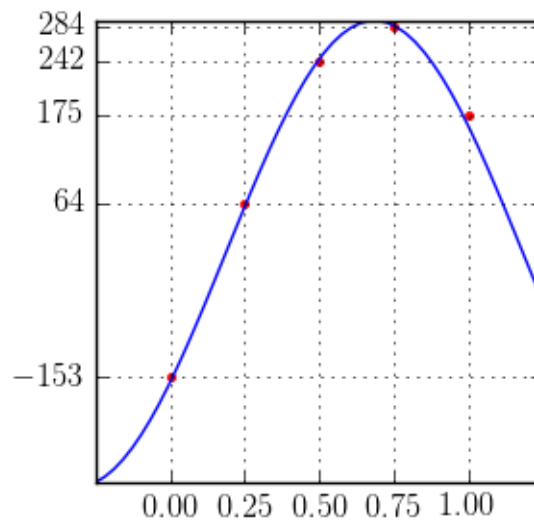


Figure 5.3: Gráfico da solução do problema apresentado no Exemplo ??.

i	1	2	3	4	5
x_i	0,00	0,25	0,50	0,75	1,00
y_i	-153	64	242	284	175

Solução. Pelo procedimento visto nesta seção, temos que os coeficientes a_1 e a_2 são dados pela solução por mínimos quadrados do seguinte sistema linear $Va = y$

$$\begin{aligned}
 a_1 \sin(\pi x_1) + a_2 \cos(\pi x_1) &= y_1 \\
 a_1 \sin(\pi x_2) + a_2 \cos(\pi x_2) &= y_2 \\
 a_1 \sin(\pi x_3) + a_2 \cos(\pi x_3) &= y_3 \\
 a_1 \sin(\pi x_4) + a_2 \cos(\pi x_4) &= y_4 \\
 a_1 \sin(\pi x_5) + a_2 \cos(\pi x_5) &= y_5
 \end{aligned} \tag{5.36}$$

cuja matriz de coeficientes V é:

$$V = \begin{bmatrix} \sin(0) & \cos(0) \\ \sin(0,25\pi) & \cos(0,25\pi) \\ \sin(0,5\pi) & \cos(0,5\pi) \\ \sin(0,75\pi) & \cos(0,75\pi) \\ \sin(\pi) & \cos(\pi) \end{bmatrix} \tag{5.37}$$

Então, a solução por mínimos quadrados é

$$a = (V^T V)^{-1} V^T y = \begin{bmatrix} 244,03658 \\ -161,18783 \end{bmatrix}. \quad (5.38)$$

Ou seja, $f(x) = 244,03658 \sin(\pi x) - 161,18783 \cos(\pi x)$ é a função ajustada ao conjunto de pontos dados. A Figura ?? apresenta o gráfico de $f(x)$ e dos pontos dados.

No **Scilab**, podemos computar os coeficientes da função $f(x)$ da seguinte forma:

```
-->xi = [0 0.25 0.5 0.75 1]';
-->yi = [-153 64 242 284 175]';
-->V = [sin(%pi*xi) cos(%pi*xi)];
-->a = inv(V'*V)*V'*yi
a =
    244.03658
   -161.18783
```

◇

Observação 5.2.3. No **Scilab**, quando resolvemos um sistema $Ax = b$ usando

```
-->x = inv(A)*b
```

estamos computando a inversa da matriz A e multiplicando por b . Podemos evitar a computação da inversa de A usando o operador contra barra (\backslash). Neste caso, escrevemos

```
-->x = A\b
```

Quando o sistema A não é uma matriz quadrada, $A \backslash b$ retorna a solução por mínimos quadrados do sistema $Ax = b$, enquanto $\text{inv}(A)*b$ retorna um erro, pois A não é uma matriz quadrada e, portanto, não é invertível.

5.2.1 Ajuste polinomial

O **ajuste polinomial** é o caso particular do ajuste linear para **funções polinomiais**, isto é, funções do tipo

$$p(x) = a_1 + a_2 x + \cdots + a_m x^{m-1}. \quad (5.39)$$

Prof. M.e Daniel Cassimiro

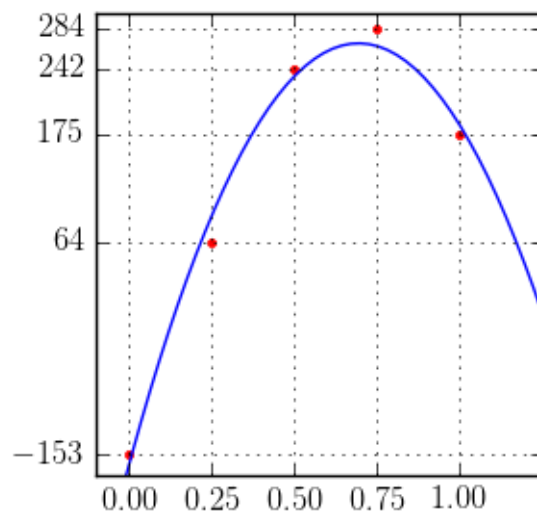


Figure 5.4: Gráfico da solução do problema apresentado no Exemplo ??.

Neste caso, a matriz V associada ao ajuste dos pontos $\{(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3), \dots, (x_n, y_n)\}$ é dada por:

$$V = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & x_1^2 & \cdots & x_1^{m-1} \\ 1 & x_2 & x_2^2 & \cdots & x_2^{m-1} \\ 1 & x_3 & x_3^2 & \cdots & x_3^{m-1} \\ \vdots & \vdots & & \ddots & \vdots \\ 1 & x_n & x_n^2 & \cdots & x_n^{m-1} \end{bmatrix} \quad (5.40)$$

Então, os coeficientes a_i , $i = 1, 2, \dots, m$, são dados pela solução do sistema linear $V^T V a = v^T y$:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} n & \sum_{j=1}^n x_j & \cdots & \sum_{j=1}^n x_j^{m-1} \\ \sum_{j=1}^n x_j & \sum_{j=1}^n x_j^2 & & \sum_{j=1}^n x_j^m \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ \sum_{j=1}^n x_j^{m-1} & \sum_{j=1}^n x_j^m & \cdots & \sum_{j=1}^n x_j^{2m-1} \end{bmatrix}}_{V^T V} \underbrace{\begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_{p+1} \end{bmatrix}}_a = \underbrace{\begin{bmatrix} \sum_{j=1}^n y_j \\ \sum_{j=1}^n x_j y_j \\ \vdots \\ \sum_{j=1}^n x_j^{m-1} y_j \end{bmatrix}}_{V^T y} \quad (5.41)$$

Exemplo 5.2.3. Entre o polinômio de grau 2 que melhor se ajusta aos pontos dados na seguinte tabela:

i	1	2	3	4	5
x_i	0,00	0,25	0,50	0,75	1,00
y_i	-153	64	242	284	175

Solução. Um polinômio de grau 2 pode ser escrito na seguinte forma:

$$p(x) = a_1 + a_2x + a_3x^2. \quad (5.42)$$

Assim, o problema se resume em encontrarmos a solução por mínimos quadrados do seguinte sistema linear:

$$\begin{aligned} a_1 + a_2x_1 + a_3x_1^2 &= y_1 \\ a_1 + a_2x_2 + a_3x_2^2 &= y_2 \\ a_1 + a_2x_3 + a_3x_3^2 &= y_3 \\ a_1 + a_2x_4 + a_3x_4^2 &= y_4 \\ a_1 + a_2x_5 + a_3x_5^2 &= y_5 \end{aligned} \quad (5.43)$$

Ou, escrita na forma matricial, $Va = y$, onde:

$$V = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & x_1^2 \\ 1 & x_2 & x_2^2 \\ 1 & x_3 & x_3^2 \\ 1 & x_4 & x_4^2 \\ 1 & x_5 & x_5^2 \end{bmatrix} \quad (5.44)$$

A solução por mínimos quadrados é, então:

$$a = (V^T V)^{-1} V^T y = \begin{bmatrix} -165,37143 \\ 1250,9714 \\ -900,57143 \end{bmatrix} \quad (5.45)$$

Ou seja, o polinômio de grau 2 que melhor ajusta os pontos dados no sentido de mínimos quadrados é $p(x) = -165,37143 + 1250,9714x - 900,57143x^2$. A Figura ?? mostra o gráfico do polinômio ajustado e os pontos dados.

No **Scilab**, podemos computar o polinômio $p(x)$ da seguinte forma:

Prof. M.e Daniel Cassimiro

```
-->xi = [0 0.25 0.5 0.75 1]';
-->yi = [-153 64 242 284 175]';
-->V = [ones(5,1) xi xi.^2];
-->a = V\yi;
-->p = poly(a,'x','c')
p =
```

$$-165.37143 + 1250.9714x - 900.57143x^2$$

Para fazermos o gráfico do polinômio e dos pontos, digitamos:

```
-->xx = linspace(-0.25,1.25);
-->plot(xi,yi,'ro',xx,horner(p,xx),'b-');xgrid
```

◇

Exercícios

E 5.2.1. Encontre o polinômio $p(x) = a_1 + a_2x + a_3x^2$ que melhor se ajusta no sentido de mínimos quadrados aos pontos:

i	1	2	3	4
x_i	-1,50	-0,50	1,25	1,50
y_i	1,15	-0,37	0,17	0,94

E 5.2.2. Encontrar a parábola $y = ax^2 + bx + c$ que melhor aproxima o seguinte conjunto de dados:

i	1	2	3	4	5
x_i	0,01	1,02	2,04	2,95	3,55
y_i	1,99	4,55	7,20	9,51	10,82

E 5.2.3. Dado o seguinte conjunto de dados

x_i	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
y_i	31	35	37	33	28	20	16	15	18	23	31

a) Encontre a função do tipo $f(x) = a + b\sin(2\pi x) + c\cos(2\pi x)$ que melhor aproxima os valores dados.

- b) Encontre a função do tipo $f(x) = a + bx + cx^2 + dx^3$ que melhor aproxima os valores dados.

5.3 Aproximando problemas não lineares por problemas lineares

Eventualmente, problemas de ajuste de curvas podem recair em um sistema não linear. Por exemplo, para ajustar função $y = Ae^{bx}$ ao conjunto de pontos (x_1, y_1) , (x_2, y_2) e (x_3, y_3) , temos que minimizar o resíduo²

$$R = (Ae^{x_1 b} - y_1)^2 + (Ae^{x_2 b} - y_2)^2 + (Ae^{x_3 b} - y_3)^2 \quad (5.46)$$

ou seja, resolver o sistema

$$\frac{\partial R}{\partial A} = 2(Ae^{x_1 b} - y_1)e^{x_1 b} + 2(Ae^{x_2 b} - y_2)e^{x_2 b} + 2(Ae^{x_3 b} - y_3)e^{x_3 b} = 0 \quad (5.47)$$

$$\frac{\partial R}{\partial b} = 2Ax_1(Ae^{x_1 b} - y_1)e^{x_1 b} + 2Ax_2(Ae^{x_2 b} - y_2)e^{x_2 b} \quad (5.48)$$

$$+ 2Ax_3(Ae^{x_3 b} - y_3)e^{x_3 b} = 0 \quad (5.49)$$

que é não linear em A e b . Esse sistema pode ser resolvido pelo método de Newton-Raphson, o que pode se tornar custoso, ou mesmo inviável quando não dispomos de uma boa aproximação da solução para inicializar o método.

Felizmente, algumas famílias de curvas admitem uma transformação que nos leva a um problema linear. No caso da curva $y = Ae^{bx}$, observe que $\ln y = \ln A + bx$. Assim, em vez de ajustar a curva original $y = Ae^{bx}$ a tabela de pontos, ajustamos a curva submetida a transformação logarítmica

$$\tilde{y} := a_1 + a_2 \tilde{x} = \ln A + bx. \quad (5.50)$$

Usamos os pontos $(\tilde{x}_j, \tilde{y}_j) := (x_j, \ln y_j)$, $j = 1, 2, 3$ e resolvemos o sistema linear

$$V^T V \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = V^T \begin{bmatrix} \tilde{y}_1 \\ \tilde{y}_2 \\ \tilde{y}_3 \end{bmatrix}, \quad (5.51)$$

onde

$$V = \begin{bmatrix} 1 & x_1 \\ 1 & x_2 \\ 1 & x_3 \end{bmatrix}. \quad (5.52)$$

²A soma do quadrado dos resíduos.

Exemplo 5.3.1. Encontre uma curva da forma $y = Ae^{bx}$ que melhor ajusta os pontos $(1, 2)$, $(2, 3)$ e $(3, 5)$.

Solução. Aplicando o logaritmo natural de ambos os lados da equação $y = Ae^{bx}$, temos

$$\ln y = \ln A + bx. \quad (5.53)$$

Então, denotando $\tilde{y} := \ln y$, $a_1 := \ln A$ e $a_2 := b$, o problema reduz-se a ajustar a reta $\tilde{y} = a_1 + a_2x$ aos pontos $(1, \ln 2)$, $(2, \ln 3)$ e $(3, \ln 5)$. Para tanto, resolvemos o sistema

$$\underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 2 \\ 1 & 3 \end{bmatrix}}_V \underbrace{\begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix}}_a = \underbrace{\begin{bmatrix} \ln 2 \\ \ln 3 \\ \ln 5 \end{bmatrix}}_{\tilde{y}} \quad (5.54)$$

por mínimos quadrados, isto é,

$$V^T V a = V^T \tilde{y} \Rightarrow a = (V^T V)^{-1} V^T \tilde{y}. \quad (5.55)$$

A solução do sistema é, então, $a_1 = 0,217442$ e $a_2 = 0,458145$. Portanto, $A = e^{a_1} = 1,24289$ e $b = a_2 = 0,458145$.

No Scilab, podemos resolver este problema com o seguinte código:

```
x = [1 2 3] '
y = [2 3 5] '
V = [ones(3,1) x]
a = V \ log(y) // a = inv(V' * V) * V' * log(y)
A = exp(a(1))
b = a(2)
```

◇

Observação 5.3.1. Os coeficientes obtidos a partir dessa linearização são aproximados, ou seja, são diferentes daqueles obtidos quando aplicamos mínimos quadrados não linear. Observe que estamos minimizando $\sum_i [\ln y_i - \ln(f(x_i))]^2$ em vez de $\sum_i [y_i - f(x_i)]^2$. No exemplo resolvido, a solução do sistema não linear original seria $A = 1,19789$ e $b = 0,474348$.

Observação 5.3.2. Mesmo quando se deseja resolver o sistema não linear, a solução do problema linearizado pode ser usada para construir condições iniciais para o problema não linear.

A próxima tabela apresenta algumas curvas e transformações que linearizam o problema de ajuste.

Curva	Transformação	Problema Linearizado
$y = ae^{bx}$	$\tilde{y} = \ln y$	$\tilde{y} = \ln a + bx$
$y = ax^b$	$\tilde{y} = \ln y$	$\tilde{y} = \ln a + b \ln x$
$y = ax^b e^{cx}$	$\tilde{y} = \ln y$	$\tilde{y} = \ln a + b \ln x + cx$
$y = ae^{(b+cx)^2}$	$\tilde{y} = \ln y$	$\tilde{y} = \ln a + b^2 + bcx + c^2 x^2$
$y = \frac{a}{b+x}$	$\tilde{y} = \frac{1}{y}$	$\tilde{y} = \frac{b}{a} + \frac{1}{a}x$
$y = A \cos(\omega x + \phi)$	$-x-$	$y = a \cos(\omega x) - b \sin(\omega x)$
ω conhecido		$a = A \cos(\phi), b = A \sin(\phi)$

Exemplo 5.3.2. Encontre a função f da forma $y = f(x) = A \cos(2\pi x + \phi)$ que ajusta a tabela de pontos

x_i	y_i
0,0	9,12
0,1	1,42
0,2	- 7,76
0,3	- 11,13
0,4	- 11,6
0,5	- 6,44
0,6	1,41
0,7	11,01
0,8	14,73
0,9	13,22
1,0	9,93

Solução. Usando o fato que $y = A \cos(2\pi x + \phi) = a \cos(2\pi x) - b \sin(2\pi x)$, onde $a = A \cos(\phi)$ e $b = A \sin(\phi)$, $z = [a \ b]^T$ é solução do problema

$$B^T B z = B^T y, \quad (5.56)$$

onde

$$B = \begin{bmatrix} \cos(2\pi x_0) & -\operatorname{sen}(2\pi x_0) \\ \cos(2\pi x_1) & -\operatorname{sen}(2\pi x_1) \\ \vdots & \\ \cos(2\pi x_{10}) & -\operatorname{sen}(2\pi x_{10}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1. & 0. \\ 0,8090170 & -0,5877853 \\ 0,3090170 & -0,9510565 \\ -0,3090170 & -0,9510565 \\ -0,8090170 & -0,5877853 \\ -1,0000000 & 0,0000000 \\ -0,8090170 & 0,5877853 \\ -0,3090170 & 0,9510565 \\ 0,3090170 & 0,9510565 \\ 0,8090170 & 0,5877853 \\ 1,0000000 & 0,0000000 \end{bmatrix}. \quad (5.57)$$

Assim, $a = 7,9614704$ e $b = 11,405721$ e obtemos o seguinte sistema:

$$\begin{cases} A \cos(\phi) = 7,9614704 \\ A \operatorname{sen}(\phi) = 11,405721 \end{cases}. \quad (5.58)$$

Observe que

$$A^2 = 7,9614704^2 + 11,405721^2 \quad (5.59)$$

e, escolhendo $A > 0$, $A = 13,909546$ e

$$\operatorname{sen}(\phi) = \frac{11,405721}{13,909546} = 0,8199923 \quad (5.60)$$

Assim, como $\cos \phi$ também é positivo, ϕ é um ângulo do primeiro quadrante:

$$\phi = 0,9613976 \quad (5.61)$$

Portanto $f(x) = 13,909546 \cos(2\pi x + 0,9613976)$. Observe que nesse exemplo a solução do problema linear é a mesma do problema não linear. \diamond

Exercícios resolvidos

ER 5.3.1. Encontre a função f da forma $y = f(x) = \frac{a}{b+x}$ que ajusta a seguinte tabela de pontos usando uma das transformações tabeladas.

Prof. M.e Daniel Cassimiro

i	x_i	y_i
1	0,0	101
2	0,2	85
3	0,4	75
4	0,6	66
5	0,8	60
6	1,0	55

Solução. Usando o fato que $Y = \frac{1}{y} = \frac{b}{a} + \frac{1}{a}x$, $z = [\frac{b}{a} \quad \frac{1}{a}]^T$ é solução do problema

$$A^T A z = A^T Y, \quad (5.62)$$

onde

$$A = \begin{bmatrix} 1 & x_1 \\ 1 & x_2 \\ 1 & x_3 \\ 1 & x_4 \\ 1 & x_5 \\ 1 & x_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0,0 \\ 1 & 0,2 \\ 1 & 0,4 \\ 1 & 0,6 \\ 1 & 0,8 \\ 1 & 1,0 \end{bmatrix} \quad (5.63)$$

e

$$Y = \begin{bmatrix} 1/y_1 \\ 1/y_2 \\ 1/y_3 \\ 1/y_4 \\ 1/y_5 \\ 1/y_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,0099010 \\ 0,0117647 \\ 0,0133333 \\ 0,0151515 \\ 0,0166667 \\ 0,0181818 \end{bmatrix} \quad (5.64)$$

Assim, $\frac{1}{a} = 0,0082755$ e $\frac{b}{a} = 0,0100288$ e, então, $a = 120,83924$ e $b = 1,2118696$, ou seja, $f(x) = \frac{120,83924}{1,2118696+x}$. \diamond

Exercícios

Esta seção carece de exercícios. Participe da sua escrita.

Veja como em:

<https://github.com/livroscolaborativos/CalculoNumerico>

Appendix A

Rápida introdução à linguagem Julia

Neste apêndice, abordaremos a linguagem computacional **Julia** que nos auxiliará no processo de obtenção de resultados de operações e computações utilizando o computador.

A.1 Sobre a linguagem Julia

A linguagem de programação Julia é uma linguagem moderna e poderosa que foi criada para atender aos requisitos da computação numérica de alto desempenho e científica. Seus criadores quiseram reunir na linguagem as principais (melhores) características de outras linguagens:

- Ruby;
- matlab;
- R;
- Julia;
- C.

Julia é uma linguagem de programação de alto nível, interpretada e multi-paradigma.

Para mais informações, consulte:

- Página oficial da linguagem Julia: <https://julialang.org/>
- Manual Julia: <https://docs.julialang.org/en/v1/manual/getting-started/>

- GitHub do Professor Daniel: <https://github.com/Daniel-C-Fernandes/Numerico/blob/main/Mini-curso-Julia.ipynb>
- Julia for Data science: <https://juliadatascience.io/pt/>
- Julia Academy: <https://juliaacademy.com/>
- GitHub Julia: <https://github.com/JuliaLang/julia>
- Introdução: <https://julia.vento.eng.br/>
- Curso Julia USP: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/7879038/mod_resource/content/4/Tutorial%20para%20a%20Linguagem%20Julia.pdf
- Tutoriais Julia: <https://julialang.org/learning/tutorials/>

Para saber mais: <https://www.youtube.com/watch?v=Xzdg9cz0xD8&t=29s>

A.1.1 Características Principais

- **Tipagem Dinâmica:** Suas variáveis podem receber qualquer tipo de dado, e sua sintaxe se aproxima mais da linguagem humana do que da linguagem de máquina.
- **Multiparadigma:** Suporta diversos paradigmas de programação, como orientação a objetos e programação funcional.
- **Alto Nível:** Possui uma sintaxe expressiva e amigável.
- **Gratuita e Open Source:** Julia é distribuída sob a licença MIT.
- **Suporte a Unicode e UTF-8:** Permite o uso de símbolos matemáticos durante a escrita de programas. Gerenciador de Pacotes Prático: Facilita a instalação e atualização de pacotes.

Aplicações:

- **Data Science:** Julia é usada para análise de dados e descoberta de conhecimento a partir de grandes conjuntos de dados. Machine Learning: Possui pacotes poderosos para criação de modelos de aprendizado de máquina.
- **Computação Científica:** Ideal para construir modelos matemáticos e soluções numéricas.

- **Desenvolvimento Geral:** Pode ser aplicada no desenvolvimento de aplicações web, desktop e outras áreas. Em resumo, Julia é uma linguagem versátil que combina alta performance com uma sintaxe amigável, tornando-a uma escolha popular entre cientistas de dados, desenvolvedores e entusiastas da programação.

Visão geral sobre linguagens de programação: Qual a melhor linguagem de programação? Veja <https://www.youtube.com/watch?v=DjUB-yVWT2A>.

Para iniciantes, recomendamos o curso EAD gratuito no site [Goggo dot jl](https://www.youtube.com/watch?v=0oChN11wf_4):

https://www.youtube.com/watch?v=0oChN11wf_4

A.1.2 Instalação e execução

Para versões Linux Ubuntu ou Debian, basta utilizar o comando a seguir e esperar a instalação:

```
1 > sudo apt install julia -y
```

Para versões Windows, utilize o Prompt de comando PowerShell para inserir o comando de instalação a seguir:

```
1 > winget install julia -s msstore
```

Execute o modo interativo da linguagem Julia simplesmente digitando o nome da linguagem seguida de Enter:

```
1 > julia
```

Dessa forma, abre-se o interpretador interativo da linguagem Julia. Pode-se então, como primeira interação, realizar uma operação matemática:

```
1 julia> 2 + 3
2 5
```

No [site oficial da linguagem Julia](#) estão disponíveis para *download* os interpretadores para os principais sistemas operacionais, Linux, Mac OS e Windows.

Além disso, no [GitHub do professor Daniel](#), há um tutorial de instalação para a versão Windows do interpretador de linguagem Julia juntamente com o ambiente Jupyter Notebook e uma [introdução à linguagem de programação com exemplos](#).

A.1.3 Usando Julia

O uso da linguagem Julia pode ser feito de três formas básicas:

- usando um **console Julia** de modo interativo;

- executando um código `codigo.jl` no console **Julia**;
- executando um código **Julia** `codigo.jl` diretamente no terminal;

Execução no terminal de um código salvo em `.jl`

Para se executar um código diretamente no terminal de comando do sistema operacional, basta escrevermos o código que desejamos em um arquivo texto de extensão `.jl`.

Dessa forma, por exemplo, salvaremos o seguinte código num arquivo chamado `ola.jl`:

```
1 println("Hello world!!")
```

Após o salvamento, estando o prompt de comando no mesmo diretório do arquivo salvo, basta executarmos o seguinte comando, obtendo-se a resposta que se segue:

```
1 > julia ola.jl
2 Hello world!!
```

Utilização do Console interativo **Julia**

Para executarmos qualquer comando no console interativo da linguagem **Julia**, iniciaremos o console interativo da seguinte forma:

```
1 > julia
```

Estando o modo interativo rodando no prompt de comando, basta inserirmos o comando desejado e verificar o resultado da saída do comando registrado na linha seguinte do prompt:

```
1 julia> println("Hello world!!")
2 Hello world!!
```

Execução no console de um código salvo em `.jl`

Para executarmos qualquer um código salvo com extensão `.jl` no console interativo da linguagem **Julia**, iniciaremos o console interativo da seguinte forma:

```
1 > julia
```

Estando o modo interativo rodando no prompt de comando, basta inserirmos o seguinte comando e verificar o resultado da saída do arquivo registrado na linha seguinte do prompt (observe que o arquivo deve estar localizado em ...):

```
1 julia> include ola.jl
2 Hello world!!
```

A.2 Elementos da linguagem

Julia é uma linguagem de alto nível de tipagem dinâmica, ou seja, uma variável é criada quando um valor é atribuído a ela, não sendo necessário especificar explicitamente cada tipo de variável, Julia vai inferir o tipo de cada variável por você. Porém, também é possível especificar a declaração da variável a ser criada, se for desejável.

A.2.1 Variáveis

Variáveis são valores armazenados pelo computador atrelados a um nome específico, para seja possível recuperar ou alterar seu valor posteriormente.

Alguns tipos de variáveis em Julia:

- Números inteiros: Int64
- Números reais: Float64
- Matrizes inteiras: Matrix{Int64}
- Matrizes reais: Matrix{Float64}
- Booleanas: Bool
- Strings: String

Por padrão, números são armazenados usando 64 bits, sendo possível aumentar ou reduzir a precisão, utilizando os tipos Int8 ou Int128, por exemplo.

Criamos novas variáveis escrevendo o nome da variável à esquerda e seu valor à direita, e no meio usamos o operador de atribuição `=`.

Vejamos alguns exemplos:

```
1 julia> x = 1
2 1
3 julia> y = x * 2.0
4 2.0
```

variáveis com emoji

a variável `x` recebe o valor `int` 1 e, logo após, na segunda linha de comando, a variável `y` recebe o valor `double` 2. Observamos que o símbolo `=` significa o operador de atribuição não o de igualdade. O operador lógico de igualdade no Julia é `==`. Veja os seguintes comandos:

```
1 julia> print(x, "-", y)
2 1-2.0
3
4 julia> typeof(x), typeof(y)
5 (Int64, Float64)
```

Comentários e continuação de linha de comando são usados como no seguinte exemplo:

```
1 julia> # Isto é um comentário
2
3 julia> x = 1
4 1
5
6 julia> print(x)
7 1
```

Utilizando Julia como calculadora....

A.3 Repositórios

Tartaruga

A.4 Estruturas de ramificação e repetição

A linguagem Julia contém estruturas de repetição e ramificação padrões de linguagens estruturadas.

A.4.1 A instrução de ramificação “if”

A instrução “if” permite executar um pedaço do código somente se uma dada condição for satisfeita.

Exemplo A.4.1. Veja o seguinte código Julia:

```
1 #!/usr/bin/env Julia
2 # -*- coding: utf-8 -*-
```



```
3
4 i = 2
5 if (i == 1):
6     print("Olá!")
7 elif (i == 2):
8     print("Hallo!")
9 elif (i == 3):
10    print("Hello!")
11 else:
12    print("Ça Va!")
```

Qual é a saída apresentada pelo código? Por quê?

Observamos que, em Julia, a indentação é obrigatória, pois é ela que defini o escopo da instrução.

A.4.2 A instrução de repetição “for”

A instrução for permite que um pedaço de código seja executado repetidamente.

Exemplo A.4.2. Veja o seguinte código:

```
1 for i in range(6):
2     print(i)
```

Qual é a saída deste código? Por quê?

Exemplo A.4.3. Veja o seguinte código:

```
1 import numpy as np
2 for i in np.arange(1,8,2):
3     print(i)
```

Qual é a saída deste código? Por quê?

Exemplo A.4.4. Veja o seguinte código:

```
1 for i in np.arange(10,0,-3):
2     print(i)
```

O que é mostrado no console do Julia?

Exemplo A.4.5. Veja o seguinte código:

```
1 import numpy as np
2 for i in np.arange(10,1,-3):
3     print(i)
```

O que é mostrado no console do Julia?

A.4.3 A instrução de repetição “while”

A instrução `while` permite que um pedaço de código seja executado repetidamente até que uma dada condição seja satisfeita.

Exemplo A.4.6. Veja o seguinte código Julia:

```
1 s = 0
2 i = 1
3 while (i <= 10):
4     s = s + i
5     i = i + 1
```

Qual é o valor de `s` ao final da execução? Por quê?

A.5 Funções

Além das muitas funções disponíveis em `Julia` (e os tantos muitos pacotes livres disponíveis), podemos definir nossas próprias funções. Para tanto, existe a instrução `def`. Veja os seguintes exemplos:

Exemplo A.5.1. O seguinte código:

```
1 def f(x):
2     return x + np.sin(x)
```

define a função $f(x) = x + \sin x$.

Observe que $f(\pi) = \pi$. Confirme isso computando:

```
1 >>> f(np.pi)
```

Exemplo A.5.2. O seguinte código em Julia:

```
1 def h(x,y):
2     if (x < y):
3         return y - x
4     else:
5         return x - y
```

define a função:

$$h(x,y) = \begin{cases} y - x & , x < y \\ x - y & , x \geq y \end{cases} \quad (\text{A.1})$$

Exemplo A.5.3. O seguinte código:

```

1 def J(x):
2     y = np.zeros((2,2))
3     y[0,0] = 2*x[0]
4     y[0,1] = 2*x[1]
5
6     y[1,0] = -x[1]*np.sin(x[0]*x[1])
7     y[1,1] = -x[0]*np.sin(x[0]*x[1])
8
9     return y

```

define a matriz jacobiana $J(x_1, x_2) := \frac{(f_1, f_2)}{(x_1, x_2)}$ da função:

$$f(x_1, x_2) = (x_1^2 + x_2^2, \cos(x_1 x_2)). \quad (\text{A.2})$$

A.5.1 Operações matemáticas elementares

Em Julia, os operadores matemáticos elementares são os seguintes:

```

1 + # adição
2 - # subtração
3 * # multiplicação
4 / # divisão de a por b
5 \ # divisão de b por a
6 % # Resto da divisão euclidiana
7 ÷ # Quociente inteiro da divisão euclidiana (alt + 246)
8 (ou \div + tab)
9 ^ #potenciação
10 // # Frações
11 exp() #potenciação de base e
12 Log() #Logarítimo Neperiano
13 Log10() #Logarítimo de base 10

```

A.5.2 Funções e constantes elementares

Várias funções e constantes elementares estão disponíveis no pacote módulo Julia `math`. Por exemplo:

```

1 julia> π = pi (\pi + tab)
2 π = 3.1415926535897...
3
4 julia> cos(π)
5 -1.0
6

```

```

7 julia> exp(1)
8 2.718281828459045
9
10 julia> log(exp(1))
11 1.0

```

Observamos que `log` é a função logaritmo natural, isto é, $f(x) = \ln(x)$, enquanto que a implementação Julia de $f(x) = \log(x)$ é:

```

1 julia> log10(10)
2 1.0

```

Veja mais na documentação [Julia](#).

A.5.3 Operadores lógicos

Em Julia, o valor lógico verdadeiro é escrito como `True` e o valor lógico falso como `False`. Temos os seguintes operadores lógicos disponíveis:

```

1 && # e lógico
2 || # ou lógico
3 ! # negação
4 == # igualdade
5 != # diferente
6 < # menor que
7 > # maior que
8 <= # menor ou igual que
9 >= # maior ou igual que

```

Veja mais em <https://acervolima.com/operadores-em-julia/>.

A.6 Matrizes

Em Julia, temos um ótimo suporte para computação científica com o pacote [numpy](#). Uma matriz $A = [a_{i,j}]_{i,j=1}^{m,n}$ em Julia é definida usando-se a seguinte sintaxe:

```

1 julia> A = [
2     a11 a12 ... a1n,
3     a21 a22 ... a2n,
4     ⋮
5     am1 am2 ... amn
6 ]

```

Exemplo A.6.1. Defina a matriz:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \end{bmatrix} \quad (\text{A.3})$$

Solução. Em Julia, digitamos:

```
1 julia> A = [1 2 3,
2           4 5 6]
3
4 julia> print(A)
5 2×3 Matrix{Int64}:
6 1 2 3
7 4 5 6
```

◇

A seguinte lista contém uma série de funções que geram matrizes particulares:

```
1 eye # matriz identidade
2 linspace # vetor de elementos linearmente espaçados
3 ones # matriz cheia de uns
4 zeros # matriz nula
```

A.6.1 Obtendo dados de uma matriz

A função `numpy.shape` retorna o tamanho de uma matriz, por exemplo:

```
1 >>> A = np.ones((3,2))
2 >>> print(A)
3 [[ 1.  1.]
4  [ 1.  1.]
5  [ 1.  1.]]
6 >>> n1, nc = np.shape(A)
7 >>> print(n1,nc)
8 (3, 2)
```

informando que a matriz **A** tem três linhas e duas colunas.

Existem vários métodos para acessar os elementos de uma matriz dada **A**:

- a matriz inteira acessa-se com a sintaxe:

```
1 A
```

- o elemento da i -ésima linha e j -ésima coluna acessa-se usando a sintaxe:

```
1 A[i,j]
```

- o bloco formado pelas linhas i_1, i_2 e pelas colunas j_1, j_2 obtém-se usando a sintaxe:

```
1 A[i1:i2, j1:j2]
```

Exemplo A.6.2. Veja as seguintes linhas de comando:

```
1 >>> from numpy import random
2 >>> A = np.random.random((3,4))
3 >>> A
4 array([[ 0.39235668, 0.30287204, 0.24379253, 0.98866709],
5         [ 0.72049734, 0.99300252, 0.14232844, 0.25604346],
6         [ 0.61553036, 0.80615392, 0.22418474, 0.13685148]])
7 >>> A[2,3]
8 0.13685147547025989
9 >>> A[1:3,1:4]
10 array([[ 0.99300252, 0.14232844, 0.25604346],
11         [ 0.80615392, 0.22418474, 0.13685148]])
```

Definida uma matriz A em Julia, as seguintes sintaxes são bastante úteis:

```
1 A[:, :] toda a matriz
2 A[i:j,k] os elementos das linhas i até j (exclusive) da k-ésima coluna
3 A[i,j:k] os elementos da i-ésima linha das colunas j até k (exclusive)
4 A[i,:] a i-ésima linha da matriz
5 A[:,j] a j-ésima coluna da matriz
```

Atenção, os índices em Julia iniciam-se em 0. Assim, o comando `A[1:3,1:4]` retorna o bloco da matriz A compreendido da segunda à terceira linha e da segunda a quarta coluna desta matriz.

Exemplo A.6.3. Veja as seguintes linhas de comando:

```
1 >>> B = np.random.random((4,4))
2 >>> B
3 array([[ 0.94313432, 0.72650883, 0.55487089, 0.18753526],
4         [ 0.02094937, 0.45726099, 0.51925464, 0.8535878 ],
5         [ 0.75948469, 0.95362926, 0.77942318, 0.06464183],
6         [ 0.91243198, 0.22775889, 0.04061536, 0.14908227]])
7 >>> aux = np.copy(B[:,2])
8 >>> B[:,2] = np.copy(B[:,3])
```

```

9 >>> B[:,3] = np.copy(aux)
10 >>> B
11 array([[ 0.94313432,  0.72650883,  0.18753526,  0.55487089],
12        [ 0.02094937,  0.45726099,  0.8535878 ,  0.51925464],
13        [ 0.75948469,  0.95362926,  0.06464183,  0.77942318],
14        [ 0.91243198,  0.22775889,  0.14908227,  0.04061536]])

```

A.6.2 Operações matriciais e elemento-a-elemento

Em Julia com numpy, o operador `*` opera elemento a elemento. Por exemplo:

```

1 >>> A = np.array([[1,2],[2,1]]); print(A)
2 [[1 2]
3  [2 1]]
4 >>> B = np.array([[2,1],[2,1]]); print(B)
5 [[2 1]
6  [2 1]]
7 >>> print(A*B)
8 [[2 2]
9  [4 1]]

```

A multiplicação matricial obtemos com:

```

1 >>> C = A.dot(B)
2 >>> print(C)
3 [[6 3]
4  [6 3]]

```

Aqui, temos as sintaxes análogas entre operações elemento-a-elemento:

```

1 + # adição
2 - # subtração
3 * # multiplicação
4 / # divisão
5 ^ # potenciação

```

Exemplo A.6.4. Veja as seguintes linhas de comando:

```

1 >>> A = np.ones((2,2))
2 >>> A
3 array([[ 1.,  1.],
4        [ 1.,  1.]])
5 >>> B = 2 * np.ones((2,2))
6 >>> B

```

```
7 array([[ 2.,  2.],
8        [ 2.,  2.]])
9 >>> A*B
10 array([[ 2.,  2.],
11         [ 2.,  2.]])
12 >>> A.dot(B)
13 array([[ 4.,  4.],
14        [ 4.,  4.]])
15 >>> A/B
16 array([[ 0.5,  0.5],
17        [ 0.5,  0.5]])
```

A.7 Gráficos

Para criar um esboço do gráfico de uma função de uma variável real $y = f(x)$, podemos usar a biblioteca Julia [matplotlib](#). A função `matplotlib.pyplot.plot` faz uma representação gráfica de um conjunto de pontos $\{(x_i, y_i)\}$ fornecidos. Existe uma série de opções para esta função de forma que o usuário pode ajustar várias questões de visualização. Veja a [documentação](#).

Exemplo A.7.1. Veja as seguintes linhas de código:

```
1 >>> import numpy as np
2 >>> import matplotlib.pyplot as plt
3 >>> def f(x): return x**3 + 1
4 ...
5 >>> x = np.linspace(-2,2)
6 >>> plt.plot(x, f(x))
7 [<matplotlib.lines.Line2D object at 0x7f4f6d153510>]
8 >>> plt.grid()
9 >>> plt.show()
```


Resposta dos Exercícios

Recomendamos ao leitor o uso criterioso das respostas aqui apresentadas. Devido a ainda muito constante atualização do livro, as respostas podem conter imprecisões e erros.

E 2.1.1.1. a) 4; b) 9; c) b^2 ; d) 7; e) 170; f) 7,125; g) 3,28

E 2.1.1.2. a) 21,172; b) 5,5; c) 303,25; d) $4\bar{6}$.

E 2.1.1.3. $(101,1)_2$.

E 2.1.1.4. $(11,1C)_{16}$.

E 2.1.1.5. a) $(12,3\bar{1})_5$; b) $(45,1)_6$.

E 2.1.1.6. 10,5; $(1010,1)_2$.

E 2.1.1.7. a) $(100101,001)_2$; b) $(11,4)_{16}$; c) $(11,5)_8$; d) $(9,4)_{16}$.

E 2.1.1.8. 50; 18.

E 2.2.1.

$$\begin{array}{ll} a) 2,99792458 \times 10^5 & b) 6,62607 \times 10^{-34} \\ c) 6,674 \times 10^{-8} & d) 9,80665 \times 10^4 \end{array} \quad (2.32)$$

E 2.2.2. No GNU Octave, temos:

```
>> printf("%1.7e\n", 299792.458)
2.9979458e+04
>> printf("%1.5e\n", 66.2607)
6.62607e+01
>> printf("%1.3e\n", 0.6674)
6.674e-01
>> printf("%1.5e\n", 9806.65e1)
9.80665e+04
```

E 2.3.1. (a) 1,1; (b) 7,3; (c) $-5,9$.

E 2.3.2. (a) 1,2; (b) 1,2; (c) 2,4; (d) $-2,4$.

E 2.3.3.

Este exercício está sem resposta sugerida. Proponha uma resposta. Veja como em:
<https://github.com/livroscolaborativos/CalculoNumerico>

E 2.4.1. a) $2^6 + 2^5 + 2^1 = 98$; b) $2^4 + 2^3 + 2^2 + 2^0 = 29$; c) -2^7 ; d) $-2^7 + 2^6 + 2^5 + 2^1 + 2^0 = -29$; e) $-2^7 + 2^6 + 2^5 + 2^4 + 2^3 + 2^2 + 2^1 + 2^0 = -1$. Observe que o dígito mais significativo (mais à esquerda) tem peso negativo.

E 2.4.2. a) 25186; b) 7453; c) -7453 ; d) -1 .

E 2.4.3. a) 70; b) -72 ; c) 72.

E 2.4.4. a) 17990; b) -18248 ; c) 18248.

E 2.4.5. a) 3,75; b) $-5,75$.

E 2.4.7. a) 3,75; b) $-5,75$.

E 2.4.8. Devido à precisão finita do sistema de numeração, o laço para quando x for suficientemente grande em comparação a 1 a ponto de $x+1$ ser aproximado para 1. Isso acontece quando 1 é da ordem do épsilon de máquina em relação a x , isto é, quando $x \approx 2/\%eps$. O tempo de execução fica em torno de 28 anos.

E 2.5.1. a) $\varepsilon_{abs} = 5,9 \times 10^{-4}$, $\varepsilon_{rel} = 1,9 \times 10^{-2}\%$; b) $\varepsilon_{abs} = \times 10^{-5}$, $\varepsilon_{rel} = \times 10^{-3}\%$; c) $\varepsilon_{abs} = 1$, $\varepsilon_{rel} = 10^{-5}\%$.

E 2.5.2. a) 1,7889; b) 1788,9; c) 0,0017889; d) 0,0045966; e) $2,1755 \times 10^{-10}$; f) $2,1755 \times 10^{10}$.

E 2.5.3. a) 3270, 3280; b) 42,5, 42,6; c) 0,0000333, 0,0000333.

E 2.5.4. a) 2; b) 2.

E 2.5.5.

$$0,1x - 0,01 = 12 \quad (2.84)$$

$$0,1x = 12 + 0,01 = 12,01 \quad (2.85)$$

$$x = 120,1 \quad (2.86)$$

A resposta exata é 120,1.

E 2.5.6. a) $\delta_{abs} = 3,46 \times 10^{-7}$, $\delta_{rel} = 1,10 \times 10^{-7}$; b) $\delta_{abs} = 1,43 \times 10^{-4}$, $\delta_{rel} = 1,00 \times 10^{-3}$.

E 2.8.1. 2%, deve-se melhorar a medida na variável x , pois, por mais que o erro relativo seja maior para esta variável, a propagação de erros através desta variáveis é muito menos importante do que para a outra variável.

E 2.8.2. 3,2% pela aproximação ou 3,4% pelo segundo método, isto é, $(0,96758 \leq I \leq 1,0342)$.

E 2.9.1. Quando μ é pequeno, $e^{1/\mu}$ é um número grande. A primeira expressão produz um "overflow" (número maior que o máximo representável) quando μ é pequeno. A segunda expressão, no entanto, reproduz o limite 1 quando $\mu \rightarrow 0+$.

E 2.9.2. a) $\frac{1}{2} + \frac{x^2}{4!} + O(x^4)$; b) $x/2 + O(x^2)$; c) $5 \cdot 10^{-4}x + O(x^2)$; d) $\frac{\sqrt{2}}{4}y + O(y^2) = \frac{\sqrt{2}}{4}x + O(x^2)$

E 2.9.3. A expressão da direita se comporta melhor devido à retirada do cancelamento catastrófico em x em torno de 0.

E 2.9.4. Possíveis soluções são:

$$\sqrt{e^{2x} + 1} - e^x = \sqrt{e^{2x} + 1} - e^x \cdot \frac{\sqrt{e^{2x} + 1} + e^x}{\sqrt{e^{2x} + 1} + e^x} \quad (2.212)$$

$$= \frac{e^{2x} + 1 - e^{2x}}{\sqrt{e^{2x} + 1} + e^x} = \frac{1}{\sqrt{e^{2x} + 1} + e^x} \quad (2.213)$$

e, de forma análoga:

$$\sqrt{e^{2x} + x^2} - e^x = \frac{x^2}{\sqrt{e^{2x} + x^2} + e^x}. \quad (2.214)$$

E 2.9.5. $4,12451228 \times 10^{-16}$ J; 0,002%; $0,26654956 \times 10^{-14}$ J; 0,002%; $4,98497440 \times 10^{-13}$ J; 0,057%; $1,74927914 \times 10^{-12}$ J; 0,522%.

E 3.1.1.

Observamos que a equação é equivalente a $\cos(x) - x = 0$. Tomando, então, $f(x) = \cos(x) - x$, temos que $f(x)$ é contínua em $[0, \pi/2]$, $f(0) = 1$ e $f(\pi/2) = -\pi/2 < 0$. Logo, do teorema de Bolzano 4.1.1, concluímos que a equação dada tem pelo menos uma solução no intervalo $(0, \pi/2)$.

E 3.1.2.

No Exercício 4.1.1, mostramos que a função $f(x) = \cos(x) - x$ tem um zero no intervalo $[0, \pi/2]$. Agora, observamos que $f'(x) = -\sin(x) - 1$. Como $0 < \sin(x) < 1$ para todo $x \in (0, \pi/2)$, temos que $f'(x) < 0$ em $(0, \pi/2)$, isto é, $f(x)$ é monotonicamente decrescente neste intervalo. Logo, da Proposição 4.1.1, temos que existe um único zero da função neste intervalo.

E 3.1.3.

$k \approx 0,161228$

E 3.1.5.

Escolhendo o intervalo $[a, b] = [-1,841 - 10^{-3}, -1,841 + 10^{-3}]$, temos $f(a) \approx 5 \times 10^{-4} > 0$ e $f(b) \approx -1,2 \times 10^{-3} < 0$, isto é, $f(a) \cdot f(b) < 0$. Então, o teorema de Bolzano nos garante que o zero exato x^* de $f(x)$ está no intervalo (a, b) . Logo, da escolha feita, $|-1,841 - x^*| < 10^{-3}$.

E 3.1.6. Basta aplicar as ideias da solução do Exercício 4.1.5.

E 3.2.1. 0,6875

E 3.2.2. Intervalo (0,4, 0,5), zero 0,45931. Intervalo (1,7, 1,8), zero 1,7036. Intervalo (2,5, 2,6), zero 2,5582.

E 3.2.3. a) $x_1 = 1$. b) Dica: como $x_2 = 2$ é raiz dupla, tem-se que $p'(x_2) = 0$.

E 3.2.5. 1,390054; 1,8913954; 2,4895673; 3,1641544; 3,8965468

E 3.2.6. $k\theta = \frac{LP}{2} \cos(\theta)$ com $\theta \in (0, \pi/2)$; 1,030.

E 3.2.7. 19; 23; 26; 0,567143; 1,745528; 3,385630

E 3.2.8. a) 0,623; b) 0,559; c) 0,500; d) 0,300; e) -0,3; f) -30; g) -30

E 3.2.9. a) 0,0294; b) $2,44e - 3$; c) $2,50e - 4$; d) $1,09 \cdot 10^{-7}$; e) -10^{-12} ; f) -10^{-12} ; g) -10^{-12}

E 3.3.1. $-1,8414057$

E 3.3.2.

$0,7391$

E 3.3.3.

Tomemos $x^{(1)} = 1$ como aproximação inicial para a solução deste problema, iterando a primeira sequência a), obtemos:

$$x^{(1)} = 1 \quad (3.79)$$

$$x^{(2)} = \ln\left(\frac{10}{1}\right) = 2,3025851 \quad (3.80)$$

$$x^{(3)} = \ln\left(\frac{10}{2,3025851}\right) = 1,4685526 \quad (3.81)$$

\vdots

$$x^{(21)} = 1,7455151 \quad (3.82)$$

$$x^{(31)} = 1,745528 \quad (3.83)$$

$$x^{(32)} = 1,745528 \quad (3.84)$$

$$x^{(32)} = 1,745528 \quad (3.85)$$

Iterando a segunda sequência b), obtemos:

$$x^{(1)} = 1 \quad (3.86)$$

$$x^{(2)} = 10e^{-1} = 3,6787944 \quad (3.87)$$

$$x^{(3)} = 10e^{-3,6787944} = 0,2525340 \quad (3.88)$$

$$x^{(4)} = 10e^{-0,2525340} = 7,7682979 \quad (3.89)$$

$$x^{(5)} = 10e^{-7,7682979} = 0,0042293 \quad (3.90)$$

$$x^{(6)} = 10e^{-0,0042293} = 9,9577961 \quad (3.91)$$

Este experimento numérico sugere que a iteração a) converge para 1,745528 e a iteração b) não é convergente.

E 3.3.7. $x_1 \approx 1,4506619$, $x_2 \approx 4,8574864$, $x_3 = 7,7430681$.

E 3.3.10.

0.0431266

E 3.4.1. raiz:0,82413, processo iterativo: $x^{(n+1)} = x^{(n)} + \frac{\cos(x) - x^2}{\sin(x) + 2x}$

```
>> x=1
>> x=x+(cos(x)-x^2)/(sin(x)+2*x)
>> x=x+(cos(x)-x^2)/(sin(x)+2*x)
>> x=x+(cos(x)-x^2)/(sin(x)+2*x)
>> x=x+(cos(x)-x^2)/(sin(x)+2*x)
```

E 3.4.3. $0,65291864$

E 3.4.4. $0,0198679$; $0,533890$; $0,735412$; $1,13237$ e $1,38851$.

E 3.4.6. -99.99970 , -0.3376513 ; -1.314006 .

E 3.4.9.

$x_0 > 1$.

E 3.4.10.

$$x^{(0)} = \text{C.I.} \quad (3.147)$$

$$x^{(n+1)} = x^{(n)} \left(2 - Ax^{(n)} \right) \quad (3.148)$$

$$(3.149)$$

E 3.4.11.

$$x_0 = \text{C.I.} \quad (3.150)$$

$$x^{(n+1)} = x^{(n)} \left(1 - \frac{1}{n} \right) + \frac{A}{nx^{(n)}} \quad (3.151)$$

E 3.4.12.

$$x_0 = \text{C.I.} \quad (3.152)$$

$$x^{(n+1)} = x^{(n)} + \frac{x^{(n)} - Ax^{(n)}}{2} = \frac{(3-A)x^{(n)}}{2} \quad (3.153)$$

$$(3.154)$$

E 3.6.5. Seja $f(x) \in C^2$ um função tal que $f(x^*) = 0$ e $f'(x^*) \neq 0$. Considere o processo iterativo do método das secantes:

$$x^{(n+1)} = x^{(n)} - \frac{f(x^{(n)})}{f(x^{(n)}) - f(x^{(n-1)})} (x^{(n)} - x^{(n-1)}) \quad (3.202)$$

Esta expressão pode ser escrita como:

$$x^{(n+1)} = x^{(n)} - \frac{f(x^{(n)})(x^{(n)} - x^{(n-1)})}{f(x^{(n)}) - f(x^{(n-1)})} \quad (3.203)$$

$$(3.204)$$

$$= \frac{x^{(n)} \left(f(x^{(n)}) - f(x^{(n-1)}) \right) - f(x^{(n)})(x^{(n)} - x^{(n-1)})}{f(x^{(n)}) - f(x^{(n-1)})} \quad (3.205)$$

$$= \frac{x^{(n)} f(x^{(n-1)}) - x^{(n-1)} f(x^{(n)})}{f(x^{(n)}) - f(x^{(n-1)})} \quad (3.206)$$

Subtraindo x^* de ambos os lados temos:

$$x^{(n+1)} - x^* = \frac{x^{(n)} f(x^{(n-1)}) - x^{(n-1)} f(x^{(n)})}{f(x^{(n)}) - f(x^{(n-1)})} - x^* \quad (3.207)$$

$$= \frac{x^{(n)} f(x^{(n-1)}) - x^{(n-1)} f(x^{(n)}) - x^* \left(f(x^{(n)}) - f(x^{(n-1)}) \right)}{f(x^{(n)}) - f(x^{(n-1)})} \quad (3.208)$$

$$= \frac{(x^{(n)} - x^*) f(x^{(n-1)}) - (x^{(n-1)} - x^*) f(x^{(n)})}{f(x^{(n)}) - f(x^{(n-1)})} \quad (3.209)$$

Definimos $\epsilon_n = x_n - x^*$, equivalente a $x_n = x^* + \epsilon_n$

$$\epsilon_{n+1} = \frac{\epsilon_n f(x^* + \epsilon_{n-1}) - \epsilon_{n-1} f(x^* + \epsilon_n)}{f(x^* + \epsilon_n) - f(x^* + \epsilon_{n-1})} \quad (3.210)$$

Aproximamos a função $f(x)$ no numerador por

$$f(x^* + \epsilon) \approx f(x^*) + \epsilon f'(x^*) + \epsilon^2 \frac{f''(x^*)}{2} \quad (3.211)$$

$$f(x^* + \epsilon) \approx \epsilon f'(x^*) + \epsilon^2 \frac{f''(x^*)}{2} \quad (3.212)$$

Prof. M.e Daniel Cassimiro

$$\epsilon_{n+1} \approx \frac{\epsilon_n \left[\epsilon_{n-1} f'(x^*) + \epsilon_{n-1}^2 \frac{f''(x^*)}{2} \right] - \epsilon_{n-1} \left[\epsilon_n f'(x^*) + \epsilon_n^2 \frac{f''(x^*)}{2} \right]}{f(x^* + \epsilon_n) - f(x^* + \epsilon_{n-1})} \quad (3.213)$$

$$= \frac{\frac{f''(x^*)}{2} (\epsilon_n \epsilon_{n-1}^2 - \epsilon_{n-1} \epsilon_n^2)}{f(x^* + \epsilon_n) - f(x^* + \epsilon_{n-1})} \quad (3.214)$$

$$= \frac{1}{2} f''(x^*) \frac{\epsilon_n \epsilon_{n-1} (\epsilon_{n-1} - \epsilon_n)}{f(x^* + \epsilon_n) - f(x^* + \epsilon_{n-1})} \quad (3.215)$$

Observamos, agora, que

$$\begin{aligned} f(x^* + \epsilon_n) - f(x^* + \epsilon_{n-1}) &\approx \left[f(x^*) + f'(x^*) \epsilon_n \right] - \left[f(x^*) + f'(x^*) \epsilon_{n-1} \right] \\ &= f'(x^*) (\epsilon_n - \epsilon_{n-1}) \end{aligned} \quad (3.216)$$

Portanto:

$$\epsilon_{n+1} \approx \frac{1}{2} \frac{f''(x^*)}{f'(x^*)} \epsilon_n \epsilon_{n-1} \quad (3.217)$$

ou, equivalentemente:

$$x^{(n+1)} - x^* \approx \frac{1}{2} \frac{f''(x^*)}{f'(x^*)} (x^{(n)} - x^*) (x^{(n-1)} - x^*) \quad (3.218)$$

E 3.7.2.

$x > a$ com $a \approx 0,4193648$.

E 3.7.3.

$z_1 \approx 0.3252768$, $z_2 \approx 1.5153738$, $z_3 \approx 2.497846$, $z_4 \approx 3.5002901$, $z_j \approx j - 1/2 - (-1)^j \frac{e^{-2j+1}}{\pi}$, $j > 4$

E 3.7.4.

150 W, 133 W, 87 W, 55 W, 6,5 W

E 3.7.5.

a) 42 s e 8 min 2 s, b) 14 min 56 s.

E 3.7.6.

118940992

E 3.7.7.

7,7 cm

E 3.7.8.

4,32 cm

E 3.7.9.

(0,652919, 0,426303)

E 3.7.10.

7,19% ao mês

E 3.7.11.

4,54% ao mês.

E 3.7.12.

500 K, 700 K em $t = 3 \ln(2)$, 26 min, 4 h 27 min.

E 3.7.13.

$(\pm 1,1101388, -0,7675919)$, $(\pm 1,5602111, 0,342585)$

E 3.7.14.

1,5318075

E 3.7.15.

Aproximadamente 2500 reais por hora.

E 3.7.16.

a) 332,74 K b) 359,33 K

E 3.7.17.

1,2285751, 4,76770758, 7,88704085

E 4.1.1.

Observamos que a equação é equivalente a $\cos(x) - x = 0$. Tomando, então, $f(x) = \cos(x) - x$, temos que $f(x)$ é contínua em $[0, \pi/2]$, $f(0) = 1$ e $f(\pi/2) = -\pi/2 < 0$. Logo, do teorema de Bolzano 4.1.1, concluímos que a equação dada tem pelo menos uma solução no intervalo $(0, \pi/2)$.

E 4.1.2.

No Exercício 4.1.1, mostramos que a função $f(x) = \cos(x) - x$ tem um zero no intervalo $[0, \pi/2]$. Agora, observamos que $f'(x) = -\sin(x) - 1$. Como $0 < \sin x < 1$ para todo $x \in (0, \pi/2)$, temos que $f'(x) < 0$ em $(0, \pi/2)$, isto é, $f(x)$ é monotonicamente decrescente neste intervalo. Logo, da Proposição 4.1.1, temos que existe um único zero da função neste intervalo.

E 4.1.3. $k \approx 0,161228$ **E 4.1.5.**

Escolhendo o intervalo $[a, b] = [-1,841 - 10^{-3}, -1,841 + 10^{-3}]$, temos $f(a) \approx 5 \times 10^{-4} > 0$ e $f(b) \approx -1,2 \times 10^{-3} < 0$, isto é, $f(a) \cdot f(b) < 0$. Então, o teorema de Bolzano nos garante que o zero exato x^* de $f(x)$ está no intervalo (a, b) . Logo, da escolha feita, $|-1,841 - x^*| < 10^{-3}$.

E 4.1.6. Basta aplicar as ideias da solução do Exercício 4.1.5.**E 4.2.1.** 0,6875**E 4.2.2.** Intervalo $(0,4, 0,5)$, zero 0,45931. Intervalo $(1,7, 1,8)$, zero 1,7036. Intervalo $(2,5, 2,6)$, zero 2,5582.**E 4.2.3.** a) $x_1 = 1$. b) Dica: como $x_2 = 2$ é raiz dupla, tem-se que $p'(x_2) = 0$.**E 4.2.5.** 1,390054; 1,8913954; 2,4895673; 3,1641544; 3,8965468**E 4.2.6.** $k\theta = \frac{IP}{2} \cos(\theta)$ com $\theta \in (0, \pi/2)$; 1,030.**E 4.2.7.** 19; 23; 26; 0,567143; 1,745528; 3,385630**E 4.2.8.** a) 0,623; b) 0,559; c) 0,500; d) 0,300; e) -0,3; f) -30; g) -30**E 4.2.9.** a) 0,0294; b) $2.44e - 3$; c) $2.50e - 4$; d) $1.09 \cdot 10^{-7}$; e) -10^{-12} ; f) -10^{-12} ; g) -10^{-12} **E 4.3.1.** -1,8414057**E 4.3.2.**

0,7391

E 4.3.3.

Tomemos $x^{(1)} = 1$ como aproximação inicial para a solução deste problema, iterando a primeira sequência a), obtemos:

$$x^{(1)} = 1 \quad (4.79)$$

$$x^{(2)} = \ln\left(\frac{10}{1}\right) = 2,3025851 \quad (4.80)$$

$$x^{(3)} = \ln\left(\frac{10}{2,3025851}\right) = 1,4685526 \quad (4.81)$$

$$\vdots \quad (4.82)$$

$$x^{(21)} = 1,7455151 \quad (4.83)$$

$$x^{(31)} = 1,745528 \quad (4.84)$$

$$x^{(32)} = 1,745528 \quad (4.85)$$

Iterando a segunda sequência b), obtemos:

$$x^{(1)} = 1 \quad (4.86)$$

$$x^{(2)} = 10e^{-1} = 3,6787944 \quad (4.87)$$

$$x^{(3)} = 10e^{-3,6787944} = 0,2525340 \quad (4.88)$$

$$x^{(4)} = 10e^{-0,2525340} = 7,7682979 \quad (4.89)$$

$$x^{(5)} = 10e^{-7,7682979} = 0,0042293 \quad (4.90)$$

$$x^{(6)} = 10e^{-0,0042293} = 9,9577961 \quad (4.91)$$

Este experimento numérico sugere que a iteração a) converge para 1,745528 e a iteração b) não é convergente.

E 4.3.7. $x_1 \approx 1,4506619$, $x_2 \approx 4,8574864$, $x_3 = 7,7430681$.

E 4.3.10.

0.0431266

E 4.4.1. raiz:0,82413, processo iterativo: $x^{(n+1)} = x^{(n)} + \frac{\cos(x) - x^2}{\sin(x) + 2x}$

```
>> x=1
>> x=x+(cos(x)-x^2)/(sin(x)+2*x)
>> x=x+(cos(x)-x^2)/(sin(x)+2*x)
>> x=x+(cos(x)-x^2)/(sin(x)+2*x)
>> x=x+(cos(x)-x^2)/(sin(x)+2*x)
```

E 4.4.3. 0,65291864

E 4.4.4. 0,0198679; 0,533890; 0,735412; 1,13237 e 1,38851.

E 4.4.6. -99.99970, -0.3376513; -1.314006.

E 4.4.9.

$x_0 > 1$.

E 4.4.10.

$$x^{(0)} = \text{C.I.} \quad (4.147)$$

$$x^{(n+1)} = x^{(n)} \left(2 - Ax^{(n)}\right) \quad (4.148)$$

$$(4.149)$$

E 4.4.11.

$$x_0 = \text{C.I.} \quad (4.150)$$

$$x^{(n+1)} = x^{(n)} \left(1 - \frac{1}{n} \right) + \frac{A}{nx^{(n)}} \quad (4.151)$$

E 4.4.12.

$$x_0 = \text{C.I.} \quad (4.152)$$

$$x^{(n+1)} = x^{(n)} + \frac{x^{(n)} - Ax^{(n)}}{2} = \frac{(3-A)x^{(n)}}{2} \quad (4.153)$$

$$(4.154)$$

E 4.6.5. Seja $f(x) \in C^2$ um função tal que $f(x^*) = 0$ e $f'(x^*) \neq 0$. Considere o processo iterativo do método das secantes:

$$x^{(n+1)} = x^{(n)} - \frac{f(x^{(n)})}{f(x^{(n)}) - f(x^{(n-1)})} (x^{(n)} - x^{(n-1)}) \quad (4.202)$$

Esta expressão pode ser escrita como:

$$x^{(n+1)} = x^{(n)} - \frac{f(x^{(n)})(x^{(n)} - x^{(n-1)})}{f(x^{(n)}) - f(x^{(n-1)})} \quad (4.203)$$

$$(4.204)$$

$$= \frac{x^{(n)} \left(f(x^{(n)}) - f(x^{(n-1)}) \right) - f(x^{(n)})(x^{(n)} - x^{(n-1)})}{f(x^{(n)}) - f(x^{(n-1)})} \quad (4.205)$$

$$= \frac{x^{(n)} f(x^{(n-1)}) - x^{(n-1)} f(x^{(n)})}{f(x^{(n)}) - f(x^{(n-1)})} \quad (4.206)$$

Subtraindo x^* de ambos os lados temos:

$$x^{(n+1)} - x^* = \frac{x^{(n)} f(x^{(n-1)}) - x^{(n-1)} f(x^{(n)})}{f(x^{(n)}) - f(x^{(n-1)})} - x^* \quad (4.207)$$

$$= \frac{x^{(n)} f(x^{(n-1)}) - x^{(n-1)} f(x^{(n)}) - x^* \left(f(x^{(n)}) - f(x^{(n-1)}) \right)}{f(x^{(n)}) - f(x^{(n-1)})} \quad (4.208)$$

$$= \frac{(x^{(n)} - x^*) f(x^{(n-1)}) - (x^{(n-1)} - x^*) f(x^{(n)})}{f(x^{(n)}) - f(x^{(n-1)})} \quad (4.209)$$

Definimos $\epsilon_n = x_n - x^*$, equivalente a $x_n = x^* + \epsilon_n$

$$\epsilon_{n+1} = \frac{\epsilon_n f(x^* + \epsilon_{n-1}) - \epsilon_{n-1} f(x^* + \epsilon_n)}{f(x^* + \epsilon_n) - f(x^* + \epsilon_{n-1})} \quad (4.210)$$

Aproximamos a função $f(x)$ no numerador por

$$f(x^* + \epsilon) \approx f(x^*) + \epsilon f'(x^*) + \epsilon^2 \frac{f''(x^*)}{2} \quad (4.211)$$

$$f(x^* + \epsilon) \approx \epsilon f'(x^*) + \epsilon^2 \frac{f''(x^*)}{2} \quad (4.212)$$

$$\epsilon_{n+1} \approx \frac{\epsilon_n \left[\epsilon_{n-1} f'(x^*) + \epsilon_{n-1}^2 \frac{f''(x^*)}{2} \right] - \epsilon_{n-1} \left[\epsilon_n f'(x^*) + \epsilon_n^2 \frac{f''(x^*)}{2} \right]}{f(x^* + \epsilon_n) - f(x^* + \epsilon_{n-1})} \quad (4.213)$$

$$= \frac{\frac{f''(x^*)}{2} \left(\epsilon_n \epsilon_{n-1}^2 - \epsilon_{n-1} \epsilon_n^2 \right)}{f(x^* + \epsilon_n) - f(x^* + \epsilon_{n-1})} \quad (4.214)$$

$$= \frac{1}{2} f''(x^*) \frac{\epsilon_n \epsilon_{n-1} (\epsilon_{n-1} - \epsilon_n)}{f(x^* + \epsilon_n) - f(x^* + \epsilon_{n-1})} \quad (4.215)$$

Prof. M.e Daniel Cassimiro

Observamos, agora, que

$$\begin{aligned} f(x^* + \epsilon_n) - f(x^* + \epsilon_{n-1}) &\approx \left[f(x^*) + f'(x^*)\epsilon_n \right] - \left[f(x^*) + f'(x^*)\epsilon_{n-1} \right] \\ &= f'(x^*)(\epsilon_n - \epsilon_{n-1}) \end{aligned} \quad (4.216)$$

Portanto:

$$\epsilon_{n+1} \approx \frac{1}{2} \frac{f''(x^*)}{f'(x^*)} \epsilon_n \epsilon_{n-1} \quad (4.217)$$

ou, equivalentemente:

$$x^{(n+1)} - x^* \approx \frac{1}{2} \frac{f''(x^*)}{f'(x^*)} \left(x^{(n)} - x^* \right) \left(x^{(n-1)} - x^* \right) \quad (4.218)$$

E 4.7.2.

$x > a$ com $a \approx 0,4193648$.

E 4.7.3.

$z_1 \approx 0.3252768$, $z_2 \approx 1.5153738$, $z_3 \approx 2.497846$, $z_4 \approx 3.5002901$, $z_j \approx j - 1/2 - (-1)^j \frac{e^{-2j+1}}{\pi}$, $j > 4$

E 4.7.4.

150 W, 133 W, 87 W, 55 W, 6,5 W

E 4.7.5.

a) 42 s e 8 min2 s, b) 14 min56 s.

E 4.7.6.

118940992

E 4.7.7.

7,7 cm

E 4.7.8.

4,32 cm

E 4.7.9.

(0,652919, 0,426303)

E 4.7.10.

7,19% ao mês

E 4.7.11.

4,54% ao mês.

E 4.7.12.

500 K, 700 K em $t = 3 \ln(2)$, 26 min, 4 h27 min.

E 4.7.13.

$(\pm 1,1101388, -0,7675919)$, $(\pm 1,5602111, 0,342585)$

E 4.7.14.

1,5318075

E 4.7.15.

Aproximadamente 2500 reais por hora.

E 4.7.16.

a) 332,74 K b) 359,33 K

E 4.7.17.

1,2285751, 4,76770758, 7,88704085

E 5.1.1. $f(x) = -0,55 - 0,01x$.

E 5.1.2. $f(x) = 0,19 - 0,47x$.

E 5.1.3. a) $-0,6025387$; b) $-0,5651848$; c) $0,2851848$; d) $0,1488041$.

E 5.2.1. $a_1 = -0,67112$, $a_2 = -0,12123$, $a_3 = 0,73907$.

E 5.2.2. $y = -0,0407898x^2 + 2,6613293x + 1,9364598$.

E 5.2.3. a) $a = 25,638625$, $b = 9,8591874$, $c = 4,9751219$; b) $a = 31,475524$, $b = 65,691531$, $c = -272,84382$, $d = 208,23621$.