

# Report Crediti D Salvucci-Noce

## 1. [Esercizi](#)

### 1. [Esercizio 1](#)

1. [Codice Esercizio 1](#)
2. [Spiegazione](#)

### 2. [Esercizio 2](#)

1. [Codice Esercizio 2](#)
2. [Spiegazione](#)

### 3. [Esercizio 3](#)

1. [Codice Esercizio 3](#)
  1. [Spiegazione del codice](#)
  2. [Uso delle altre funzioni](#)

### 4. [Esercizio 4](#)

1. [Codice Esercizio 4](#)
2. [Spiegazione del codice](#)

### 5. [Esercizio 5](#)

1. [Codice Esercizio 5](#)
2. [Spiegazione Codice](#)

### 6. [Esercizio 6](#)

1. [Codice](#)
2. [Spiegazione](#)

## 2. [Problemi](#)

### 1. [Problema 1](#)

1. [Soluzione](#)
2. [Codice](#)

### 2. [Problema 2](#)

1. [Soluzione](#)
2. [Codice](#)
3. [Codice v2](#)

### 3. [Problema 3](#)

1. [Soluzione](#)
2. [Codice](#)

### 4. [Problema 4](#)

1. [Soluzione](#)
2. [Codice](#)

### 5. [Problema 5](#)

1. [Soluzione](#)

2. [Codice](#)6. [Problema 6](#)1. [Soluzione](#)1. [Caso 1](#)2. [Caso 2](#)2. [Codice](#)1. [Descrizione del Codice](#)

## Esercizi

### Esercizio 1

Il primo esercizio chiede di scrivere in MATLAB una function che calcoli l'algoritmo di **Ruffini-Horner** per la valutazione del polinomio d'interpolazione in un punto:

***Esercizio d'implementazione dell'algoritmo di valutazione del polinomio d'interpolazione in più punti.***

### Codice Esercizio 1

Questo codice genera un vettore di coefficienti per le differenze divise:

#### Esercizio 1.1

```

1  function p_t = interpola_ruffini_horner(x, y, t)
2      % Input:
3      % x: vettore dei punti x0, x1, ..., xn (devono essere distinti)
4      % y: vettore dei valori corrispondenti y0, y1, ..., yn
5      % t: vettore dei punti t1, t2, ..., tm dove si vuole valutare il
        polinomio interpolante
6
7      % Output:
8      % p_t: vettore contenente le valutazioni del polinomio interpolante
        nei punti t
9
10     % Calcola i coefficienti del polinomio usando le differenze divise
11     coeff = differenze_divise(x, y);
12
13     % Valuta il polinomio nei punti t usando lo schema di Horner
14     p_t = horner_eval(coeff, x, t);
15 end
16
17 function coeff = differenze_divise(x, y)
18     % Calcola i coefficienti delle differenze divise
19     n = length(x);
20     coeff = y; % Copia il vettore y
21

```

```

22     % Costruisce la tabella delle differenze divise
23     for j = 2:n
24         for i = n:-1:j
25             coeff(i) = (coeff(i) - coeff(i-1)) / (x(i) - x(i-j+1));
26         end
27     end
28 end
29
30 function p_t = horner_eval(coeff, x, t)
31     % Valuta il polinomio usando lo schema di Horner
32     n = length(coeff);
33     m = length(t);
34     p_t = zeros(1, m);
35
36     for k = 1:m
37         % Inizializza il polinomio con il termine di grado più alto
38         p = coeff(n);
39
40         % Applica lo schema di Horner
41         for i = n-1:-1:1
42             p = p * (t(k) - x(i)) + coeff(i);
43         end
44
45         % Salva il risultato della valutazione nel punto t(k)
46         p_t(k) = p;
47     end
48 end

```

Questo codice genera la **matrice** delle differenze divise:

```

1  function p_t = interpola_ruffini_horner(x, y, t)
2      % Input:
3      % x: vettore dei punti x0, x1, ..., xn (devono essere distinti)
4      % y: vettore dei valori corrispondenti y0, y1, ..., yn
5      % t: vettore dei punti t1, t2, ..., tm dove si vuole valutare il
        polinomio interpolante
6
7      % Output:
8      % p_t: vettore contenente le valutazioni del polinomio interpolante
        nei punti t
9
10     % Calcola la matrice delle differenze divise
11     diff_matrix = differenze_divise(x, y);
12
13     % Estrai i coefficienti dalla diagonale principale della matrice
14     coeff = diag(diff_matrix);
15
16     % Valuta il polinomio nei punti t usando lo schema di Horner
17     p_t = horner_eval(coeff, x, t);

```

```

18 end
19
20 function diff_matrix = differenze_divise(x, y)
21     % Calcola la matrice delle differenze divise
22     n = length(x);
23     diff_matrix = zeros(n, n); % Inizializza la matrice delle
    differenze divise
24
25     % Copia il vettore y nella prima colonna
26     diff_matrix(:, 1) = y(:);
27
28     % Costruisce la tabella delle differenze divise
29     for j = 2:n
30         for i = j:n
31             diff_matrix(i, j) = (diff_matrix(i, j-1) - diff_matrix(i-1,
j-1)) / (x(i) - x(i-j+1));
32         end
33     end
34 end
35
36 function p_t = horner_eval(coeff, x, t)
37     % Valuta il polinomio usando lo schema di Horner
38     n = length(coeff);
39     m = length(t);
40     p_t = zeros(1, m);
41
42     for k = 1:m
43         % Inizializza il polinomio con il termine di grado più alto
44         p = coeff(n);
45
46         % Applica lo schema di Horner
47         for i = n-1:-1:1
48             p = p * (t(k) - x(i)) + coeff(i);
49         end
50
51         % Salva il risultato della valutazione nel punto t(k)
52         p_t(k) = p;
53     end
54 end
55

```

## Spiegazione

### 1. Funzione principale ( `interpola_ruffini_horner` ):

- Prende in input i vettori `x` (ascisse), `y` (ordinate) e `t` (punti in cui valutare il polinomio).
- Prima usa la funzione `differenze_divise` per calcolare i coefficienti del polinomio interpolante nella forma di Newton.

- Poi usa la funzione `horner_eval` per valutare il polinomio nei punti desiderati applicando lo schema di Horner.

## 2. Calcolo delle differenze divise ( `differenze_divise` ):

- Costruisce la tabella delle differenze divise e restituisce i coefficienti del polinomio interpolante.
- L'algoritmo funziona partendo dai valori `y` e iterando per costruire le differenze successive.

## 3. Valutazione con lo schema di Horner ( `horner_eval` ):

- Prende i coefficienti del polinomio e valuta il polinomio in ciascun punto di `t` usando lo schema di Horner.
- Questo schema permette di valutare il polinomio in modo molto efficiente, riducendo il numero di operazioni necessarie.

# Esercizio 2

Il secondo esercizio chiede di scrivere una function MATLAB per implementare la **formula dei trapezi** di una data funzione presa in input:

## Esercizio d'implementazione della formula dei trapezi

## Codice Esercizio 2

### Esercizio 1.2

```

1  function In = formula_trapezi(f, a, b, n)
2      % Input:
3      % f: funzione da integrare (definita su [a,b])
4      % a: estremo sinistro dell'intervallo
5      % b: estremo destro dell'intervallo
6      % n: numero di sottointervalli (n >= 1)
7
8      % Output:
9      % In: approssimazione dell'integrale di f(x) su [a, b] usando la
      formula dei trapezi
10
11     % Larghezza di ciascun sottointervallo
12     h = (b - a) / n;
13
14     % Calcolo della somma dei valori intermedi
15     somma = 0;
16     for i = 1:n-1
17         xi = a + i*h;
18         somma = somma + f(xi);
19     end
20
21     % Formula dei trapezi
22     In = h*((f(a)+f(b))/2+somma)

```

## Spiegazione

Funzione `formula_trapezi` :

- Prende in input la funzione da integrare `f` , gli estremi dell'intervallo `[a, b]` , e il numero di sottointervalli `n` .
- Calcola la larghezza di ciascun sottointervallo come  $h = \frac{b-a}{n}$
- Usa la **formula dei trapezi** per calcolare un'approssimazione dell'integrale:

$$I_n = h \left[ \frac{f(a) + f(b)}{2} + \sum_{j=1}^{n-1} f(x_j) \right]$$

- Restituisce l'approssimazione  $I_n$  della funzione  $f(x)$  passata in input usando la formula dei trapezi.

## Esercizio 3

Il terzo esercizio chiede di scrivere una function MATLAB per implementare il **metodo di estrapolazione** di una data funzione presa in input. Chiede inoltre di usare le function MATLAB usate per risolvere gli esercizi 1 e 2

*Esercizio d'implementazione del metodo di estrapolazione*

## Codice Esercizio 3

*Esercizio 1.3*

```

1  function p0 = estrapol(f, a, b, n_vect)
2      % Input:
3      % f: funzione da integrare
4      % a: estremo sinistro dell'intervallo
5      % b: estremo destro dell'intervallo
6      % n_vect: vettore dei valori di n0, n1, ..., nm
7
8      % Output:
9      % p0: valore estrapolato p(0)
10
11     % Prealloca i vettori per h^2 e In
12     m = length(n_vect);
13     h_squared = zeros(1, m);
14     In_values = zeros(1, m);
15
16     % Calcola h^2 e In per ogni n in n_vect
17     for i = 1:m
18         n = n_vect(i);
19         h = (b - a) / n; % Passo di discretizzazione

```

```

20         h_squared(i) = h^2;
21         In_values(i) = formula_trapezi(f, a, b, n);
22     end
23
24     % Interpola i valori (h^2, In) usando le differenze divise
25     % La funzione interpola_ruffini_horner accetta vettori di x (qui
26     % h^2) e y (qui In_values)
27     % t=0 perché vogliamo estrapolare p(0)
28     p0 = interpola_ruffini_horner(h_squared, In_values, 0);
29
30     % Se viene specificato il numero di cifre, usa vpa per ottenere
31     % precisione
32     if nargin > 4
33         p0 = vpa(p0, cifre); % Calcola p0 con precisione
34         % specificata
35     end
36 end

```

## Spiegazione del codice

### 1. Input:

- `f` : la funzione da integrare.
- `a` e `b` : gli estremi dell'intervallo su cui si calcola l'integrale.
- `n_vect` : un vettore di valori  $n_0, n_1, \dots, n_m$  usati per il calcolo degli integrali.

### 2. Output:

- `p0` : il valore estrapolato  $p(0)$ , dove  $p(x)$  è il polinomio interpolante ottenuto dai valori di  $h^2$  e  $I_n$ .

### 3. Calcolo di $h^2$ e $I_n$ :

- Per ogni  $n_i$  nel vettore `n_vect`, il programma calcola il passo  $h$  e il corrispondente integrale approssimato  $I_n$  utilizzando la formula dei trapezi fornita nell'Esercizio 2.

### 4. Interpolazione:

- I valori  $h^2$  e  $I_n$  vengono usati per ottenere il polinomio interpolante con la funzione di interpolazione `interpola_ruffini_horner`, che è la soluzione all'Esercizio 1.11.

### 5. Estrapolazione:

- Il programma valuta il polinomio interpolante nel punto  $t = 0$  per ottenere  $p(0)$ .

## Uso delle altre funzioni

- `interpola_ruffini_horner`, `differenze_divise` e `horner_eval` provengono dall'Esercizio 1.1.
- `formula_trapezi` viene dall'Esercizio 1.2 per approssimare gli integrali usando la formula dei trapezi.

- `vpa(p0, cifre)` viene usato per approssimare correttamente il risultato con il numero di cifre passate in input. Questa è una funzione del Toolbox **Symbolic Math Toolbox**

## Esercizio 4

L'esercizio chiede di creare una function MATLAB per implementare il **metodo di Jacobi**.

### *Esercizio d'implementazione del metodo di Jacobi*

## Codice Esercizio 4

Questo codice implementa il metodo di Jacobi componente per componente:

#### *Esercizio 1.4*

```

1  function [x, K, r_norm] = jacobi_method(A, b, x0, epsilon, N_max)
2      % Input:
3      % A: matrice del sistema lineare Ax = b
4      % b: vettore dei termini noti
5      % x0: vettore di innesco (stima iniziale di x)
6      % epsilon: soglia di precisione
7      % N_max: numero massimo di iterazioni consentite
8
9      % Output:
10     % x: vettore approssimato x^(K) dopo K iterazioni o x^(N_max)
11     % K: numero di iterazioni effettivamente eseguite
12     % r_norm: norma ||r^(K)||_2 del residuo alla fine del processo
13
14     % Numero di variabili (dimensione del sistema)
15     n = length(b);
16
17     % Inizializza la variabile per il vettore x^(K) (soluzione corrente)
18     x = x0;
19
20     % Itera il metodo di Jacobi
21     for K = 1:N_max
22         % Prealloca il vettore x^(K+1)
23         x_new = zeros(n, 1);
24
25         % Calcola ogni componente di x^(K+1)
26         for i = 1:n
27             % Somma degli elementi a sinistra di x^(K)
28             sum1 = A(i, 1:i-1) * x(1:i-1);
29             % Somma degli elementi a destra di x^(K)
30             sum2 = A(i, i+1:n) * x(i+1:n);
31             % Formula del metodo di Jacobi
32             x_new(i) = (b(i) - sum1 - sum2) / A(i, i);
33         end
34

```



```

35      % Calcola il residuo  $r^{(K)} = b - A * x^{(K)}$ 
36       $r = b - A * x_{new};$ 
37
38      % Calcola la norma del residuo  $||r^{(K)}||_2$ 
39       $r\_norm = norm(r, 2);$ 
40
41      % Condizione di arresto: se  $||r^{(K)}||_2 \leq \epsilon * ||b||_2$ 
42      if  $r\_norm \leq \epsilon * norm(b, 2)$ 
43           $x = x_{new};$ 
44          return; % Arresta l'algoritmo e restituisce il risultato
45      end
46
47      % Aggiorna la soluzione corrente  $x^{(K)}$  con  $x^{(K+1)}$ 
48       $x = x_{new};$ 
49  end
50
51      % Se si raggiunge N_max iterazioni senza soddisfare il criterio, si
restituisce
52      %  $x^{(N\_max)}$ , il relativo indice N_max e la norma del residuo
 $||r^{(N\_max)}||_2$ 
53  end

```

Questo codice implementa il metodo di Jacobi con il metodo iterativo:

```

1  function [x, K, r_norm] = jacobiIterativo(A, b, x0, epsilon, N_max)
2      % Metodo di Jacobi - Versione Iterativa
3      % Input:
4      % A: matrice del sistema lineare  $Ax = b$ 
5      % b: vettore dei termini noti
6      % x0: vettore di innesco (stima iniziale di x)
7      % epsilon: soglia di precisione
8      % N_max: numero massimo di iterazioni consentite
9
10     % Output:
11     % x: vettore approssimato  $x^{(K)}$  dopo K iterazioni o  $x^{(N\_max)}$ 
12     % K: numero di iterazioni effettivamente eseguite
13     % r_norm: norma  $||r^{(K)}||_2$  del residuo alla fine del processo
14
15     % Separazione di D, L e U dalla matrice A
16      $D = diag(diag(A));$  % Matrice diagonale
17      $L = tril(A, -1);$  % Parte triangolare inferiore
18      $U = triu(A, 1);$  % Parte triangolare superiore
19
20     % Pre-calcolo della matrice iterativa  $M = D^{(-1)} * (L + U)$ 
21      $D\_inv = inv(D);$  % Inversa della diagonale
22      $M = -D\_inv * (L + U);$  % Matrice di iterazione
23
24     % Pre-calcolo del termine costante  $c = D^{(-1)} * b$ 
25      $c = D\_inv * b;$ 

```

```

26
27     % Inizializza il vettore soluzione con la stima iniziale
28     x = x0;
29
30     % Itera il metodo di Jacobi
31     for K = 1:N_max
32         % Aggiornamento vettoriale:  $x^{(k+1)} = M * x^{(k)} + c$ 
33         x_new = M * x + c;
34
35         % Calcola il residuo  $r^{(K)} = b - A * x^{(K)}$ 
36         r = b - A * x_new;
37
38         % Calcola la norma del residuo  $||r^{(K)}||_2$ 
39         r_norm = norm(r, 2);
40
41         % Condizione di arresto:  $||r^{(K)}||_2 \leq \text{epsilon} * ||b||_2$ 
42         if r_norm <= epsilon * norm(b, 2)
43             x = x_new;
44             return; % Arresta l'algoritmo e restituisce il risultato
45         end
46
47         % Aggiorna la soluzione corrente  $x^{(K)}$ 
48         x = x_new;
49     end
50
51     % Se si raggiunge N_max iterazioni senza soddisfare il criterio, si
    restituisce
52     %  $x^{(N\_max)}$ , il relativo indice N_max e la norma del residuo
     $||r^{(N\_max)}||_2$ 
53 end
54

```

## Spiegazione del codice

### 1. Input:

- A : La matrice del sistema lineare.
- b : Il vettore dei termini noti.
- x0 : Il vettore di innesco (cioè la stima iniziale di  $x$ ).
- epsilon : La soglia di precisione per il residuo.
- N\_max : Il numero massimo di iterazioni consentite.

### 2. Output:

- x : Il vettore soluzione  $x^{(K)}$ , dove  $K$  è il numero di iterazioni.
- K : Il numero di iterazioni effettivamente eseguite.
- r\_norm : La norma  $||r^{(K)}||_2$  del residuo  $r^{(K)} = b - A \cdot x^{(K)}$ .

### 3. Procedura:

- Il metodo di Jacobi viene applicato iterativamente fino a quando il residuo  $\|r^{(K)}\|_2$  diventa minore o uguale a  $\varepsilon \cdot \|b\|_2$ , oppure si raggiunge il numero massimo di iterazioni  $N_{\max}$ .
- Se nessuna delle iterazioni soddisfa la condizione di arresto, il programma restituisce  $x^{(N_{\max})}$ .

## Esercizio 5

L'esercizio chiede di creare una function MATLAB per implementare il **metodo di Gauss-Seidel**.

### *Esercizio d'implementazione del metodo di Gauss-Seidel*

## Codice Esercizio 5

Questo è il codice di Gauss-Seidel componente per componente

### *Esercizio 1.5*

```

1  function [x, K, r_norm] = metodo_gauss_seidel(A, b, x0, epsilon, N_max)
2      % Input:
3      % A: matrice del sistema lineare Ax = b
4      % b: vettore dei termini noti
5      % x0: vettore di innesco (stima iniziale di x)
6      % epsilon: soglia di precisione
7      % N_max: numero massimo di iterazioni consentite
8
9      % Output:
10     % x: vettore approssimato x^(K) dopo K iterazioni o x^(N_max)
11     % K: numero di iterazioni effettivamente eseguite
12     % r_norm: norma ||r^(K)||_2 del residuo alla fine del processo
13
14     % Numero di variabili (dimensione del sistema)
15     n = length(b);
16
17     % Inizializza la soluzione corrente con il vettore di innesco x0
18     x = x0;
19
20     % Itera il metodo di Gauss-Seidel
21     for K = 1:N_max
22         % Memorizza la soluzione precedente x^(K-1)
23         x_old = x;
24
25         % Calcola ogni componente di x^(K)
26         for i = 1:n
27             % Somma degli elementi a sinistra di x^(K)
28             sum1 = A(i, 1:i-1) * x(1:i-1);
29             % Somma degli elementi a destra di x^(K-1)

```

```

30         sum2 = A(i, i+1:n) * x_old(i+1:n);
31         % Formula del metodo di Gauss-Seidel
32         x(i) = (b(i) - sum1 - sum2) / A(i, i);
33     end
34
35     % Calcola il residuo  $r^{(K)} = b - A * x^{(K)}$ 
36     r = b - A * x;
37
38     % Calcola la norma del residuo  $||r^{(K)}||_2$ 
39     r_norm = norm(r, 2);
40
41     % Condizione di arresto: se  $||r^{(K)}||_2 \leq \epsilon * ||b||_2$ 
42     if r_norm <= epsilon * norm(b, 2)
43         return; % Arresta l'algoritmo e restituisce il risultato
44     end
45 end
46
47 % Se si raggiunge N_max iterazioni senza soddisfare il criterio, si
restituisce
48 %  $x^{(N_{\max})}$ , il relativo indice  $N_{\max}$  e la norma del residuo
 $||r^{(N_{\max})}||_2$ 
49 end

```

Questo è il metodo di Gauss-Seidel iterativo

```

1  function [x, K, r_norm] = gauss_seidelIterativo(A, b, x0, epsilon,
N_max)
2      % Metodo di Gauss-Seidel - versione Iterativa
3      % Input:
4      % A: matrice del sistema lineare  $Ax = b$ 
5      % b: vettore dei termini noti
6      % x0: vettore di innesco (stima iniziale di x)
7      % epsilon: soglia di precisione
8      % N_max: numero massimo di iterazioni consentite
9
10     % Output:
11     % x: vettore approssimato  $x^{(K)}$  dopo K iterazioni o  $x^{(N_{\max})}$ 
12     % K: numero di iterazioni effettivamente eseguite
13     % r_norm: norma  $||r^{(K)}||_2$  del residuo alla fine del processo
14
15     % Separazione della matrice A in E (triangolare inferiore) e U
(triangolare superiore)
16     E = tril(A); % Parte triangolare inferiore (inclusa
diagonale)
17     U = triu(A, 1); % Parte triangolare superiore (esclusa
diagonale)
18
19     % Pre-calcolo della matrice iterativa  $G = E^{(-1)} * U$ 
20     G = -E \ U; %  $G = -\text{inv}(E) * U$ 

```

```

21
22 % Pre-calcolo del termine costante  $c = E^{-1} * b$ 
23  $c = E \setminus b;$  %  $c = \text{inv}(E) * b$ 
24
25 % Inizializza la soluzione corrente con il vettore di innesco  $x_0$ 
26  $x = x_0;$ 
27
28 % Itera il metodo di Gauss-Seidel
29 for  $K = 1:N\_max$ 
30 % Aggiornamento vettoriale:  $x^{(k+1)} = G * x^{(k)} + c$ 
31  $x\_new = G * x + c;$ 
32
33 % Calcola il residuo  $r^{(K)} = b - A * x^{(K)}$ 
34  $r = b - A * x\_new;$ 
35
36 % Calcola la norma del residuo  $\|r^{(K)}\|_2$ 
37  $r\_norm = \text{norm}(r, 2);$ 
38
39 % Condizione di arresto:  $\|r^{(K)}\|_2 \leq \text{epsilon} * \|b\|_2$ 
40 if  $r\_norm \leq \text{epsilon} * \text{norm}(b, 2)$ 
41  $x = x\_new;$ 
42 return; % Arresta l'algoritmo e restituisce il risultato
43 end
44
45 % Aggiorna la soluzione corrente  $x^{(K)}$ 
46  $x = x\_new;$ 
47 end
48
49 % Se si raggiunge  $N\_max$  iterazioni senza soddisfare il criterio, si
restituisce
50 %  $x^{(N\_max)}$ , il relativo indice  $N\_max$  e la norma del residuo
 $\|r^{(N\_max)}\|_2$ 
51 end

```

## Spiegazione Codice

### 1. Input:

- $A$  : La matrice del sistema lineare.
- $b$  : Il vettore dei termini noti.
- $x_0$  : Il vettore di innesco (cioè la stima iniziale di  $x$ ).
- $\text{epsilon}$  : La soglia di precisione per il residuo.
- $N\_max$  : Il numero massimo di iterazioni consentite.

### 2. Output:

- $x$  : Il vettore soluzione  $x^{(K)}$ , dove  $K$  è il numero di iterazioni.
- $K$  : Il numero di iterazioni effettivamente eseguite.
- $r\_norm$  : La norma  $\|r^{(K)}\|_2$  del residuo  $r^{(K)} = b - A \cdot x^{(K)}$ .

### 3. Procedura:

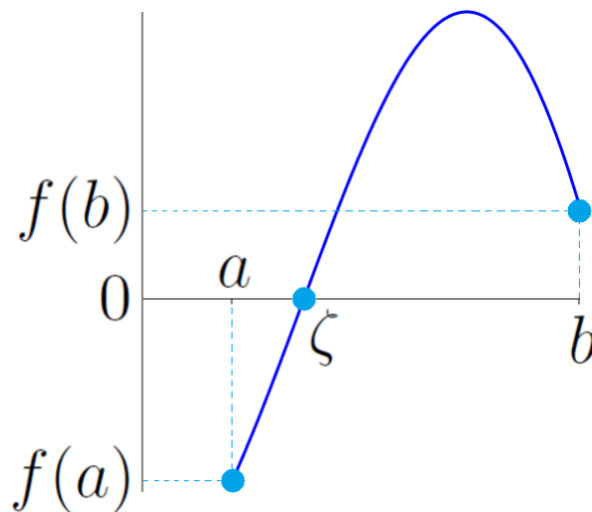
- Il metodo di Gauss-Seidel iterativo aggiorna ogni componente del vettore  $x^{(K)}$  tenendo conto dei valori già aggiornati di  $x_i$ , a differenza del metodo di Jacobi, dove si usano solo i valori dell'iterazione precedente.
- L'arresto del processo avviene quando la norma del residuo  $\|r^{(K)}\|_2$  è inferiore o uguale a  $\varepsilon \cdot \|b\|_2$  oppure si raggiunge il numero massimo di iterazioni  $N_{\max}$ .

## Esercizio 6

L'esercizio 6 chiede di creare una function MATLAB che implementi il **metodo della bisezione**, ovvero il metodo che permette di trovare il punto  $\xi$  di una funzione  $f(x)$  definita su intervallo  $[a, b]$  tale che  $f(\xi) = 0$

Sia  $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$  una funzione continua su  $[a, b]$  tale che  $f(a)$  e  $f(b)$  hanno segno opposto :  $f(a)f(b) < 0$ . Un teorema dell'analisi matematica ( teorema degli zeri ) garantisce che la funzione  $f(x)$  ha almeno uno zero nell'intervallo  $(a, b)$ , cioè esiste un punto  $\zeta \in (a, b)$  tale che  $f(\zeta) = 0$ ;

Figura 1.1



Una funzione continua  $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$  tale che  $f(a)f(b) < 0$  possiede almeno uno zero  $\zeta \in (a, b)$ .

Supponiamo che  $f(x)$  abbia un unico zero  $\zeta$  in  $(a, b)$ . Un metodo per determinare un'approssimazione  $\xi$  di  $\zeta$  è il metodo di bisezione: fissata una soglia di precisione  $\varepsilon > 0$ , il metodo costruisce la successione di intervalli

$$[\alpha_k, \beta_k], \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

in cui  $[\alpha_0, \beta_0] = [a, b]$  e, per  $k \leq 1$ ,

$$[\alpha_k, \beta_k] = \begin{cases} [\alpha_{k-1}, \frac{\alpha_{k-1} + \beta_{k-1}}{2}], & \text{se } \zeta \in [\alpha_{k-1}, \frac{\alpha_{k-1} + \beta_{k-1}}{2}] \text{ cioè } f(\alpha_{k-1})f(\frac{\alpha_{k-1} + \beta_{k-1}}{2}) \leq 0, \\ [\frac{\alpha_{k-1} + \beta_{k-1}}{2}, \beta_{k-1}], & \text{altrimenti.} \end{cases}$$

La successione di intervalli così costruita gode delle seguenti proprietà:

- $\zeta \in [\alpha_k, \beta_k]$  per tutti i  $k \geq 0$ ;
- ogni intervallo è metà del precedente e dunque la lunghezza di  $[\alpha_k, \beta_k]$  è  $\beta_k - \alpha_k = \frac{b-a}{2^k}$  per ogni  $k \geq 0$ .

Il metodo si arresta al primo indice  $K$  tale che  $\beta_K - \alpha_K \leq \varepsilon$  e restituisce come risultato il punto medio  $\xi$  dell'intervallo  $[\alpha_K, \beta_K]$  dato da  $\xi = \frac{\alpha_K + \beta_K}{2}$ . In questo modo, siccome  $\zeta \in [\alpha_K, \beta_K]$ , si ha  $|\xi - \zeta| \leq \frac{\varepsilon}{2}$ .

Osserviamo che l'indice di arresto  $K$  è il più piccolo intero  $\geq 0$  tale che

$$\beta_k - \alpha_k \leq \varepsilon \iff \frac{b-a}{2^K} \leq \varepsilon \iff 2^K \geq \frac{b-a}{\varepsilon} \iff K \geq \log_2\left(\frac{b-a}{\varepsilon}\right),$$

cioè  $K = \lceil \log_2(\frac{b-a}{\varepsilon}) \rceil$ .

Scrivere un programma Matlab che implementa il metodo di bisezione. Il programma deve:

- prendere in input gli estremi  $a, b$  di un intervallo, una funzione continua  $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ , con  $f(a)f(b) < 0$  e con un unico zero  $\zeta \in (a, b)$ , e un  $\varepsilon > 0$ ;
- restituire in output l'approssimazione  $\xi$  di  $\zeta$  ottenuta con il metodo di bisezione sopra descritto, l'indice di arresto  $K$  del metodo, e il valore  $f(\xi)$  (che sarà all'incirca pari a  $0 = f(\zeta)$ ).

## Codice

### Esercizio 1.6

```

1  function [xi, K, fx] = bisezione(a, b, f, epsilon)
2      % Verifica che f(a) e f(b) abbiano segno opposto
3      if f(a) * f(b) > 0
4          error('f(a) e f(b) devono avere segni opposti');
5      end
6
7      % Inizializzazione degli estremi dell'intervallo e contatore delle
      iterazioni
8      alpha_k = a;
9      beta_k = b;
10     K = 0;
11
12     % Ripeti finché la lunghezza dell'intervallo è maggiore della
      precisione richiesta
13     while (beta_k - alpha_k) / 2 > epsilon
14         % Calcola il punto medio dell'intervallo
15         xi = (alpha_k + beta_k) / 2;
16
17         % Aggiorna gli estremi dell'intervallo in base al segno di f(xi)
18         if f(alpha_k) * f(xi) <= 0
19             beta_k = xi;
20         else
21             alpha_k = xi;

```

```

22         end
23
24         % Incrementa il contatore delle iterazioni
25         K = K + 1;
26     end
27
28     % Calcola l'approssimazione finale di xi come punto medio
    dell'ultimo intervallo
29     xi = (alpha_k + beta_k) / 2;
30     fx = f(xi); % Calcola il valore di f in xi
31 end

```

## Spiegazione

- **Verifica dei segni:** la funzione controlla che  $f(a)$  e  $f(b)$  abbiano segno opposto, come richiesto dal teorema degli zeri.
- **Inizializzazione:** definisce  $\alpha_k = a$  e  $\beta_k = b$  e imposta il contatore  $K = 0$
- **Iterazione del metodo di bisezione:** continua a suddividere l'intervallo finché la metà della sua lunghezza è maggiore di  $\varepsilon$ . Ad ogni iterazione:
  - Calcola il punto medio  $\xi$ .
  - Aggiorna gli estremi in base al segno di  $f(\xi)$  rispetto a  $f(\alpha_k)$ .
  - Incrementa  $K$ .
- **Output finale:** restituisce l'approssimazione  $\xi$ , l'indice  $K$ , e  $f(\xi)$ .

## Problemi

### Problema 1

Si consideri la funzione  $\sqrt{x}$ .

**(a)** Sia  $p(x)$  il polinomio di interpolazione di  $\sqrt{x}$  sui nodi

$$x_0 = 0, x_1 = \frac{1}{64}, x_2 = \frac{4}{64}, x_3 = \frac{9}{64}, x_4 = \frac{16}{64}, x_5 = \frac{25}{64}, x_6 = \frac{36}{64}, x_7 = \frac{49}{64}, x_8 = 1.$$

Calcolare il vettore ( colonna )

$$[p(\zeta_1) - \sqrt{\zeta_1} \quad p(\zeta_2) - \sqrt{\zeta_2} \quad \dots \quad p(\zeta_{21}) - \sqrt{\zeta_{21}}]^T$$

dove  $\zeta_i = \frac{i-1}{20}$  per  $i = 1, \dots, 21$ , e osservare in che modo varia la differenza  $p(\zeta_i) - \sqrt{\zeta_i}$  al variare di  $i$  da 1 a 21.

**(b)** Tracciare il grafico di  $\sqrt{x}$  e di  $p(x)$  sull'intervallo  $[0, 1]$ , ponendo i due grafici su un'unica figura e inserendo una legenda che ci dica qual è la funzione  $\sqrt{x}$  e qual è il polinomio  $p(x)$ .

## Soluzione

### Punto (a)



Con  $\xi_i = \frac{i-1}{20}$ , il vettore colonna  $p(\xi_1) - \sqrt{\xi_1}, \dots, p(\xi_{21}) - \sqrt{\xi_{21}}$  è

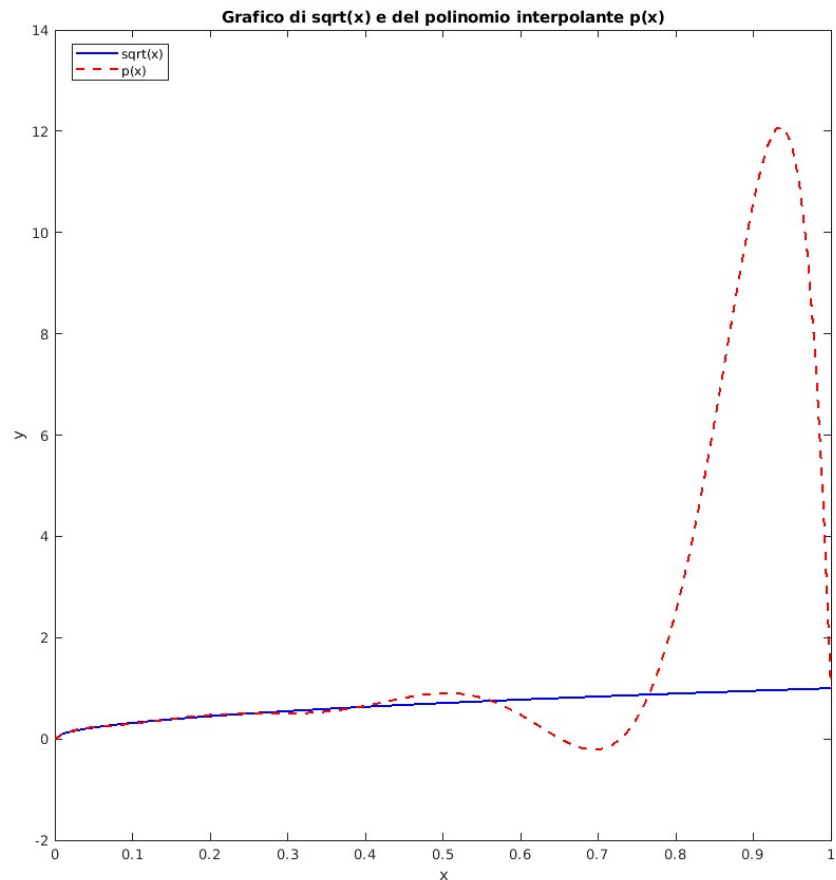
$$\begin{aligned} p(\xi_1) - \sqrt{\xi_1} &: 0 \\ p(\xi_2) - \sqrt{\xi_2} &: 0.009373456935820 \\ p(\xi_3) - \sqrt{\xi_3} &: -0.016624898598359 \\ p(\xi_4) - \sqrt{\xi_4} &: 0.006265159516694 \\ p(\xi_5) - \sqrt{\xi_5} &: 0.026059100541982 \\ p(\xi_6) - \sqrt{\xi_6} &: 0.000000000000000 \\ p(\xi_7) - \sqrt{\xi_7} &: -0.046798842893448 \\ p(\xi_8) - \sqrt{\xi_8} &: -0.052843679514480 \\ p(\xi_9) - \sqrt{\xi_9} &: 0.019043791981465 \\ p(\xi_{10}) - \sqrt{\xi_{10}} &: 0.136657922266046 \\ p(\xi_{11}) - \sqrt{\xi_{11}} &: 0.195969221000572 \\ p(\xi_{12}) - \sqrt{\xi_{12}} &: 0.070222900207986 \\ p(\xi_{13}) - \sqrt{\xi_{13}} &: -0.298665479678417 \\ p(\xi_{14}) - \sqrt{\xi_{14}} &: -0.793827451939188 \\ p(\xi_{15}) - \sqrt{\xi_{15}} &: -1.047857448417138 \\ p(\xi_{16}) - \sqrt{\xi_{16}} &: -0.461689802877381 \\ p(\xi_{17}) - \sqrt{\xi_{17}} &: 1.600121563949965 \\ p(\xi_{18}) - \sqrt{\xi_{18}} &: 5.337600132745608 \\ p(\xi_{19}) - \sqrt{\xi_{19}} &: 9.648720381277402 \\ p(\xi_{20}) - \sqrt{\xi_{20}} &: 10.731478361986454 \\ p(\xi_{21}) - \sqrt{\xi_{21}} &: -0.000000000000004 \end{aligned}$$

Osservando i valori numerici, si può notare che:

- **L'errore non è costante:** La differenza  $p(\xi_i) - \sqrt{\xi_i}$  assume sia valori positivi che negativi, indicando che il polinomio a volte sovrastima e a volte sottostima la funzione radice quadrata.
- **L'errore varia in modo significativo a seconda del punto:** In alcuni punti l'errore è molto piccolo (quasi nullo), mentre in altri è molto grande.

### Punto (b)

Il grafico delle funzioni  $\sqrt{x}$  e  $p(x)$  è il seguente



## Codice

### Problema2.1

```

1  % Definisci i nodi di interpolazione e i valori corrispondenti di
   sqrt(x)
2  x_nodes = [0, 1/64, 4/64, 9/64, 16/64, 25/64, 36/64, 49/64, 1];
3  y_nodes = sqrt(x_nodes);
4
5  % Definisci i punti zeta_i dove valutare il polinomio interpolante
6  i = 1:21;
7  zeta = (i-1) / 20;
8
9  % Calcola il polinomio interpolante nei punti zeta usando
   Interpola_Ruffini_Horner
10 p_zeta = interpola_ruffini_horner(x_nodes, y_nodes, zeta);
11
12 % Calcola la funzione sqrt nei punti zeta
13 sqrt_zeta = sqrt(zeta);
14
15 % Calcola il vettore delle differenze p(zeta) - sqrt(zeta)
16 diff_vector = p_zeta - sqrt_zeta;
17
18 % Visualizza il vettore delle differenze
19 disp('Vettore delle differenze p(zeta_i) - sqrt(zeta_i):');

```

```

20 disp(diff_vector. ');
21
22 % Traccia il grafico di sqrt(x) e p(x) sull'intervallo [0, 1]
23 x_plot = linspace(0, 1, 100); % Punti per il grafico
24 p_x_plot = interpola_ruffini_horner(x_nodes, y_nodes, x_plot);
25 sqrt_x_plot = sqrt(x_plot);
26
27 figure;
28 plot(x_plot, sqrt_x_plot, 'b-', 'LineWidth', 1.5); hold on;
29 plot(x_plot, p_x_plot, 'r--', 'LineWidth', 1.5);
30 legend('sqrt(x)', 'p(x)', 'Location', 'best');
31 xlabel('x');
32 ylabel('y');
33 title('Grafico di sqrt(x) e del polinomio interpolante p(x)');
34 hold off;

```

## Problema 2

Si consideri la funzione

$$f(x) = e^x.$$

Per ogni intero  $n \geq 1$  indichiamo con  $I_n$  la formula dei trapezi di ordine  $n$  per approssimare

$$I = \int_0^1 f(x) dx = 1.7182818284590 \dots$$

**(a)** Per ogni fissato  $\varepsilon > 0$  determinare un  $n = n_\varepsilon$  tale che  $|I - I_n| \leq \varepsilon$ .

**(b)** Costruire una tabella che riporti vicino ad ogni  $\varepsilon \in \{10^{-1}, 10^{-2}, \dots, 10^{-10}\}$ :

- il numero  $n(\varepsilon)$ ;
- il valore  $I_n$  per  $n = n(\varepsilon)$ ;
- il valore esatto  $I$  ( per confrontarlo con  $I_n$  );
- l'errore  $|I - I_n|$  ( che deve essere  $\leq \varepsilon$  ).

**(c)** Calcolare le approssimazioni di  $I$  ottenute con le formule dei trapezi  $I_2, I_4, I_8, I_{16}$  e confrontarle con il valore esatto  $I$ .

**(d)** Sia  $p(x)$  il polinomio di interpolazione dei valori  $I_2, I_4, I_8, I_{16}$  sui nodi  $h_2^2, h_4^2, h_8^2, h_{16}^2$ , dove  $h_2 = \frac{1}{2}, h_4 = \frac{1}{4}, h_8 = \frac{1}{8}, h_{16} = \frac{1}{16}$  sono i passi di discretizzazione relativi alle formule dei trapezi  $I_2, I_4, I_8, I_{16}$  rispettivamente. Calcolare  $p(0)$  e confrontare  $I_2, I_4, I_8, I_{16}, p(0)$  con il valore esatto  $I$ . Che cosa si nota?

## Soluzione

### Punto (a)

Per il teorema sull'errore o resto della formula dei trapezi, abbiamo che

$$\left| \int_0^1 e^x dx - I_n \right| = \left| -\frac{f''(\eta) \cdot 1}{12} \cdot h^2 \right| = \frac{|f''(\eta)|}{12n^2}, \quad \eta \in [0, 1]$$

Per determinare un  $n = n(\varepsilon)$  tale che  $|I - I_n| \leq \varepsilon$ , calcoliamo  $f''(x)$ :

$$f'(x) = f''(x) = f(x) = e^x$$

per ogni  $x \in [0, 1]$  si ha che:

$$|f''(x)| = |e^x| = e^x \leq e$$

Quindi, possiamo scrivere

$$\left| \int_0^1 e^x dx - I_n \right| \leq \frac{e}{12n^2}$$

E infine

$$\frac{e}{12n^2} \leq \varepsilon \iff n \geq \sqrt{\frac{e}{12\varepsilon}}$$

Dunque prenderemo

$$n = n(\varepsilon) = \left\lceil \sqrt{\frac{e}{12\varepsilon}} \right\rceil$$

### Punto (b)

Tabella per ogni  $\varepsilon \in \{10^{-1}, 10^{-2}, \dots, 10^{-10}\}$

$\epsilon$	$n$	$I_n$	Error
$1.0 \times 10^{-1}$	2	1.753931092464825	$3.564926400578017 \times 10^{-2}$
$1.0 \times 10^{-2}$	5	1.724005619782788	$5.723791323742899 \times 10^{-3}$
$1.0 \times 10^{-3}$	16	1.718841128579994	$5.593001209494020 \times 10^{-4}$
$1.0 \times 10^{-4}$	48	1.718343976513114	$6.214805406878909 \times 10^{-5}$
$1.0 \times 10^{-5}$	151	1.718288108448857	$6.279989812174591 \times 10^{-6}$
$1.0 \times 10^{-6}$	476	1.718282460433048	$6.319740029070431 \times 10^{-7}$
$1.0 \times 10^{-7}$	1506	1.718281891593031	$6.313398559498751 \times 10^{-8}$
$1.0 \times 10^{-8}$	4760	1.718281834778786	$6.319740952775987 \times 10^{-9}$
$1.0 \times 10^{-9}$	15051	1.718281829091138	$6.320926004832472 \times 10^{-10}$
$1.0 \times 10^{-10}$	47595	1.718281828522237	$6.319145207100973 \times 10^{-11}$

### Punto (c)

Le approssimazioni di  $I$  ottenute con la formula dei trapezi sono le seguenti :

$$I_2 = 1.75393109246482525876 \text{ (Errore} = 3.5649264006 \cdot 10^{-2})$$

$$I_4 = 1.72722190455751656302 \text{ (Errore} = 8.9400760985 \cdot 10^{-3})$$

$$I_8 = 1.72051859216430180766 \text{ (Errore} = 2.2367637053 \cdot 10^{-3}\text{)}$$

$$I_{16} = 1.71884112857999449275 \text{ (Errore} = 5.5930012095 \cdot 10^{-4}\text{)}$$

Valore esatto di  $I$  è : 1.718281828459045

### Punto (d)

Il valore di  $p(0) = 1.718281828460389$

Confronto con il valore esatto di  $I = 1.718281828459045$

Si nota che il valore  $p(0)$  si avvicina di molto al valore esatto di  $I$ , infatti l'errore

$$|p(0) - I| = 1.343813949006289 \cdot 10^{-12} \text{ (ovvero } 1.3438 \cdot 10^{-12}\text{)}.$$

## Codice

Questo è il codice che **NON** utilizza il metodo dell'extrapolazione, ma utilizza al suo posto Ruffini-Horner e formula dei trapezi separatamente; inoltre, per il **punto (b)** viene calcolato per ogni  $\varepsilon$  il **miglior**  $n$ .

Usando `tic; toc` di MatLab, vediamo che il codice impiega tempo 18.120515 sec.

### Problema 2.2

```

1  % Definizione della funzione
2  f = @(x) exp(x);
3
4  % Valore esatto dell'integrale
5  I_exact = 1.718281828459045;
6
7  % --- Punto (b) ---
8  % Tolleranze epsilon da verificare
9  epsilons = [1e-1, 1e-2, 1e-3, 1e-4, 1e-5, 1e-6, 1e-7, 1e-8, 1e-9, 1e-
10 10];
11
12 % Inizializzazione tabella
13 results = [];
14
15 for epsilon = epsilons
16     n = 1;
17     In = formula_trapezi(f, 0, 1, n);
18     error = abs(I_exact - In);
19
20     % Incrementa n fino a soddisfare la condizione di errore
21     while error > epsilon
22         n = n + 1;
23         In = formula_trapezi(f, 0, 1, n);
24         error = abs(I_exact - In);
25     end
26
27     % Aggiungi i risultati per questo epsilon

```

```

27     results = [results; epsilon, n, In, I_exact, error];
28 end
29
30 % --- Formattazione e visualizzazione dei risultati ---
31 % Cambia formato per Epsilon in esponenziale
32 format("shortE");
33 epsilon_col = results(:,1);
34
35 % Cambia formato per I_n e I_exact in formato long
36 format("long");
37 In_col = results(:,3);
38 I_exact_col = results(:,4);
39
40 % Cambia formato per il resto dei valori in compatto
41 format("compact");
42 n_col = results(:,2);
43 error_col = results(:,5);
44
45 % Mostra la tabella formattata
46 disp('Tabella dei risultati per il punto (b):');
47 disp(table(epsilon_col, n_col, In_col, I_exact_col, error_col, ...
48     'VariableNames', {'Epsilon', 'n', 'In', 'I_exact', 'Error'}));
49
50 % --- Punto (c) ---
51 n_values = [2, 4, 8, 16];
52 I_values = zeros(size(n_values));
53
54 for i = 1:length(n_values)
55     I_values(i) = formula_trapezi(f, 0, 1, n_values(i));
56 end
57
58 % Visualizza i risultati per il punto (c) con formato long per I_values
59 disp('Risultati per il punto (c):');
60 format("long");
61 for i = 1:length(n_values)
62     fprintf('I_%d = %.20f (Errore = %.10e)\n', n_values(i), I_values(i),
63         abs(I_exact - I_values(i)));
64 end
65 disp('Valore esatto I:');
66 disp(I_exact);
67
68 % --- Punto (d) ---
69 % Passi di discretizzazione
70 h_values = [1/2, 1/4, 1/8, 1/16];
71 h_squared = h_values.^2;
72
73 % Calcola il polinomio interpolante usando le funzioni fornite
74 p0 = interpola_ruffini_horner(h_squared, I_values, 0);

```

```

75 % Visualizza il risultato dell'interpolazione per il punto (d) in
    formato long
76 disp('Risultato per il punto (d):');
77 disp(['p(0) = ', num2str(p0, '%.15f')]);
78 disp(['Confronto con il valore esatto I: ', num2str(I_exact, '%.15f')]);
79 disp(abs(p0-I_exact));
80 % Reset del formato al default per successive esecuzioni
81 format("default");

```

## Codice v2

Questo codice risolve il punto **(b)** andando a sostituire il valore di  $\varepsilon$  in modo corretto, ovvero non calcolando ogni volta il **miglior**  $n$

Usando `tic;toc` di MatLab notiamo una differenza significativa nel tempo di esecuzione del codice, che in questo caso è di soli 0.012795 sec.

### Problema 2 versione 2

```

1  % Definizione degli epsilon
2  epsilon_values = 10.^(-1:-1:-10); % {10^-1, 10^-2, ..., 10^-10}
3
4  % Funzione da integrare
5  f = @(x) exp(x);
6
7  % Intervallo di integrazione
8  a = 0;
9  b = 1;
10
11 % Valore esatto dell'integrale
12 I_exact = exp(1) - 1;
13
14 % Preallocazione per risultati
15 n_values = zeros(size(epsilon_values));
16 I_n_values = zeros(size(epsilon_values));
17 errors = zeros(size(epsilon_values));
18
19 % Calcolo di n e I_n
20 for i = 1:length(epsilon_values)
21     epsilon = epsilon_values(i);
22
23     % Calcolo di n (formula di stima dell'errore)
24     n = ceil(sqrt(exp(1) / (12 * epsilon)));
25     n_values(i) = n;
26
27     % Calcolo di I_n usando la formula dei trapezi
28     I_n = formulaTrapeziEs2(f, a, b, n);
29     error = abs(I_exact - I_n);
30     I_n_values(i) = I_n;
31     errors(i) = error;

```

```

32 end
33
34 % Visualizzazione dei risultati
35 disp('Epsilon      n      I_n      Error');
36 disp([epsilon_values(:), n_values(:), I_n_values(:), errors(:)]);
37

```

Questo codice risolve il punto **(d)** utilizzando il metodo dell'estrapolazione.

#### Punto (d)

```

1  % Vettore di n
2  n_vect = [2, 4, 8, 16];
3
4  % Estrapolazione polinomiale
5  p0 = estrapolazioneEs3(f, a, b, n_vect);
6
7  % Calcolo degli I_n e confronto con p(0)
8  I_n_values = zeros(size(n_vect));
9  errors = zeros(size(n_vect));
10
11 for i = 1:length(n_vect)
12     n = n_vect(i);
13     I_n_values(i) = formulaTrapeziEs2(f, a, b, n);
14     errors(i) = abs(I_exact - I_n_values(i));
15 end
16
17 % Confronto finale
18 disp('n      I_n      Error');
19 disp([n_vect(:), I_n_values(:), errors(:)]);
20
21 disp(['Valore estrapolato p(0): ', num2str(p0)]);
22 disp(['Errore tra p(0) e I esatto: ', num2str(abs(I_exact - p0))]);
23

```

## Problema 3

Consideriamo la funzione  $f(x) = x^2 e^{-x}$  e indichiamo con  $I_n$  la formula dei trapezi di ordine  $n$  per approssimare  $I = \int_0^1 f(x) dx$ .

**(a)** Calcolare  $I$  prima manualmente e poi con la funzione simbolica `int` di Matlab.

**(b)** Calcolare  $I_5$ ,  $I_{10}$ ,  $I_{20}$ ,  $I_{40}$ .

**(c)** Calcolare  $p(0)$ , dove  $p(x)$  è il polinomio d'interpolazione dei dati

$(h_0^2, I_5)$ ,  $(h_1^2, I_{10})$ ,  $(h_2^2, I_{20})$ ,  $(h_3^2, I_{40})$  e  $h_0, h_1, h_2, h_3$  sono i passi di discretizzazione delle formule dei trapezi  $I_5$ ,  $I_{10}$ ,  $I_{20}$ ,  $I_{40}$ .

**(d)** Riportare in una tabella:

- i valori  $I_5$ ,  $I_{10}$ ,  $I_{20}$ ,  $I_{40}$ ,  $p(0)$ ;



- gli errori  $|I_5 - I|$ ,  $|I_{10} - I|$ ,  $|I_{20} - I|$ ,  $|I_{40} - I|$ ,  $|p(0) - I|$ .

**(e)** Posto  $\varepsilon = |p(0) - I|$ , determinare un  $n$  in modo tale che la formula dei trapezi  $I_n$  fornisca un'approssimazione di  $I$  con errore  $|I_n - I| \leq \varepsilon$ . Calcolare successivamente  $I_n$  e verificare che effettivamente  $|I_n - I| \leq \varepsilon$ .

## Soluzione

### Punto (a)

#### Calcolo manuale (Integrazione per parti):

$$I = \int_0^1 x^2 e^{-x} dx$$

- Prima integrazione per parti ( $u = x^2$ ,  $dv = e^{-x} dx$ ):
  - $I = [-x^2 e^{-x}]_0^1 + \int_0^1 2x e^{-x} dx$ 
    - Primo termine:  $(-x^2 e^{-x})_0^1 = (-1^2 e^{-1} - 0) = -\frac{1}{e}$ .
    - Secondo termine:  $\int_0^1 2x e^{-x} dx$ .
- Seconda integrazione per parti ( $u = 2x$ ,  $dv = e^{-x} dx$ ):
  - $\int_0^1 2x e^{-x} dx = [-2x e^{-x}]_0^1 + \int_0^1 2 e^{-x} dx$
  - Primo termine:  $(-2x e^{-x})_0^1 = (-2e^{-1} - 0) = -\frac{2}{e}$ .
  - Secondo termine:  $\int_0^1 2 e^{-x} dx = -2e^{-x} \Big|_0^1 = -2e^{-1} + 2$ .

Riassumendo:

$$I = -\frac{1}{e} + \left( -\frac{2}{e} + \left( -\frac{2}{e} + 2 \right) \right) = 2 - \frac{5}{e}.$$

Il valore esatto è:

$$I = 2 - \frac{5}{e} \approx 0.1606027941$$

#### Calcolo simbolico

```
1  syms x
2  f = x^2 * exp(-x);
3  I_exact = int(f, 0, 1);
```

**Output:**

$$I = 1.606027941427884 \cdot 10^{-1}$$

### Punto (b)

Per calcolare  $I_n$ , usiamo la formula dei trapezi:

$$I_n = h \left( \frac{f(a) + f(b)}{2} + \sum_{i=1}^{n-1} f(a + ih) \right),$$

dove  $h = \frac{b-a}{n} = \frac{1}{n}$ .

```

1  % Funzione e intervallo
2  f = @(x) x.^2 .* exp(-x); % Definizione della funzione
3  a = 0;
4  b = 1;
5
6  % Calcolo delle approssimazioni con la formula dei trapezi
7  I_5 = formula_trapezi(f, a, b, 5);
8  I_10 = formula_trapezi(f, a, b, 10);
9  I_20 = formula_trapezi(f, a, b, 20);
10 I_40 = formula_trapezi(f, a, b, 40);
11
12 % Calcolo del valore esatto
13 I_exact = 2 - 5 / exp(1); % Valore calcolato analiticamente
14
15 % Calcolo degli errori
16 error_5 = abs(I_5 - I_exact);
17 error_10 = abs(I_10 - I_exact);
18 error_20 = abs(I_20 - I_exact);
19 error_40 = abs(I_40 - I_exact);
20
21 % Stampa dei risultati a schermo
22 fprintf('Risultati:\n');
23 fprintf('I_5    = %.10f, Errore = %.10f\n', I_5, error_5);
24 fprintf('I_10   = %.10f, Errore = %.10f\n', I_10, error_10);
25 fprintf('I_20   = %.10f, Errore = %.10f\n', I_20, error_20);
26 fprintf('I_40   = %.10f, Errore = %.10f\n', I_40, error_40);
27

```

Risultati :

$I_5 = 0.1618165768, \text{Errore} = 0.0012137827$

$I_{10} = 0.1609085786, \text{Errore} = 0.0003057845$

$I_{20} = 0.1606793868, \text{Errore} = 0.0000765927$

$I_{40} = 0.1606219515, \text{Errore} = 0.0000191573$

**Punto (c)**

Dati i nodi  $(h^2, I_n)$ , con:

$$h_0^2 = \left(\frac{1}{5}\right)^2, \quad h_1^2 = \left(\frac{1}{10}\right)^2, \quad h_2^2 = \left(\frac{1}{20}\right)^2, \quad h_3^2 = \left(\frac{1}{40}\right)^2$$

$$x = [0.04, 0.01, 0.0025, 0.000625], \quad y = [I_5, I_{10}, I_{20}, I_{40}]$$

Usiamo il metodo di Ruffini-Horner per interpolare  $p(x)$  e valutiamo  $p(0)$ .

```

1  % Interpolazione dei nodi (h^2, I_n)
2  x = [0.04, 0.01, 0.0025, 0.000625]; % h^2 valori (passi quadratici)
3  y = [I_5, I_10, I_20, I_40]; % Valori approssimati
4
5  % Calcolo del valore interpolato p(0)
6  p_0 = interpolaRuffiniHornerEs1(x, y, 0);
7
8  % Calcolo errore di interpolazione
9  error_p0 = abs(p_0 - I_exact);
10
11 % Stampa dei risultati dell'interpolazione
12 fprintf('\nInterpolazione:\n');
13 fprintf('p(0) = %.10f, Errore = %.10f\n', p_0, error_p0);

```

Il valore di  $p(0)$  è quindi

$$p(0) = 1.606027941428046 \cdot 10^{-1}$$

### Punto (d)

Tabella dei risultati:

$n$	$I_n$	$I_n - I_{\text{exact}}$
5	$1.618165768206828 \cdot 10^{-1}$	$1.213782677894459 \cdot 10^{-3}$
10	$1.609085786320963 \cdot 10^{-1}$	$3.057844893079031 \cdot 10^{-4}$
20	$1.606793868113391 \cdot 10^{-1}$	$7.659266855072899 \cdot 10^{-5}$
40	$1.606219514748572 \cdot 10^{-1}$	$1.915733206886427 \cdot 10^{-5}$
$p(0)$	$1.606027941428046 \cdot 10^{-1}$	$1.618150058391166 \cdot 10^{-14}$

### Punto (e)

Preso  $\varepsilon = |p(0) - I|$ , per trovare un  $n = n_\varepsilon$  tale che  $|I - I_n| \leq \varepsilon$  bisogna fare così

Per il teorema sull'errore o resto della formula dei trapezi, abbiamo che

$$\left| \int_0^1 x^2 e^{-x} dx - I_n \right| = \left| -\frac{f''(\eta) \cdot 1}{12n^2} \right| = \frac{|f''(\eta)|}{12n^2}, \quad \eta \in [0, 1]$$

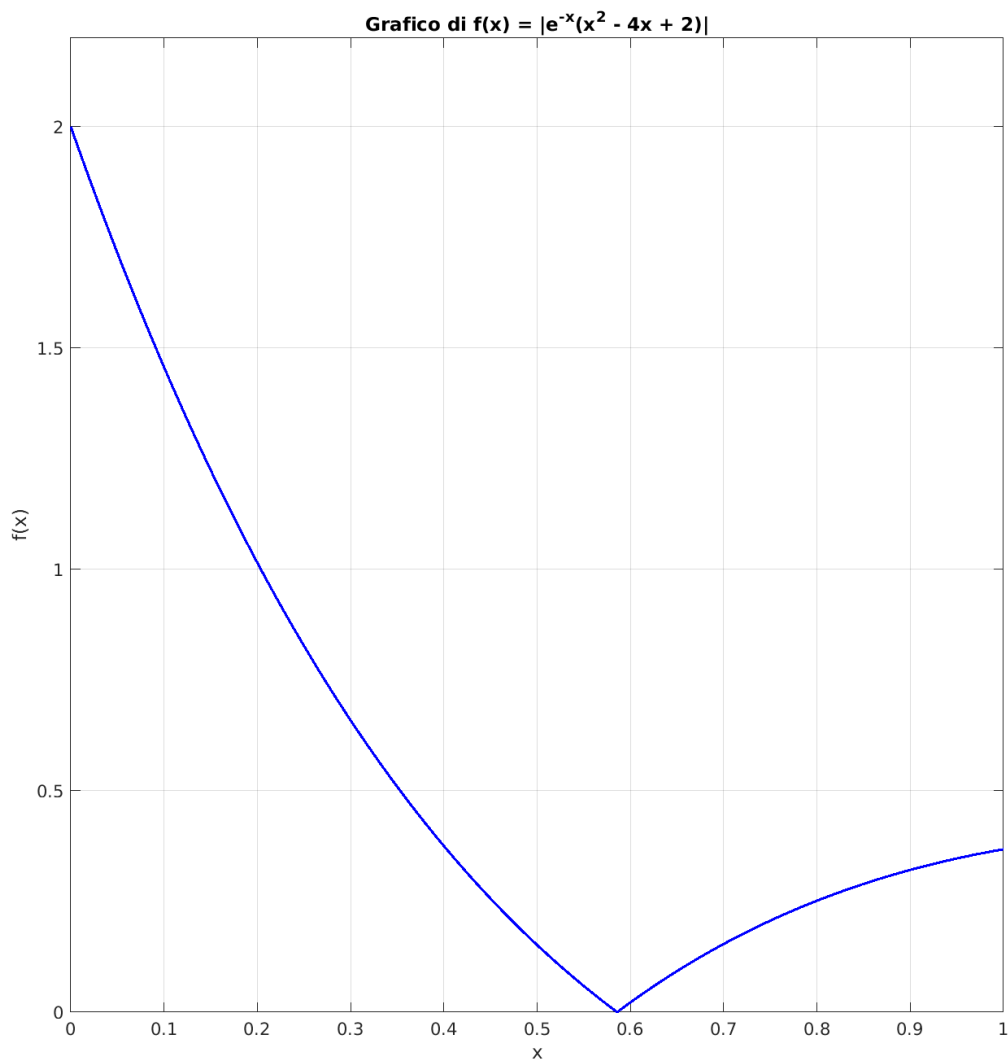
Calcoliamo  $f''(x)$  :

$$\begin{aligned} f'(x) &= 2xe^{-x} - x^2e^{-x} \\ f''(x) &= e^{-x}(x^2 - 4x + 2) \end{aligned}$$

per ogni  $x \in [0, 1]$  si ha che:

$$|f''(x)| = |e^{-x}(x^2 - 4x + 2)| \leq 2$$

Questo lo possiamo verificare guardando il grafico di  $|f''(x)|$ , che è il seguente



Quindi, possiamo scrivere

$$\left| \int_0^1 x^2 e^{-x} dx - I_n \right| \leq \frac{2}{12n^2}$$

E infine

$$\frac{2}{12n^2} \leq \varepsilon \iff n \geq \sqrt{\frac{2}{12\varepsilon}} = n(\varepsilon)$$

Quindi, dato che  $\varepsilon = 1.62 \cdot 10^{-14}$ ,  $n = n(\varepsilon) \geq 3.2075 \cdot 10^6$

## Codice

```

1
2 % Punto (a): Calcolo dell'integrale esatto
3 syms x;
4 f_sym = x^2 * exp(-x); % Funzione simbolica
5 I_exact = double(int(f_sym, 0, 1)); % Calcolo simbolico del valore
    esatto
6 fprintf('Punto (a):\n');
7 fprintf('Valore esatto dell\'integrale I = %.10f\n\n', I_exact);
8
9 % Definizione della funzione come funzione anonima
10 f = @(x) x.^2 .* exp(-x);
11
12 % Punto (b): Calcolo di I_5, I_10, I_20, I_40
13
14 I_5 = formula_trapezi(f, 0, 1, 5);
15 I_10 = formula_trapezi(f, 0, 1, 10);
16 I_20 = formula_trapezi(f, 0, 1, 20);
17 I_40 = formula_trapezi(f, 0, 1, 40);
18
19 fprintf('Punto (b):\n');
20 fprintf('I_5 = %.10f\n', I_5);
21 fprintf('I_10 = %.10f\n', I_10);
22 fprintf('I_20 = %.10f\n', I_20);
23 fprintf('I_40 = %.10f\n\n', I_40);
24
25
26 % Punto (c): Interpolazione di p(0)
27 % Passi h e h^2
28 h = [1/5, 1/10, 1/20, 1/40]; % Passi di discretizzazione
29 h2 = h.^2; % h^2 per interpolazione
30 I_values = [I_5, I_10, I_20, I_40]; % Valori I_5, I_10, I_20, I_40
31
32 % Calcolo del polinomio interpolante tramite interpolaRuffiniHornerEs1
33 p_coeff = interpolaRuffiniHornerEs1(h2, I_values); % Coefficienti del
    polinomio
34 p_0 = p_coeff(end); % Valore di p(0), cioè il termine noto
35 fprintf('Punto (c):\n');
36 fprintf('Valore interpolato p(0) = %.10f\n\n', p_0);
37
38 % Punto (d): Tabella dei risultati
39 % Errori calcolati
40 error_5 = abs(I_5 - I_exact);

```

```

41 error_10 = abs(I_10 - I_exact);
42 error_20 = abs(I_20 - I_exact);
43 error_40 = abs(I_40 - I_exact);
44 error_p0 = abs(p_0 - I_exact);
45
46 fprintf('Punto (d): Tabella dei risultati\n');
47 fprintf('n          I_n          |I_n - I_exact|\n');
48 fprintf('%-9d %.10f %.10f\n', 5, I_5, error_5);
49 fprintf('%-9d %.10f %.10f\n', 10, I_10, error_10);
50 fprintf('%-9d %.10f %.10f\n', 20, I_20, error_20);
51 fprintf('%-9d %.10f %.10f\n', 40, I_40, error_40);
52 fprintf('p(0)          %.10f %.10f\n\n', p_0, error_p0);

```

## Problema 4

Si consideri il sistema lineare  $Ax = b$ , dove:

$$A = \begin{bmatrix} 5 & 1 & 2 \\ -1 & 7 & 1 \\ 0 & 1 & -3 \end{bmatrix}, b = \begin{bmatrix} 13 \\ 16 \\ -7 \end{bmatrix}.$$

**(a)** Si calcoli la soluzione  $x$  del sistema dato con **MATLAB**.

**(b)** La matrice  $A$  è a diagonale dominante in senso stretto per cui il metodo di Jacobi è convergente ossia partendo da un qualsiasi vettore d'innescio  $x^{(0)}$  la successione prodotta dal metodo di Jacobi converge (componente per componente) alla soluzione  $x$  del sistema dato. Calcolare le prime 10 iterazioni  $x^{(1)}, \dots, x^{(10)}$  del metodo di Jacobi partendo dal vettore nullo  $x^{(0)} = [0, 0, 0]^T$  e confrontarle con la soluzione esatta  $x$  ponendo iterazioni e soluzione esatta in un'unica matrice  $S$  di dimensioni  $3 \times 12$  le cui colonne sono nell'ordine  $x^{(0)}, x^{(1)}, \dots, x^{(10)}, x$ .

**(c)** Consideriamo il metodo di Jacobi per risolvere il sistema dato. Conveniamo d'innescare il metodo di Jacobi con il vettore nullo  $x^{(0)} = [0, 0, 0]^T$ . Costruire una tabella che riporti vicino ad ogni  $\varepsilon \in \{10^{-1}, 10^{-2}, \dots, 10^{-10}\}$ :

- il numero d'iterazioni  $K_\varepsilon$  necessarie al metodo di Jacobi per convergere entro la precisione  $\varepsilon$ ;
- la soluzione approssimata  $x_\varepsilon$  calcolata dal metodo di Jacobi;
- la soluzione esatta  $x$  (in modo da confrontarla con la soluzione approssimata  $x_\varepsilon$ );
- la norma  $\infty$  dell'errore  $\|x - x_\varepsilon\|_\infty$ .

## Soluzione

### Punto (a)

La soluzione al sistema lineare  $Ax = b$ , trovata con MATLAB è la seguente :

$$x = \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{bmatrix}$$

Il codice MATLAB per fare ciò è il seguente :

```
1  A = [5, 1, 2; -1, 7, 1; 0, 1, -3];
2  b = [13; 16; -7];
3
4  x_exact = A \ b; % Soluzione esatta
```

### Punto (b)

La matrice  $S$  di dimensione  $3 \times 12$  contenente le prime 10 iterazioni del metodo di Jacobi è la seguente :

Abbiamo diviso la matrice  $S$  in due matrici, ognuna contenente 6 colonne per maggior chiarezza.

$$S_1 = \begin{bmatrix} 0.0000000 & 2.6000000 & 1.2095238 & 0.8971429 & 0.9535601 & 1.0038458 \\ 0.0000000 & 2.2857143 & 2.3238095 & 2.0163265 & 1.9698866 & 1.9925883 \\ 0.0000000 & 2.3333333 & 3.0952381 & 3.1079365 & 3.0054422 & 2.9899622 \end{bmatrix}$$

$$S_2 = \begin{bmatrix} 1.0054975 & 1.0005916 & 0.9995079 & 0.9998502 & 1.0000262 & 1.0000000 \\ 2.0019834 & 2.0011383 & 1.9999901 & 1.9998755 & 1.9999791 & 2.0000000 \\ 2.9975294 & 3.0006611 & 3.0003794 & 2.9999967 & 2.9999585 & 3.0000000 \end{bmatrix}$$

### Punto (c)

Tabella riportante le soluzioni fornite dal metodo di Jacobi, per ogni  $\varepsilon$  richiesto

$\varepsilon$	$K_\varepsilon$	Soluzione approssimata $x_\varepsilon$	Soluzione esatta $x$	$\ x - x_\varepsilon\ _\infty$
$10^{-1}$	3	$x_\varepsilon = \begin{bmatrix} 0.8971429 \\ 2.0163265 \\ 3.1079365 \end{bmatrix}$	$x = \begin{bmatrix} 1.0000000 \\ 2.0000000 \\ 3.0000000 \end{bmatrix}$	$1.079365 \cdot 10^{-1}$
$10^{-2}$	5	$x_\varepsilon = \begin{bmatrix} 1.0038458 \\ 1.9925883 \\ 2.9899622 \end{bmatrix}$	$x = \begin{bmatrix} 1.0000000 \\ 2.0000000 \\ 3.0000000 \end{bmatrix}$	$1.003779 \cdot 10^{-2}$
$10^{-3}$	7	$x_\varepsilon = \begin{bmatrix} 1.0005916 \\ 2.0011383 \\ 3.0006611 \end{bmatrix}$	$x = \begin{bmatrix} 1.0000000 \\ 2.0000000 \\ 3.0000000 \end{bmatrix}$	$1.138291 \cdot 10^{-3}$
$10^{-4}$	9	$x_\varepsilon = \begin{bmatrix} 0.9998502 \\ 1.9998755 \\ 2.9999967 \end{bmatrix}$	$x = \begin{bmatrix} 1.0000000 \\ 2.0000000 \\ 3.0000000 \end{bmatrix}$	$1.497845 \cdot 10^{-4}$
$10^{-5}$	11	$x_\varepsilon = \begin{bmatrix} 1.0000208 \\ 2.0000097 \\ 2.9999930 \end{bmatrix}$	$x = \begin{bmatrix} 1.0000000 \\ 2.0000000 \\ 3.0000000 \end{bmatrix}$	$2.078563 \cdot 10^{-5}$
$10^{-6}$	13	$x_\varepsilon = \begin{bmatrix} 0.9999979 \\ 1.9999997 \\ 3.0000013 \end{bmatrix}$	$x = \begin{bmatrix} 1.0000000 \\ 2.0000000 \\ 3.0000000 \end{bmatrix}$	$2.083214 \cdot 10^{-6}$
$10^{-7}$	15	$x_\varepsilon = \begin{bmatrix} 1.0000001 \\ 2.0000000 \\ 2.9999998 \end{bmatrix}$	$x = \begin{bmatrix} 1.0000000 \\ 2.0000000 \\ 3.0000000 \end{bmatrix}$	$1.621496 \cdot 10^{-7}$
$10^{-8}$	17	$x_\varepsilon = \begin{bmatrix} 1.0000000 \\ 2.0000000 \\ 3.0000000 \end{bmatrix}$	$x = \begin{bmatrix} 1.0000000 \\ 2.0000000 \\ 3.0000000 \end{bmatrix}$	$1.450418 \cdot 10^{-8}$
$10^{-9}$	19	$x_\varepsilon = \begin{bmatrix} 1.0000000 \\ 2.0000000 \\ 3.0000000 \end{bmatrix}$	$x = \begin{bmatrix} 1.0000000 \\ 2.0000000 \\ 3.0000000 \end{bmatrix}$	$1.823506 \cdot 10^{-9}$
$10^{-10}$	21	$x_\varepsilon = \begin{bmatrix} 1.0000000 \\ 2.0000000 \\ 3.0000000 \end{bmatrix}$	$x = \begin{bmatrix} 1.0000000 \\ 2.0000000 \\ 3.0000000 \end{bmatrix}$	$2.567879 \cdot 10^{-10}$

## Codice

### Problema 2.4

```

1  % Dati del problema
2  A = [5, 1, 2; -1, 7, 1; 0, 1, -3];
3  b = [13; 16; -7];
4
5  % Punto (a): Soluzione esatta del sistema
6  x_exact = A \ b; % Soluzione esatta
7  disp('Soluzione esatta:');
8  disp(x_exact);
9
10 % Punto (b): Metodo di Jacobi per le prime 10 iterazioni
11 x0 = [0; 0; 0]; % Vettore iniziale

```



```

12 N_iter = 10; % Numero di iterazioni
13 n = length(b);
14 X_iterations = zeros(n, N_iter+2); % Matrice per conservare le
    iterazioni
15 X_iterations(:, 1) = x0; % Inizializzazione con x^(0)
16
17 for k = 1:N_iter
18     x_new = zeros(n, 1);
19     for i = 1:n
20         sum1 = A(i, 1:i-1) * X_iterations(1:i-1, k);
21         sum2 = A(i, i+1:n) * X_iterations(i+1:n, k);
22         x_new(i) = (b(i) - sum1 - sum2) / A(i, i);
23     end
24     X_iterations(:, k+1) = x_new;
25 end
26 X_iterations(:, end) = x_exact; % Aggiunge la soluzione esatta come
    ultima colonna
27
28 disp('Iterazioni del metodo di Jacobi (prime 10):');
29 disp(X_iterations);
30
31 % Punto (c): Metodo di Jacobi con variazione della precisione
32 epsilons = 10.^(-1:-1:-10); % Precisioni {10^-1, ..., 10^-10}
33 N_max = 1000; % Numero massimo di iterazioni
34 results = []; % Per conservare i risultati
35
36 for epsilon = epsilons
37     [x_approx, K, r_norm] = jacobi_method(A, b, x0, epsilon, N_max);
38     error_norm = norm(x_exact - x_approx, inf); % Norma dell'errore
    infinito
39     results = [results; struct('epsilon', epsilon, 'K', K, 'x_approx',
    x_approx, ...
40                               'error_norm', error_norm)];
41 end
42
43 % Stampa dei risultati in formato tabella
44 disp('Tabella dei risultati per le varie precisioni:');
45 disp('Epsilon | Iterazioni K | x_epsilon | Norma
    errore ||x - x_approx||_inf');
46 for i = 1:length(results)
47     r = results(i);
48     fprintf('%.1e|%3d|[%7.4f, %7.4f, %7.4f]|%e\n', ...
49             r.epsilon, r.K, r.x_approx(1), r.x_approx(2), r.x_approx(3),
    r.error_norm);
50 end

```

## Problema 5

Si consideri il sistema lineare  $A_n x = b_n$ , dove  $b_n = [1, 1, \dots, 1]^T$  e  $A_n$  è la matrice  $n \times n$  definita nel modo seguente:

$$(A_n)_{ij} = \begin{cases} 3, & \text{se } i = j, \\ -\left(\frac{1}{2}\right)^{\max(i,j)-1}, & \text{se } i \neq j. \end{cases}$$

- (a) Scrivere esplicitamente  $A_n$  per  $n = 5$ .
- (b) Dimostrare che, qualunque sia  $n$ ,  $A_n$  è una matrice a diagonale dominante in senso stretto per righe e per colonne. Dedurre che i metodi di Jacobi e Gauss-Seidel per risolvere un sistema lineare di matrice  $A_n$  sono convergenti.
- (c) Risolvere con il comando `\` il sistema lineare  $A_n x = b_n$  per  $n = 5, 10, 20$ .
- (d) Risolvere il sistema lineare  $A_n x = b_n$  per  $n = 5, 10, 20$  con i metodi di Jacobi e Gauss-Seidel entro una soglia di precisione  $\varepsilon = 10^{-7}$ , partendo dal vettore d'innescio  $x^{(0)} = 0$ .
- (e) Costruire una tabella che, vicino ad ogni  $n = 5, 10, 20$ , riporti:
- la soluzione esatta  $x$  del sistema  $A_n x = b_n$  ottenuta al punto (c);
  - le soluzioni approssimate  $x_J$  e  $x_G$  ottenute con i metodi di Jacobi e Gauss-Seidel al punto (d);
  - gli errori  $\|x_J - x\|_\infty$  e  $\|x_G - x\|_\infty$ ;
  - i numeri  $K_J$  e  $K_G$ , che contano le iterazioni effettuate da Jacobi e Gauss-Seidel per calcolare  $x_J$  e  $x_G$ , rispettivamente.

## Soluzione

### Punto (a)

La matrice  $A_n$  è definita come:

$$(A_n)_{ij} = \begin{cases} 3, & i = j \\ -\left(\frac{1}{2}\right)^{\max(i,j)-1}, & i \neq j \end{cases}$$

Per  $n = 5$  la matrice  $A_5$  è:

$$A_5 = \begin{bmatrix} 3 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{4} & -\frac{1}{8} & -\frac{1}{16} \\ -\frac{1}{2} & 3 & -\frac{1}{4} & -\frac{1}{8} & -\frac{1}{16} \\ -\frac{1}{4} & -\frac{1}{4} & 3 & -\frac{1}{8} & -\frac{1}{16} \\ -\frac{1}{8} & -\frac{1}{8} & -\frac{1}{8} & 3 & -\frac{1}{16} \\ -\frac{1}{16} & -\frac{1}{16} & -\frac{1}{16} & -\frac{1}{16} & 3 \end{bmatrix}.$$

### Punto (b)

Una matrice  $A \in \mathbb{C}^{n \times n}$  è definita:

- A diagonale dominante in senso stretto (per righe) se  $|a_{ii}| > \sum_{j \neq i} |a_{ij}|$  per ogni  $i = 1, \dots, n$

- A diagonale dominante in senso stretto (per colonne) se  $|a_{jj}| > \sum_{i \neq j} |a_{ij}|$  per ogni  $i = 1, \dots, n$

Data la matrice  $A_5$ , si nota che essa è a diagonale dominante in senso stretto sia per righe che per colonne.

Infatti preso  $|a_{ii}| = |a_{jj}| = |3|, \forall i, j$ , abbiamo che

$$|a_{ii}| > \sum_{j \neq i} |a_{ij}|, \text{ con } |a_{ij}| = \left(\frac{1}{2}\right)^{\max(i,j)-1}$$

$$|a_{jj}| > \sum_{i \neq j} |a_{ij}|, \text{ con } |a_{ij}| = \left(\frac{1}{2}\right)^{\max(i,j)-1}$$

Dimostriamo che la matrice  $A_5$  è a diagonale dominante:

La condizione di dominanza diagonale per righe richiede che:

$$|A_{ii}| > \sum_{j \neq i} |A_{ij}|.$$

Nel nostro caso:

- $|A_{ii}| = 3$ .
- La somma  $\sum_{j \neq i} |A_{ij}|$  si divide in due parti:
  - **Prima della diagonale** ( $j < i$ ): tutti i termini sono uguali a  $\left(\frac{1}{2}\right)^{i-1}$ .
  - **Dopo la diagonale** ( $j > i$ ): i termini sono della forma  $\left(\frac{1}{2}\right)^i, \left(\frac{1}{2}\right)^{i+1}, \dots$

Pertanto, possiamo scrivere:

$$\sum_{j \neq i} |A_{ij}| = \underbrace{(i-1) \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{i-1}}_{\text{prima della diagonale}} + \underbrace{\sum_{k=0}^{n-i-1} \left(\frac{1}{2}\right)^{i+k}}_{\text{dopo la diagonale}}.$$

**Analisi prima parte:**

La somma degli elementi prima della diagonale è:

$$(i-1) \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{i-1}.$$

**Analisi seconda parte:**

Gli elementi dopo la diagonale formano una serie geometrica:

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

Usando la formula per la somma di una serie geometrica:

$$\sum_{k=0}^m r^k = \frac{1 - r^{m+1}}{1 - r},$$

qui  $r = \frac{1}{2}$ ,  $m = n - i - 1$ , e il primo termine della serie è  $\left(\frac{1}{2}\right)^i$ .

Quindi otteniamo che:

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

Combinando le due parti, otteniamo:

$$\sum_{j \neq i} |A_{ij}| = (i-1) \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{i-1} + 2 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^i \cdot \left(1 - \left(\frac{1}{2}\right)^{n-i}\right).$$

Di conseguenza, la condizione di dominanza diagonale per righe  $|A_{ii}| > \sum_{j \neq i} |A_{ij}|$  diventa:

$$3 > (i-1) \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{i-1} + 2 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^i \cdot \left(1 - \left(\frac{1}{2}\right)^{n-i}\right).$$

### Verifica

Per  $i = 1$  :

$$3 > 0 + 2 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^1 \cdot \left(1 - \left(\frac{1}{2}\right)^{n-1}\right)$$

La disuguaglianza è soddisfatta poiché il lato destro è minore di 1.

Per  $i = n$ :

$$3 > (n-1) \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{n-1}.$$

Anche qui la disuguaglianza è verificata perché  $\left(\frac{1}{2}\right)^{n-1}$  decresce rapidamente.

In generale, la disuguaglianza è verificata per ogni  $i$ , dimostrando che  $A_n$  è diagonale dominante per righe.

Usando i **teoremi di convergenza**, sappiamo che i metodi di Jacobi e Gauss-Seidel convergono se la matrice  $A \in \mathbb{C}^{n \times n}$  soddisfa almeno una delle seguenti condizioni :

- $A$  è a diagonale dominante e irriducibile
- $A$  è a diagonale dominante in senso stretto per righe
- $A$  è a diagonale dominante per colonne e irriducibile
- $A$  è a diagonale dominante in senso stretto per colonne

Abbiamo dimostrato che  $A_5$  rispetta sia la seconda che quarta condizione, quindi i metodi di Jacobi e Gauss-Seidel applicati alla matrice  $A_5$  convergono.

### Punto (c)

Per  $n = 5$ , il risultato del sistema  $A_5 x = b_5$  è :

$$x = \begin{bmatrix} 4.728395611573806 \cdot 10^{-1} \\ 4.728395611573807 \cdot 10^{-1} \\ 4.364672872221975 \cdot 10^{-1} \\ 3.986401223296070 \cdot 10^{-1} \\ 3.704330527472200 \cdot 10^{-1} \end{bmatrix}$$

Per  $n = 10$ , il risultato del sistema  $A_{10} x = b_{10}$  è :

$$x = \begin{bmatrix} 4.829209469162112 \cdot 10^{-1} \\ 4.829209469162111 \cdot 10^{-1} \\ 4.457731817688103 \cdot 10^{-1} \\ 4.071395060155133 \cdot 10^{-1} \\ 3.783310350848758 \cdot 10^{-1} \\ 3.595809878517137 \cdot 10^{-1} \\ 3.481971245527415 \cdot 10^{-1} \\ 3.415564320733823 \cdot 10^{-1} \\ 3.377789759887189 \cdot 10^{-1} \\ 3.356667963132605 \cdot 10^{-1} \end{bmatrix}$$

del sistema  $A_{20} x = b_{20}$  è :

$$x = \begin{bmatrix} 4.832359353604220 \cdot 10^{-1} \\ 4.832359353604221 \cdot 10^{-1} \\ 4.460639403326973 \cdot 10^{-1} \\ 4.074050655038636 \cdot 10^{-1} \\ 3.785778040537910 \cdot 10^{-1} \\ 3.598155269758799 \cdot 10^{-1} \\ 3.484242384753038 \cdot 10^{-1} \\ 3.417792145594933 \cdot 10^{-1} \\ 3.379992946036253 \cdot 10^{-1} \\ 3.358857372447301 \cdot 10^{-1} \\ 3.347186246657436 \cdot 10^{-1} \\ 3.340803134057811 \cdot 10^{-1} \\ 3.337338945501267 \cdot 10^{-1} \\ 3.335470848650332 \cdot 10^{-1} \\ 3.334468884268689 \cdot 10^{-1} \\ 3.333933967162749 \cdot 10^{-1} \\ 3.333649547349902 \cdot 10^{-1} \\ 3.333498858470857 \cdot 10^{-1} \\ 3.333419274986317 \cdot 10^{-1} \\ 3.333377363838597 \cdot 10^{-1} \end{bmatrix}$$

**Punto (d)**

n	Metodo	Soluzione $x_J/x_G$
5	Jacobi	$x_J = \begin{bmatrix} 4.7284 \cdot 10^{-1} \\ 4.7284 \cdot 10^{-1} \\ 4.3647 \cdot 10^{-1} \\ 3.9864 \cdot 10^{-1} \\ 3.7043 \cdot 10^{-1} \end{bmatrix}$
5	Gauss-Seidel	$x_G = \begin{bmatrix} 4.7284 \cdot 10^{-1} \\ 4.7284 \cdot 10^{-1} \\ 4.3647 \cdot 10^{-1} \\ 3.9864 \cdot 10^{-1} \\ 3.7043 \cdot 10^{-1} \end{bmatrix}$

n	Metodo	Soluzione $x_J/x_G$
10	Jacobi	$x_J = \begin{bmatrix} 4.8292 \cdot 10^{-1} \\ 4.8292 \cdot 10^{-1} \\ 4.4577 \cdot 10^{-1} \\ 4.0714 \cdot 10^{-1} \\ 3.7833 \cdot 10^{-1} \\ 3.5958 \cdot 10^{-1} \\ 3.4820 \cdot 10^{-1} \\ 3.4156 \cdot 10^{-1} \\ 3.3778 \cdot 10^{-1} \\ 3.3567 \cdot 10^{-1} \end{bmatrix}$
10	Gauss-Seidel	$x_G = \begin{bmatrix} 4.8292 \cdot 10^{-1} \\ 4.8292 \cdot 10^{-1} \\ 4.4577 \cdot 10^{-1} \\ 4.0714 \cdot 10^{-1} \\ 3.7833 \cdot 10^{-1} \\ 3.5958 \cdot 10^{-1} \\ 3.4820 \cdot 10^{-1} \\ 3.4156 \cdot 10^{-1} \\ 3.3778 \cdot 10^{-1} \\ 3.3567 \cdot 10^{-1} \end{bmatrix}$
20	Jacobi	$x_J = \begin{bmatrix} 4.8324 \cdot 10^{-1} \\ 4.8324 \cdot 10^{-1} \\ 4.4606 \cdot 10^{-1} \\ 4.0741 \cdot 10^{-1} \\ 3.7858 \cdot 10^{-1} \\ 3.5982 \cdot 10^{-1} \\ 3.4842 \cdot 10^{-1} \\ 3.4178 \cdot 10^{-1} \\ 3.3800 \cdot 10^{-1} \\ 3.3589 \cdot 10^{-1} \\ 3.3472 \cdot 10^{-1} \\ 3.3408 \cdot 10^{-1} \\ 3.3373 \cdot 10^{-1} \\ 3.3355 \cdot 10^{-1} \\ 3.3345 \cdot 10^{-1} \\ 3.3339 \cdot 10^{-1} \\ 3.3336 \cdot 10^{-1} \\ 3.3335 \cdot 10^{-1} \\ 3.3334 \cdot 10^{-1} \\ 3.3334 \cdot 10^{-1} \end{bmatrix}$

n	Metodo	Soluzione $x_J/x_G$
20	Gauss-Seidel	$x_G = \begin{bmatrix} 4.8324 \cdot 10^{-1} \\ 4.8324 \cdot 10^{-1} \\ 4.4606 \cdot 10^{-1} \\ 4.0741 \cdot 10^{-1} \\ 3.7858 \cdot 10^{-1} \\ 3.5982 \cdot 10^{-1} \\ 3.4842 \cdot 10^{-1} \\ 3.4178 \cdot 10^{-1} \\ 3.3800 \cdot 10^{-1} \\ 3.3589 \cdot 10^{-1} \\ 3.3472 \cdot 10^{-1} \\ 3.3408 \cdot 10^{-1} \\ 3.3373 \cdot 10^{-1} \\ 3.3355 \cdot 10^{-1} \\ 3.3345 \cdot 10^{-1} \\ 3.3339 \cdot 10^{-1} \\ 3.3336 \cdot 10^{-1} \\ 3.3335 \cdot 10^{-1} \\ 3.3334 \cdot 10^{-1} \\ 3.3334 \cdot 10^{-1} \end{bmatrix}$

Punto (e)

La tabella è la seguente

n	Metodo	Iterazioni	Norma errore $\ x - x_J/x_G\ _\infty$
5	Jacobi	12	$4.051786 \times 10^{-8}$
5	Gauss-Seidel	7	$6.545649 \times 10^{-8}$
10	Jacobi	12	$4.884032 \times 10^{-8}$
10	Gauss-Seidel	7	$9.323449 \times 10^{-8}$
20	Jacobi	12	$4.897032 \times 10^{-8}$
20	Gauss-Seidel	7	$9.398408 \times 10^{-8}$

Codice

Problema 2.5

```
1 % Parametri del problema
2 n_values = [5, 10, 20];
3 epsilon = 1e-7;
```



```

4  N_max = 500;
5
6  % Inizializza output per le tabelle
7  tabella1 = "";
8  tabella2 = "";
9
10 % Genera i risultati per entrambe le tabelle
11 for n = n_values
12     % Genera sistema
13     [A, b] = generate_system(n);
14
15     % Soluzione esatta
16     x_exact = A \ b;
17
18     % Jacobi
19     [x_J, K_J, ~] = JacobiIterativo(A, b, zeros(n, 1), epsilon, N_max);
20     error_J = norm(x_exact - x_J, inf);
21
22     % Gauss-Seidel
23     [x_G, K_G, ~] = GaussSeidelIt(A, b, zeros(n, 1), epsilon, N_max);
24     error_G = norm(x_exact - x_G, inf);
25
26     % Aggiorna Tabella 1
27     tabella1 = tabella1 + sprintf('%2d | Jacobi          | [%s]\n', n,
num2str(x_J, '%.4e '));
28     tabella1 = tabella1 + sprintf('%2d | Gauss-Seidel   | [%s]\n', n,
num2str(x_G, '%.4e '));
29
30     % Aggiorna Tabella 2
31     tabella2 = tabella2 + sprintf('%2d | Jacobi          | %3d          |
%e\n', n, K_J, error_J);
32     tabella2 = tabella2 + sprintf('%2d | Gauss-Seidel   | %3d          |
%e\n', n, K_G, error_G);
33 end
34
35 % Stampa Tabella 1
36 fprintf('Tabella 1: Soluzioni approssimate (x_J e x_G)\n');
37 fprintf(' n | Metodo          | Soluzione x_J/x_G\n');
38 fprintf('-----\n');
39 fprintf('%s', tabella1);
40
41 % Stampa Tabella 2
42 fprintf('\nTabella 2: Iterazioni e norma dell errore\n');
43 fprintf(' n | Metodo          | Iterazioni | Norma errore ||x -
x_J/x_G||_inf\n');
44 fprintf('-----\n');
45 fprintf('%s', tabella2);
46
47 function [A, b] = generate_system(n)

```

```

48     A = zeros(n);
49     b = ones(n, 1);
50
51     for i = 1:n
52         for j = 1:n
53             if i == j
54                 A(i,j) = 3;
55             else
56                 A(i,j) = -0.5^(max(i,j)-1);
57             end
58         end
59     end
60 end

```

## Problema 6

Consideriamo i seguenti due casi:

- $f(x) = x^3 + 3x - 1 - e^{-x^2}$ ,  $[a, b] = [0, 1]$ ;
- $f(x) = \cos x - x$ ,  $[a, b] = [0, \pi]$ .

Per ciascuno di questi due casi, risolvere i seguenti punti.

**(a)** Verificare che  $f(a)f(b) < 0$ .

**(b)** Tracciare il grafico di  $f(x)$  su  $[a, b]$  e verificare che  $f(x)$  ha un unico zero  $\zeta$  nell'intervallo  $(a, b)$ .

**(c)** Dimostrare analiticamente che  $f(x)$  ha un'unico zero  $\zeta$  nell'intervallo  $(a, b)$ .

**(d)** Costruire una tabella che riporti vicino ad ogni  $\varepsilon \in \{10^{-1}, 10^{-2}, \dots, 10^{-10}\}$ :

- un'approssimazione  $\xi_\varepsilon$  di  $\zeta$ , calcolata con il metodo di bisezione, che soddisfa  $|\xi_\varepsilon - \zeta| \leq \varepsilon$ ;
- il numero d'iterazioni  $K_\varepsilon$  effettuate dal metodo di bisezione per calcolare l'approssimazione  $\xi_\varepsilon$ ;
- il valore  $f(\xi_\varepsilon)$ .

## Soluzione

### Caso 1

$$f(x) = x^3 + 3x - 1 - e^{-x^2}, [a, b] = [0, 1]$$

**Punto (a): Verifica che  $f(a)f(b) < 0$**

1. Calcoliamo  $f(a)$  e  $f(b)$ :

- $f(0) = 0^3 + 3(0) - 1 - e^{-0^2} = -1 - 1 = -2$ ,
- $f(1) = 1^3 + 3(1) - 1 - e^{-1^2} = 1 + 3 - 1 - e^{-1} = 3 - e^{-1} \approx 2.63$ .

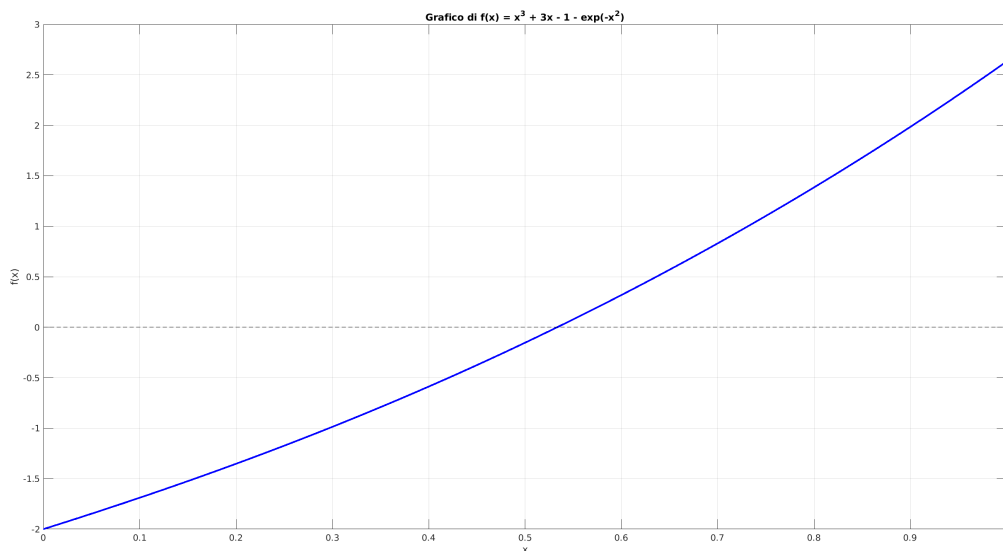
2. Poiché  $f(0) \cdot f(1) < 0$ , (risulta  $-2 \cdot 2,63 = -5,26$ ) possiamo procedere.

**Punto (b): Grafico di  $f(x)$  e verifica di uno zero unico**

Tracciamo il grafico di  $f(x)$  su  $[0, 1]$  con MATLAB per osservare che  $f(x)$  ha un unico zero nell'intervallo  $(0, 1)$ . Il codice MATLAB è il seguente:

```
1  f = @(x) x.^3 + 3.*x - 1 - exp(-x.^2);
2  x = linspace(0, 1, 1000); % 1000 punti nell'intervallo [0, 1]
3  plot(x, f(x), 'b-', 'LineWidth', 2);
4  grid on;
5  xlabel('x');
6  ylabel('f(x)');
7  title('Grafico di f(x) = x^3 + 3x - 1 - e^{-x^2}');
```

**Analisi:** Osservando il grafico, si nota che  $f(x)$  è continuo e cambia segno una sola volta tra 0 e 1.

**Punto (c): Dimostrazione analitica che  $f(x)$  ha un unico zero**

Usiamo il teorema di Bolzano e la monotonicità derivata dall'analisi di  $f'(x)$ :

$$f'(x) = 3x^2 + 3 + 2xe^{-x^2}.$$

1.  $f'(x) > 0$  per ogni  $x \in [0, 1]$  (la funzione è strettamente crescente su  $[0, 1]$ ).
2. Poiché  $f(x)$  è crescente e cambia segno in  $[0, 1]$ , per il teorema di Bolzano esiste un unico zero  $\zeta \in (0, 1)$ .

**Punto (d): Tabella per  $\varepsilon \in \{10^{-1}, 10^{-2}, \dots, 10^{-10}\}$** 

Abbiamo usato il **metodo di bisezione** per calcolare:

- L'approssimazione  $\xi_\varepsilon$ ,
- Il numero di iterazioni  $K_\varepsilon$ ,
- Il valore  $f(\xi_\varepsilon)$ .

La tabella dei risultati è la seguente:

$\epsilon$	$x_i$	$K$	$f(x_i)$
$1.0 \cdot 10^{-1}$	0.5312500000000000	4	$-1.041995243049776 \cdot 10^{-2}$
$1.0 \cdot 10^{-2}$	0.5351562500000000	7	$7.765312582933004 \cdot 10^{-3}$
$1.0 \cdot 10^{-3}$	0.5336914062500000	10	$9.389559548024229 \cdot 10^{-4}$
$1.0 \cdot 10^{-4}$	0.533477783203125	14	$-5.586409047664276 \cdot 10^{-5}$
$1.0 \cdot 10^{-5}$	0.533489227294922	17	$-2.574612559369527 \cdot 10^{-6}$
$1.0 \cdot 10^{-6}$	0.533489704132080	20	$-3.542067064099541 \cdot 10^{-7}$
$1.0 \cdot 10^{-7}$	0.533489793539047	24	$6.211948844203619 \cdot 10^{-8}$
$1.0 \cdot 10^{-8}$	0.533489782363176	27	$1.007871253122516 \cdot 10^{-8}$
$1.0 \cdot 10^{-9}$	0.533489780034870	30	$-7.631157927789900 \cdot 10^{-10}$
$1.0 \cdot 10^{-10}$	0.533489780180389	34	$-8.550160579545718 \cdot 10^{-11}$

**Codice MATLAB:**

```

1  a = 0; b = 1;
2  f = @(x) x.^3 + 3.*x - 1 - exp(-x.^2);
3  epsilon_values = 10.^(-1:-1:-10); % Tolleranze
4  results = zeros(length(epsilon_values), 3); % Preallocazione: [xi_eps,
   K_eps, f(xi_eps)]
5
6  for i = 1:length(epsilon_values)
7      epsilon = epsilon_values(i);
8      [xi, K, fx] = bisezione(a, b, f, epsilon);
9      results(i, :) = [xi, K, fx];
10 end
11
12 % Mostra la tabella
13 disp('Tabella dei risultati:');
14 disp('epsilon      xi_eps      K_eps      f(xi_eps)');
15 disp(results);

```

**Caso 2**

$$f(x) = \cos x - x, [a, b] = [0, \pi]$$

**Punto (a): Verifica che  $f(a)f(b) < 0$**

1. Calcoliamo  $f(a)$  e  $f(b)$ :

- $f(0) = \cos(0) - 0 = 1$ ,
- $f(\pi) = \cos(\pi) - \pi = -1 - \pi < 0$ .

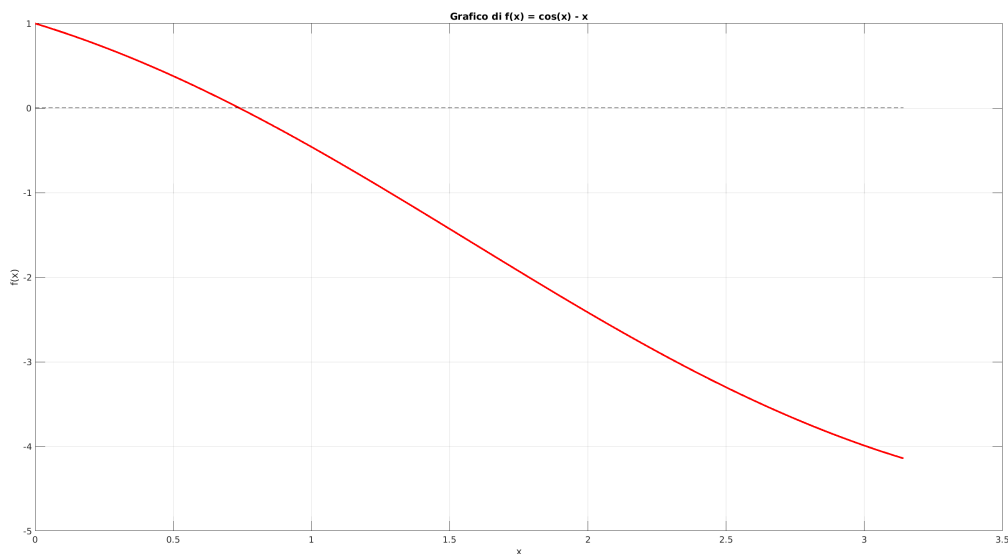
2. Poiché  $f(0) \cdot f(\pi) < 0$ , possiamo procedere.

### Punto (b): Grafico di $f(x)$ e verifica di uno zero unico

#### Codice MATLAB:

```
1 f = @(x) cos(x) - x;
2 x = linspace(0, pi, 1000); % 1000 punti nell'intervallo [0, pi]
3 plot(x, f(x), 'r-', 'LineWidth', 2);
4 grid on;
5 xlabel('x');
6 ylabel('f(x)');
7 title('Grafico di f(x) = cos(x) - x');
```

**Analisi:** Il grafico mostra che  $f(x)$  è continuo e cambia segno una sola volta tra 0 e  $\pi$ .



### Punto (c): Dimostrazione analitica che $f(x)$ ha un unico zero

Usiamo  $f'(x) = -\sin(x) - 1$ :

1.  $f'(x) < 0$  per ogni  $x \in [0, \pi]$  (la funzione è strettamente decrescente su  $[0, \pi]$ ).
2. Poiché  $f(x)$  è decrescente e cambia segno in  $[0, \pi]$ , per il teorema di Bolzano esiste un unico zero  $\zeta \in (0, \pi)$ .

### Punto (d): Tabella per

$$\varepsilon \in \{10^{-1}, 10^{-2}, \dots, 10^{-10}\}$$

Abbiamo usato il **metodo di bisezione** per calcolare:

- L'approssimazione  $\xi_\varepsilon$ ,
- Il numero di iterazioni  $K_\varepsilon$ ,
- Il valore  $f(\xi_\varepsilon)$ .

La tabella dei risultati è la seguente:

$\epsilon$	$x_i$	$K$	$f(x_i)$
$1.0 \cdot 10^{-1}$	0.736310778185108	5	$4.640347169851511 \cdot 10^{-3}$
$1.0 \cdot 10^{-2}$	0.739378739760879	9	$-4.914153002637534 \cdot 10^{-4}$
$1.0 \cdot 10^{-3}$	0.738995244563908	12	$1.504357420498703 \cdot 10^{-4}$
$1.0 \cdot 10^{-4}$	0.739043181463529	15	$7.021030579146270 \cdot 10^{-5}$
$1.0 \cdot 10^{-5}$	0.739088122306924	19	$-5.002583233437718 \cdot 10^{-6}$
$1.0 \cdot 10^{-6}$	0.739085500757726	22	$-6.151237084139893 \cdot 10^{-7}$
$1.0 \cdot 10^{-7}$	0.739085173064076	25	$-6.669162500028136 \cdot 10^{-8}$
$1.0 \cdot 10^{-8}$	0.739085135028206	29	$-3.034334783436066 \cdot 10^{-9}$
$1.0 \cdot 10^{-9}$	0.739085133199558	32	$2.611200144997383 \cdot 10^{-11}$
$1.0 \cdot 10^{-10}$	0.739085133245275	35	$-5.039924033667376 \cdot 10^{-11}$

### Codice MATLAB:

```

1  a = 0; b = pi;
2  f = @(x) cos(x) - x;
3  epsilon_values = 10.^(-1:-1:-10); % Tolleranze
4  results = zeros(length(epsilon_values), 3); % Preallocazione: [xi_eps,
   K_eps, f(xi_eps)]
5
6  for i = 1:length(epsilon_values)
7      epsilon = epsilon_values(i);
8      [xi, K, fx] = bisezione(a, b, f, epsilon);
9      results(i, :) = [xi, K, fx];
10 end
11
12 % Mostra la tabella
13 disp('Tabella dei risultati:');
14 disp('epsilon      xi_eps      K_eps      f(xi_eps)');
15 disp(results);

```

### Codice

```

1  % Funzioni e intervalli definiti dal problema
2  f1 = @(x) x.^3 + 3*x - 1 - exp(-x.^2); % Prima funzione
3  a1 = 0; b1 = 1; % Intervallo [a, b] per f1
4
5  f2 = @(x) cos(x) - x; % Seconda funzione
6  a2 = 0; b2 = pi; % Intervallo [a, b] per f2
7
8  % Lista di epsilon
9  epsilons = [1e-1, 1e-2, 1e-3, 1e-4, 1e-5, 1e-6, 1e-7, 1e-8, 1e-9, 1e-
   10];

```

```

10
11 % Risoluzione per il primo caso
12 solve_case(f1, a1, b1, epsilons, 'f1(x) = x^3 + 3x - 1 - e^{-x^2}');
13
14 % Risoluzione per il secondo caso
15 solve_case(f2, a2, b2, epsilons, 'f2(x) = cos(x) - x');
16
17 % Funzione per risolvere ogni caso
18 function solve_case(f, a, b, epsilons, case_name)
19     fprintf('\nSoluzione per %s:\n', case_name);
20
21     % (a) Verifica che f(a)*f(b) < 0
22     fa = f(a);
23     fb = f(b);
24     fprintf('(a) f(a)*f(b) = %.3f (segno opposto: %s)\n', fa * fb, ...
25         string(fa * fb < 0));
26     if fa * fb >= 0
27         error('f(a) e f(b) devono avere segni opposti');
28     end
29
30     % (b) Tracciamento del grafico
31     fprintf('(b) Tracciamento del grafico di f(x) su [%f, %f]\n', a, b);
32     fplot(f, [a b]);
33     hold on;
34     grid on;
35     plot(a, f(a), 'ro', 'DisplayName', 'f(a)');
36     plot(b, f(b), 'bo', 'DisplayName', 'f(b)');
37     xlabel('x'); ylabel('f(x)');
38     title(['Grafico di f(x) - Caso ', case_name]);
39     legend show;
40
41     % (c) Dimostrazione analitica: fatta in modo separato (se
42     necessario)
43
44     % (d) Tabella dei risultati per vari epsilon
45     fprintf('(d) Calcolo del metodo di bisezione per diverse tolleranze
46     epsilon:\n');
47     fprintf('epsilon      xi      K      f(xi)\n');
48     fprintf('-----\n');
49     for epsilon = epsilons
50         [xi, K, fx] = bisezione(a, b, f, epsilon);
51         fprintf('%e    %.15f    %d    %.15e\n', epsilon, xi, K, fx);
52     end
53 end
54

```

## Descrizione del Codice

### 1. Caso 1 e Caso 2:

- Si calcolano  $f(a)$  e  $f(b)$  per verificare che il prodotto è negativo.
- Si tracciano i grafici per osservare il comportamento di  $f(x)$ .
- Si riportano i risultati delle tabelle usando il metodo di bisezione.

## 2. Funzione `bisezione` :

- Implementa il metodo di bisezione per trovare l'approssimazione di uno zero di una funzione continua su un intervallo  $[a, b]$ .
- Restituisce l'approssimazione  $\xi_\epsilon$ , il numero di iterazioni  $K_\epsilon$ , e il valore  $f(\xi_\epsilon)$ .

## 3. Tabelle dei Risultati:

- Si stampano le tabelle per ogni caso, con i valori di  $\epsilon$ ,  $\xi_\epsilon$ ,  $K_\epsilon$ , e  $f(\xi_\epsilon)$ .