

Università degli studi di Urbino Carlo Bo

Corso di laurea in Informatica Scienza e Tecnologia

Progetto d'esame di Programmazione Logica e Funzionale

Anno accademico 2025/2026

Andrea Pedini, N. 322918

Matteo Fraternali, N. 316637

1 Specifica del Problema

Scrivere un programma Haskell e un programma Prolog che leggano da file e stampino a schermo i seguenti dati di input:

- Una lista di numeri interi
- Una lista di coppie di numeri interi

Successivamente il programma dovrà:

- Costruire un grafo orientato i cui vertici sono costituiti dalla lista di interi letta da file e gli archi sono rappresentati dalle coppie di interi letti da file.
- Costruire un nuovo grafo orientato in cui i vertici sono le componenti fortemente connesse del grafo iniziale rappresentate da un singolo vertice scelto arbitrariamente tra i vertici di una componente fortemente connessa e gli archi sono i collegamenti tra le componenti fortemente connesse distinte.
- Acquisire un numero intero tra i vertici del grafo a rappresentare il vertice di partenza validando che esso sia un vertice presente nel grafo iniziale.
- Stampare a schermo il numero di componenti fortemente connesse diverse dalla componente contenente il vertice di partenza che hanno grado entrante uguale a 0.

2 Analisi del problema

2.1 Dati di ingresso del problema

I dati di ingresso sono i seguenti:

- Una lista di numeri interi
- Una lista di coppie di numeri interi
- Un numero intero

2.2 Dati di uscita del problema

I dati di uscita del problema sono costituiti solamente dal numero di componenti fortemente connesse diverse dalla componente contenente il vertice di partenza che hanno grado entrante uguale a 0.

2.3 Relazioni intercorrenti tra i dati del problema

Le relazioni intercorrenti tra i dati di ingresso e i dati di uscita del problema riguardano la struttura del grafo e la sua trasformazione attraverso il concetto di componenti fortemente connesse (SCC - Strongly Connected Components).

Una componente fortemente connessa C è un insieme di vertici tale per cui per ogni v_1, v_2 appartenenti a C esiste un percorso da v_1, v_2 e uno da v_2, v_1 .

Dopo la creazione del grafo orientato iniziale, l'individuazione delle componenti fortemente connesse, la determinazione della SCC contenente il vertice di partenza, il dato di uscita sarà dato semplicemente dal numero delle SCC con grado entrante 0, escludendo la SCC del vertice di partenza.

Adottiamo questo metodo perchè siamo interessati a ottenere il numero minimo di archi da aggiungere per rendere tutto il grafo raggiungibile dal vertice scelto, mentre se ci limitassimo ad aggiungere tanti archi quanti sono i vertici non raggiungibili non otterremmo il numero minimo.

3 Progettazione dell'Algoritmo

3.1 Scelte di Progetto

Le scelte di progetto che sono state effettuate riguardano:

- la rappresentazione dei dati del grafo come semplici liste di interi per i vertici e liste di coppie di interi per gli archi.
- La definizione di una funzione di visita in profondità che consenta tramite un parametro formale la scelta di una strategia di accumulazione dei vertici per il risultato da ritornare.

3.2 Passi dell'Algoritmo

- Acquisizione del grafo
 - Leggere da un file una lista di vertici e una lista di archi, costruendo un grafo diretto
- Visualizzazione iniziale
 - Stampa a schermo dei vertici e degli archi del grafo così come sono stati letti
- Calcolo delle componenti fortemente connesse (SCC)
 - Esaminare il grafo per identificare insiemi di vertici tali che ciascun vertice del gruppo sia raggiungibile da ogni altro vertice dello stesso gruppo
 - Generare una lista di questi insiemi (componenti)
 - Visualizzare le componenti trovate
- Costruzione del grafo compresso
 - Considerare ogni componente come un singolo vertice
 - Creare archi tra componenti se esiste almeno un arco nel grafo originale che collega vertici appartenenti a componenti diverse
 - Mostrare il grafo risultante, dove ogni vertice rappresenta una componente
- Calcolo del grado entrante delle componenti
 - Per ogni componente, contare quanti archi entrano in essa da altre componenti
 - Visualizzare questi valori
- Scelta del vertice di partenza
 - Richiedere all'utente di indicare un vertice specifico validando che esso sia presente nel grafo iniziale
 - Identificare la componente che contiene questo vertice
- Conteggio delle componenti indipendenti
 - Contare quante componenti nel grafo compresso non hanno archi in ingresso escludendo la componente contenente il vertice di partenza
 - Visualizzare il numero risultante.

4 Implementazione dell'Algoritmo

4.1 Implementazione in Haskell

```
-- #####
-- #          Corso di Programmazione Logica e Funzionale          #
-- #          Progetto per la sessione invernale A.A 2025/2026      #
-- #                      di Andrea Pedini                          #
-- #                      Matricola: 322918                         #
-- #                      e Matteo Fraternali                      #
-- #                      Matricola: 316637                         #
-- #####

{-
  Specifica : Scrivere un programma Haskell che legga un grafo orientato
  da file e calcoli le sue Componenti Fortemente Connesse (SCC)
  utilizzando l'algoritmo di Kosaraju.
  Successivamente il programma costruisce il grafo compresso
  e determina il numero di SCC con grado entrante zero,
  escludendo la SCC contenente un vertice scelto dall'utente.
-}

module Main where

-- Caricamento della funzione per eliminare duplicati da una lista
import Data.List ( nub )

-----
-- FUNZIONE PRINCIPALE
-----

{-
  Funzione principale del programma.
  - legge un grafo da file
  - calcola le componenti fortemente connesse
  - costruisce il grafo compresso
  - calcola quante SCC hanno grado entrante zero
-}

main :: IO ()
main = do
  risultato <- leggiGrafoDaFile "input.txt"

  case risultato of
    Nothing -> do
      putStrLn "\nIl programma è stato terminato a causa di errori nel file di input.\n"

    Just (vertici, archi) -> do

      putStrLn "\n===== "
      putStrLn "          GRAFO LETTO DA FILE          "
      putStrLn "----- "
```

```

putStrLn $ "Vertici: " ++ show vertici
putStrLn $ "Archi:   " ++ show archi

let componenti = kosaraju vertici archi

putStrLn "\n=====
putStrLn "          COMPONENTI FORTEMENTE CONNESSE "
putStrLn "-----"
mapM_
  (\(i, c) -> putStrLn $ "SCC " ++ show i ++ ": " ++ show c)
  (zip [0 ..] componenti)

let grafoCompresso = comprimiGrafo componenti archi

putStrLn "\n=====
putStrLn "          GRAFO COMPRESSO          "
putStrLn "-----"
mapM_
  (\(i, j) -> putStrLn $ "SCC_" ++ show i ++ " -> SCC_" ++ show j)
  grafoCompresso

verticePartenza <- acquisisciVertice vertici

let numeroZero =
  contaSCCConGradoZero verticePartenza componenti grafoCompresso

putStrLn "\n=====
putStrLn $
  "Numero di SCC con grado entrante 0 (esclusa la partenza): "
  ++ show numeroZero
putStrLn "=====\\n"

```

```

-----
-- LETTURA E VALIDAZIONE DEL GRAFO DA FILE
-----

```

```

{-
  Legge e valida un grafo da file.
  Restituisce:
  - Just (vertici, archi) se il parsing e la validazione hanno successo
  - Nothing in caso di errore
-}

```

```

leggiGrafoDaFile :: FilePath -> IO (Maybe ([Int], [(Int, Int)]))
leggiGrafoDaFile nomeFile = do
  contenuto <- readFile nomeFile
  case lines contenuto of
    vLine:aLine:_ -> parseGrafo vLine aLine
    _ -> errore "Errore: il file deve contenere almeno due righe."

```

```

-- Parsing delle due righe

```

```

parseGrafo :: String -> String -> IO (Maybe ([Int], [(Int, Int)]))
parseGrafo rVertici rArchi =
    case (reads rVertici, reads rArchi) of
        (([vertici, ""], [(archi, "")]) ->
            validaGrafo vertici archi
        _ ->
            errore "Errore: formato non valido delle liste (parentesi o virgole errate).")

-- Validazione semantica
validaGrafo :: [Int] -> [(Int, Int)] -> IO (Maybe ([Int], [(Int, Int)]))
validaGrafo vertici archi
    | null vertici =
        errore "Errore: la lista dei vertici è vuota."
    | not (archiValidi vertici archi) =
        errore "Errore: alcuni archi contengono vertici non presenti nella lista."
    | otherwise =
        return (Just (vertici, archi))

-- Controllo archi
archiValidi :: [Int] -> [(Int, Int)] -> Bool
archiValidi vertici =
    all (\(x, y) -> x `elem` vertici && y `elem` vertici)

-- Utility per errori
errore :: String -> IO (Maybe a)
errore msg = putStrLn msg >> return Nothing

-----
-- FUNZIONE DI ACQUISIZIONE DEL VERTICE
-----

{-
    Funzione che acquisisce da tastiera un vertice valido.
    - l'argomento è la lista dei vertici del grafo
-}
acquisisciVertice :: [Int] -> IO Int
acquisisciVertice vertici = do
    putStrLn $
        "Inserisci il vertice di partenza (tra " ++ show vertici ++ "):"
    input <- getLine
    case reads input :: [(Int, String)] of
        [(v, _)] | v `elem` vertici -> return v
    _ -> do
        putStrLn "Vertice non valido! Riprova."
        acquisisciVertice vertici

-----
-- FUNZIONI DI BASE SUI GRAFI
-----

{-

```

```

    Funzione che restituisce tutti i vertici adiacenti a un vertice.
    - il primo argomento è il vertice di partenza
    - il secondo argomento è la lista degli archi
-}
verticiAdiacenti :: Int -> [(Int, Int)] -> [Int]
verticiAdiacenti v archi = [ y | ( x , y ) <- archi , x == v ]

{-
    Funzione che inverte la direzione di tutti gli archi del grafo.
    - l'argomento è la lista degli archi
-}
invertiArchi :: [(Int, Int)] -> [(Int, Int)]
invertiArchi [] = []
invertiArchi ( ( x , y ) : xs ) = ( y , x ) : invertiArchi xs

-----
-- FUNZIONI DI COMBINAZIONE PER LA VISITA IN PROFONDITA'
-----

{-
    Funzione di combinazione che inserisce il vertice
    alla fine della lista dei risultati (post-order).
-}
aggiungiInCoda :: Int -> [Int] -> [Int]
aggiungiInCoda v res = res ++ [v]

{-
    Funzione di combinazione che inserisce il vertice
    all'inizio della lista dei risultati (pre-order).
-}
aggiungiInTesta :: Int -> [Int] -> [Int]
aggiungiInTesta v res = v : res

-----
-- VISITA IN PROFONDITA' GENERICA
-----

{-
    Visita in profondità generica parametrizzata da una funzione di combinazione.
    - il primo argomento decide come aggiungere il vertice corrente
    - il secondo argomento è il vertice di partenza
    - il terzo argomento è la lista degli archi
    - il quarto argomento è la lista dei vertici visitati

    Restituisce:
    - la lista aggiornata dei vertici visitati
    - la lista dei risultati accumulati secondo la strategia scelta
-}
visitaInProfondita :: (Int -> [Int] -> [Int]) -> Int -> [(Int, Int)] -> [Int] -> ([Int], [Int])
visitaInProfondita combina v archi visitati
    | v `elem` visitati = ( visitati , [] )

```

```

| otherwise =
    let visitati' = v : visitati
        (visitatiFinali, risultatiFigli) =
            foldl visita (visitati', []) (verticiAdiacenti v archi)
    in (visitatiFinali, combina v risultatiFigli)
where
    visita (vis, res) u =
        let (vis', res') = visitaInProfondita combina u archi vis
        in (vis', res ++ res')

-----
-- VISITA IN PROFONDITA' SPECIALIZZATE
-----

{-
    Visita in profondità che calcola l'ordine di fine dei vertici.
-}
visitaInProfonditaOrdineFine :: Int -> [(Int, Int)] -> [Int] -> ([Int], [Int])
visitaInProfonditaOrdineFine = visitaInProfondita aggiungiInCoda

{-
    Visita in profondità che costruisce una singola componente fortemente connessa.
-}
visitaInProfonditaComponente :: Int -> [(Int, Int)] -> [Int] -> ([Int], [Int])
visitaInProfonditaComponente = visitaInProfondita aggiungiInTesta

-----
-- ORDINE DI FINE GLOBALE
-----

{-
    Funzione che calcola l'ordine di fine globale del grafo.
    - il primo argomento è la lista dei vertici
    - il secondo argomento è la lista degli archi
-}
ordineDiFine :: [ Int ] -> [ ( Int , Int ) ] -> [ Int ]
ordineDiFine vertici archi =
    snd $
        foldl visitaGlobale ( [] , [] ) vertici
where
    visitaGlobale ( vis , ord ) v =
        let ( vis' , ord' ) = visitaInProfonditaOrdineFine v archi vis
        in ( vis' , ord ++ ord' )

-----
-- ALGORITMO DI KOSARAJU
-----

{-
    Funzione che calcola tutte le componenti fortemente connesse del grafo
    utilizzando l'algoritmo di Kosaraju.
-}

```

```

    - il primo argomento è la lista dei vertici
    - il secondo argomento è la lista degli archi
-}
kosaraju :: [Int] -> [(Int, Int)] -> [[Int]]
kosaraju vertici archi =
    componenti
  where
    ordine          = reverse (ordineDiFine vertici archi)
    archiInvertiti = invertiArchi archi
    componenti =
        snd $
            foldl costruisci ([], []) ordine

    costruisci (vis, comps) v
        | v `elem` vis = (vis, comps)
        | otherwise =
            let (vis', comp) = visitaInProfonditaComponente v archiInvertiti vis
            in (vis', comps ++ [comp])

-----
-- GRAFO COMPRESSO
-----

{-
    Funzione che restituisce l'indice della SCC contenente un vertice.
    - il primo argomento è il vertice
    - il secondo argomento è la lista delle SCC
-}
indiceSCC :: Int -> [[Int]] -> Int
indiceSCC v sccs =
    case [i | (i, comp) <- zip [0 ..] sccs , v `elem` comp] of
        (i:_) -> i
        []      -> error ("Vertice non trovato: " ++ show v)

{-
    Funzione che costruisce il grafo compresso.
    - il primo argomento sono le SCC
    - il secondo argomento è la lista degli archi originali
-}
comprimiGrafo :: [[Int]] -> [(Int, Int)] -> [(Int, Int)]
comprimiGrafo sccs archi =
    nub
        [ (i, j)
        | (x, y) <- archi
          , let i = indiceSCC x sccs
          , let j = indiceSCC y sccs
          , i /= j
        ]

{-
    Funzione che calcola il grado entrante di una SCC.

```

```

    - il primo argomento è l'indice della SCC
    - il secondo argomento è la lista degli archi del grafo compresso
-}
gradoEntrante :: Int -> [(Int, Int)] -> Int
gradoEntrante c archi =
    length [(x, y) | (x, y) <- archi , y == c]

{-
    Funzione che conta quante SCC hanno grado entrante zero,
    escludendo quella contenente il vertice di partenza.
    - il primo argomento è il vertice di partenza
    - il secondo argomento sono le SCC
    - il terzo argomento è il grafo compresso
-}
contaSCCConGradoZero :: Int -> [[Int]] -> [(Int, Int)] -> Int
contaSCCConGradoZero v sccs archi =
    length
        [ i
        | i <- [0 .. length sccs - 1]
        , i /= indiceSCC v sccs
        , gradoEntrante i archi == 0
        ]

```

File: connessioniGrafì.hs

4.2 Implementazione in Prolog

```
% #####
% #          Corso di Programmazione Logica e Funzionale          #
% #          Progetto per la sessione invernale A.A 2025/2026      #
% #                      di Andrea Pedini                          #
% #                      Matricola: 322918                         #
% #                      e Matteo Fraternali                      #
% #                      Matricola: 316637                         #
% #####

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% MAIN
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

/*
    Predicato di avvio del programma.
    Legge il grafo da file 'input.txt' e gestisce il risultato.
    Non riceve parametri, il file di input è fisso.
*/
main :-
    leggi_grafo_sicuro('input.txt', Risultato),
    gestisci_risultato(Risultato).

/*
    Gestisce il risultato della lettura del file.
    Parametri:
    - Risultato: errore oppure ok(Grafo)
    In caso di errore stampa messaggio e fallisce.
    In caso di successo passa il grafo a esegui_programma.
*/
gestisci_risultato(errore) :-
    nl, stampa_separatore,
    write('Errore nel file di input. '), nl,
    write('Controllare formato e contenuto del grafo. '), nl,
    stampa_separatore, nl, !, fail.

gestisci_risultato(ok(Grafo)) :-
    esegui_programma(Grafo).

/*
    Predicato principale che coordina l'esecuzione del programma.
    Parametri:
    - Grafo: termine grafo(Vertici, Archi)
    Calcola le SCC, stampa informazioni, chiede input utente
    e calcola le SCC con grado entrante zero.
*/
esegui_programma(Grafo) :-
    vertici(Grafo, Vertici),
    archi(Grafo, Archi),
    kosaraju(Grafo, SCCs),
```

```

        stampa_separatore,
        write('          GRAFO LETTO DA FILE          '), nl,
        stampa_riga,
        write('Vertici: '), write(Vertici), nl,
        write('Archi:   '), write(Archi), nl,

        nl, stampa_separatore,
        write('          COMPONENTI FORTEMENTE CONNESSE '), nl,
        stampa_riga,
        stampa_scc_numerate(SCCs, 0),

        nl, stampa_separatore,
        write('          GRAFO COMPRESSO'), nl,
        stampa_riga,

        leggi_vertice_valido(Vertici, VerticeScelto),
        scc_di_vertice(VerticeScelto, SCCs, SCCPartenza),

        findall(S, (membro(S, SCCs), S \= SCCPartenza,
                    grado_entrante(Grafo, SCCs, S, 0)), SCCZeroIn),
        length(SCCZeroIn, Conteggio),

        nl, stampa_separatore,
        write('Numero di SCC con indegree 0 (esclusa partenza): '),
        write(Conteggio), nl,
        stampa_separatore.

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% LETTURA E VALIDAZIONE DEL GRAFO
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

/*
    Legge il grafo da file in modo sicuro.
    Parametri:
    - File: nome del file di input
    - Risultato: ok(grafo(Vertici,Archi)) se successo, errore altrimenti
    Valida formato e contenuto del grafo letto.
*/
leggi_grafo_sicuro(File, ok(grafo(Vertici, Archi))) :-
    catch(open(File, read, Stream), _, fail),
    leggi_termine_sicuro(Stream, Vertici),
    is_list(Vertici), Vertici \= [], lista_vertici_valida(Vertici),
    leggi_termine_sicuro(Stream, Archi),
    is_list(Archi), lista_archi_valida(Archi),
    close(Stream),
    archi_validi(Archi, Vertici), !.

leggi_grafo_sicuro(_, errore).

/*

```

```

    Legge un termine Prolog da stream intercettando eccezioni.
    Parametri:
    - Stream: stream di input aperto
    - Termine: termine Prolog letto dalla riga
*/
leggi_termine_sicuro(Stream, Termine) :-
    leggi_linea(Stream, Line),
    atom_concat(Line, '.', LineConPunto),
    catch(read_from_atom(LineConPunto, Termine), _, fail).

/*
    Verifica che una lista contenga solo interi.
    Parametri:
    - Lista: lista da validare come lista di vertici
*/
lista_vertici_valida([]).
lista_vertici_valida([H|T]) :- integer(H), lista_vertici_valida(T).

/*
    Verifica che una lista contenga solo coppie (X,Y) di interi.
    Parametri:
    - Lista: lista da validare come lista di archi
*/
lista_archi_valida([]).
lista_archi_valida([(X,Y)|T]) :- integer(X), integer(Y), lista_archi_valida(T).

/*
    Verifica che tutti gli archi usino vertici esistenti.
    Parametri:
    - Archi: lista di archi (X,Y)
    - Vertici: lista di vertici validi
*/
archi_validi([], _).
archi_validi([(X,Y)|Resto], Vertici) :-
    membro(X, Vertici), membro(Y, Vertici), archi_validi(Resto, Vertici).

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% LETTURA DA STREAM
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

/*
    Legge una riga da uno stream.
    Parametri:
    - Stream: stream di input
    - Linea: atomo contenente il testo della riga
*/
leggi_linea(Stream, Linea) :-
    get_char(Stream, Char),
    leggi_linea_aux(Stream, Char, Caratteri),
    atom_chars(Linea, Caratteri).

```

```

/*
    Predicato ausiliario per leggere carattere per carattere.
    Parametri:
    - Stream: stream di input
    - Char: carattere corrente
    - Caratteri: lista dei caratteri accumulati
*/
leggi_linea_aux(_, end_of_file, []) :- !.
leggi_linea_aux(_, '\n', []) :- !.
leggi_linea_aux(Stream, Char, [Char|Resto]) :-
    get_char(Stream, Next),
    leggi_linea_aux(Stream, Next, Resto).

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% INPUT UTENTE
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

/*
    Richiede all'utente un vertice valido.
    Parametri:
    - Vertici: lista dei vertici validi del grafo
    - Vertice: vertice scelto dall'utente (validato)
    Garantisce che l'input sia esattamente un numero intero
    e che appartenga alla lista dei vertici del grafo.
*/
leggi_vertice_valido(Vertici, Vertice) :-
    write('Inserisci il vertice di partenza (tra '),
    write(Vertici), write('):'), nl,
    leggi_numero_valido(N),
    (membro(N, Vertici) -> Vertice = N
    ; write('Vertice non valido! Riprova.'), nl,
      leggi_vertice_valido(Vertici, Vertice)).

/*
    Legge un numero intero valido da input standard.
    Parametri:
    - N: numero intero letto e validato
    Gestisce input non validi come stringhe, numeri con spazi,
    o altri caratteri non numerici.
*/
leggi_numero_valido(N) :-
    leggi_linea(user_input, Line),
    (leggi_e_valida_numero(Line, N) -> true
    ; write('Input non valido! Inserisci un numero intero.'), nl,
      leggi_numero_valido(N)).

/*
    Legge e valida che una stringa rappresenti esattamente un numero intero.
    Parametri:
    - Line: atomo contenente l'input
    - N: numero intero validato

```

[illegible]

```

/*
    Verifica l'appartenenza di un elemento a una lista.
    Parametri:
    - X: elemento da cercare
    - Lista: lista in cui cercare
*/
membro(X, [X|_]).
membro(X, [_|Resto]) :- membro(X, Resto).

/*
    Estrae la lista dei vertici dal grafo.
    Parametri:
    - Grafo: termine grafo(Vertici, Archi)
    - Vertici: lista dei vertici
*/
vertici(grafo(N,_), N).

/*
    Estrae la lista degli archi dal grafo.
    Parametri:
    - Grafo: termine grafo(Vertici, Archi)
    - Archi: lista delle coppie (X,Y)
*/
archi(grafo(_,A), A).

/*
    Verifica se esiste un arco orientato tra due vertici.
    Parametri:
    - Grafo: grafo di riferimento
    - X: vertice sorgente
    - Y: vertice destinazione
*/
adiacente(grafo(_,A), X, Y) :- membro((X,Y), A).

/*
    Restituisce tutti i vertici raggiungibili da un vertice.
    Parametri:
    - Grafo: grafo di riferimento
    - Vertice: vertice di partenza
    - Adiacenti: lista dei vertici raggiungibili con un arco
*/
adiacenti(Grafo, Vertice, Adiacenti) :-
    findall(Y, adiacente(Grafo, Vertice, Y), Adiacenti).

%%%
%% VISITA IN PROFONDITÀ
%%%

/*
    Implementazione generica della visita in profondità.

```

```

Parametri:
- Combina: predicato che definisce come accumulare risultato
- Grafo: grafo su cui eseguire la visita
- Vertice: vertice corrente
- Visitati: lista vertici già visitati
- VisitatiFinali: lista vertici visitati al termine
- Risultato: risultato prodotto dalla visita
*/
visitaInProfondita(_, _, Vertice, Visitati, Visitati, []) :-
    membro(Vertice, Visitati), !.

visitaInProfondita(Combina, Grafo, Vertice, Visitati, VisitatiFinali, Risultato) :-
    \+ membro(Vertice, Visitati),
    adiacenti(Grafo, Vertice, Vicini),
    visitaInProfondita_lista(Combina, Grafo, Vicini,
                             [Vertice|Visitati], VisitatiParziali, RisultatiFigli),
    call(Combina, Vertice, RisultatiFigli, Risultato),
    VisitatiFinali = VisitatiParziali.

/*
Versione della visita che opera su lista di vertici.
Parametri:
- Combina: strategia di accumulo
- Grafo: grafo di riferimento
- Lista: vertici da visitare
- Visitati: vertici già visitati
- VisitatiFinali: vertici visitati al termine
- Risultato: risultato complessivo
*/
visitaInProfondita_lista(_, _, [], Visitati, Visitati, []).
visitaInProfondita_lista(Combina, Grafo, [H|T], Visitati, VisitatiFinali, Risultato) :-
    visitaInProfondita(Combina, Grafo, H, Visitati, Visitati1, R1),
    visitaInProfondita_lista(Combina, Grafo, T, Visitati1, VisitatiFinali, R2),
    append(R1, R2, Risultato).

%% VISITE SPECIALIZZATE
%%

/*
Calcola l'ordine di completamento dei vertici.
Parametri:
- Grafo: grafo di riferimento
- Vertice: vertice di partenza
- Visitati: vertici già visitati
- VisitatiFinali: vertici visitati al termine
- Ordine: lista vertici in ordine di completamento
*/
visitaInProfondita_ordine(Grafo, Vertice, Visitati, VisitatiFinali, Ordine) :-
    visitaInProfondita(combina_fine, Grafo, Vertice, Visitati, VisitatiFinali, Ordine).

```

```

/*
    Costruisce una singola SCC.
    Parametri:
    - Grafo: grafo di riferimento
    - Vertice: vertice di partenza
    - Visitati: vertici già visitati
    - VisitatiFinali: vertici visitati al termine
    - Componente: SCC costruita
*/
visitaInProfondita_scc(Grafo, Vertice, Visitati, VisitatiFinali, Componente) :-
    visitaInProfondita(combina_testa, Grafo, Vertice, Visitati, VisitatiFinali, Componente).

/*
    Calcola ordine di completamento per tutti i vertici.
    Parametri:
    - Grafo: grafo di riferimento
    - Ordine: lista vertici in ordine di completamento
*/
visitaInProfondita_grafo(Grafo, Ordine) :-
    vertici(Grafo, Vertici),
    visitaInProfondita_lista(combina_fine, Grafo, Vertici, [], _, Ordine).

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% STRATEGIE DI COMBINAZIONE
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

/*
    Inserisce vertice in coda alla lista.
    Parametri:
    - N: vertice da inserire
    - Lista: lista corrente
    - Risultato: lista risultante
*/
combina_fine(N, Lista, Risultato) :- append(Lista, [N], Risultato).

/*
    Inserisce vertice in testa alla lista.
    Parametri:
    - N: vertice da inserire
    - Lista: lista corrente
    - Risultato: lista risultante
*/
combina_testa(N, Lista, [N|Lista]).

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% GRAFO TRASPOSTO
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

/*
    Costruisce il grafo trasposto.
    Parametri:

```

```
- Grafo originale
- GrafoTrasposto: grafo con archi invertiti
*/
trasposto(grafo(Vertici, Archi), grafo(Vertici, ArchiTrasposti)) :-
    trasponi_archi(Archi, ArchiTrasposti).

/*
Inverte la direzione di tutti gli archi.
Parametri:
- Archi: lista archi originali
- ArchiTrasposti: lista archi invertiti
*/
trasponi_archi([], []).
trasponi_archi([(X,Y)|Resto], [(Y,X)|Trasposti]) :-
    trasponi_archi(Resto, Trasposti).

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% ALGORITMO DI KOSARAJU
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

/*
Implementazione algoritmo di Kosaraju.
Parametri:
- Grafo: grafo originale
- SCCs: lista delle componenti fortemente connesse
*/
kosaraju(Grafo, SCCs) :-
    visitaInProfondita_grafo(Grafo, Ordine),
    reverse(Ordine, OrdineInverso),
    trasposto(Grafo, GrafoTrasposto),
    kosaraju_visita(GrafoTrasposto, OrdineInverso, [], SCCs).

/*
Visita ausiliaria che costruisce progressivamente le SCC.
Parametri:
- Grafo: grafo trasposto
- Ordine: lista vertici in ordine di visita
- Visitati: vertici già visitati
- SCCs: lista delle SCC costruite
*/
kosaraju_visita(_, [], _, []).
kosaraju_visita(Grafo, [Vertice|Resto], Visitati, SCCs) :-
    membro(Vertice, Visitati), !,
    kosaraju_visita(Grafo, Resto, Visitati, SCCs).

kosaraju_visita(Grafo, [Vertice|Resto], Visitati, [SCC|Altre]) :-
    visitaInProfondita_scc(Grafo, Vertice, Visitati, Visitati1, SCC),
    kosaraju_visita(Grafo, Resto, Visitati1, Altre).
```

%%

```
/*
    Trova la SCC che contiene un vertice.
    Parametri:
    - Vertice: vertice da cercare
    - SCCs: lista delle SCC
    - SCC: SCC che contiene il vertice
*/
scc_di_vertice(Vertice, [S|_], S) :- membro(Vertice, S), !.
scc_di_vertice(Vertice, [_|Resto], S) :- scc_di_vertice(Vertice, Resto, S).

/*
    Verifica se esiste arco tra due SCC diverse.
    Parametri:
    - Grafo: grafo originale
    - SCCs: lista delle SCC
    - S1: SCC sorgente
    - S2: SCC destinazione
*/
arco_scc(Grafo, SCCs, S1, S2) :-
    archi(Grafo, Archi),
    membro((X,Y), Archi),
    scc_di_vertice(X, SCCs, S1),
    scc_di_vertice(Y, SCCs, S2),
    S1 \= S2.

/*
    Calcola il grado entrante di una SCC.
    Parametri:
    - Grafo: grafo originale
    - SCCs: lista delle SCC
    - SCC: SCC di cui calcolare grado
    - Grado: numero archi entranti
*/
grado_entrante(Grafo, SCCs, SCC, Grado) :-
    findall(1, arco_scc(Grafo, SCCs, _, SCC), Lista),
    length(Lista, Grado).
```

File: connessioniGrafì.pl

5 Testing del Programma

Testing del programma Haskell

Test 1

Vertici: 1,2,3,4,5

Archi: (1,2) - (2,3) - (3,4) - (4,5) - (5,1)

SCC: [1,5,4,3,2]

Vertice di partenza: 4

Risultato: 0

Test 2

Vertici: 1,2,3,4,5,6

Archi: (1,2) - (2,3) - (3,1) - (4,5)

SCC: [6] - [4] - [5] - [1,3,2]

Vertice di partenza: 4

Risultato: 2

Test 3

Vertici: 1,2,3,4,5,6

Archi: (1,2) - (1,3) - (2,4) - (3,4) - (4,5) - (4,6)

SCC: [1] - [3] - [2] - [4] - [6] - [5]

Vertice di partenza: 2

Risultato: 1

Test 4

Vertici: 1,2,3,4,5,6,7

Archi: (1,2) - (2,3) - (3,1) - (3,4) - (4,5) - (5,3) - (5,6) - (6,7)

SCC: [1,3,2,5,4] - [6] - [7]

Vertice di partenza: 5

Risultato: 0

Test 5

Vertici: 1,2,3,4,5,6

Archi: (1,2) - (2,3) - (3,3) - (4,5)

SCC: [6] - [4] - [5] - [1] - [2] - [3]

Vertice di partenza: 6

Risultato: 2

Test 6

Vertici: 1,2,3,4,5,6

Archi: (1,2) - (1,3) - (1,4) - (1,5) - (1,6)

SCC: [1] - [6] - [5] - [4] - [3] - [2]

Vertice di partenza: 3

Risultato: 1

Test 7

Vertici: 1,2,3,4,5,6,7,8

Archi: (1,2) - (2,3) - (3,1) - (4,5) - (5,6) - (6,4) - (6,7) - (7,8)

SCC: [4,6,5] - [7] - [8] - [1,3,2]

Vertice di partenza: 8

Risultato: 2

Test 8

Vertici: 1,2,3,4,5,6,7

Archi: (1,2) - (2,3) - (3,4) - (4,5) - (5,6) - (6,7) - (7,4)

SCC: [1] - [2] - [3] - [4,7,6,5]

Vertice di partenza: 7

Risultato: 1

Test 9

Vertici: 1,2,3,4,5,6,7,8

Archi: (1,2) - (2,3) - (3,1) - (3,4) - (4,5) - (5,3) - (5,6) - (6,7) - (7,6) - (7,8)

SCC: [1,3,2,5,4] - [6,7] - [8]

Vertice di partenza: 8

Risultato: 1

Test 10

Vertici: 1,2,3,4,5,6,7

Archi: (1,2) - (2,3) - (3,1) - (2,4) - (4,5) - (5,6) - (6,4) - (6,7)

SCC: [1,3,2] - [4,6,5] - [7]

Vertice di partenza: 6

Risultato: 1

Testing del programma Prolog

Test 1

Vertici: 1,2,3,4,5

Archì: (1,2) - (2,3) - (3,4) - (4,5) - (5,1)

SCC: [1,5,4,3,2]

Vertice di partenza: 4

Risultato: 0

Test 2

Vertici: 1,2,3,4,5,6

Archì: (1,2) - (2,3) - (3,1) - (4,5)

SCC: [6] - [4] - [5] - [1,3,2]

Vertice di partenza: 4

Risultato: 2

Test 3

Vertici: 1,2,3,4,5,6

Archì: (1,2) - (1,3) - (2,4) - (3,4) - (4,5) - (4,6)

SCC: [1] - [3] - [2] - [4] - [6] - [5]

Vertice di partenza: 2

Risultato: 1

Test 4

Vertici: 1,2,3,4,5,6,7

Archì: (1,2) - (2,3) - (3,1) - (3,4) - (4,5) - (5,3) - (5,6) - (6,7)

SCC: [1,3,2,5,4] - [6] - [7]

Vertice di partenza: 5

Risultato: 0

Test 5

Vertici: 1,2,3,4,5,6

Archì: (1,2) - (2,3) - (3,3) - (4,5)

SCC: [6] - [4] - [5] - [1] - [2] - [3]

Vertice di partenza: 6

Risultato: 2

Test 6

Vertici: 1,2,3,4,5,6

Archì: (1,2) - (1,3) - (1,4) - (1,5) - (1,6)

SCC: [1] - [6] - [5] - [4] - [3] - [2]

Vertice di partenza: 3

Risultato: 1

Test 7

Vertici: 1,2,3,4,5,6,7,8

Archi: (1,2) - (2,3) - (3,1) - (4,5) - (5,6) - (6,4) - (6,7) - (7,8)

SCC: [4,6,5] - [7] - [8] - [1,3,2]

Vertice di partenza: 8

Risultato: 2

Test 8

Vertici: 1,2,3,4,5,6,7

Archi: (1,2) - (2,3) - (3,4) - (4,5) - (5,6) - (6,7) - (7,4)

SCC: [1] - [2] - [3] - [4,7,6,5]

Vertice di partenza: 7

Risultato: 1

Test 9

Vertici: 1,2,3,4,5,6,7,8

Archi: (1,2) - (2,3) - (3,1) - (3,4) - (4,5) - (5,3) - (5,6) - (6,7) - (7,6) - (7,8)

SCC: [1,3,2,5,4] - [6,7] - [8]

Vertice di partenza: 8

Risultato: 1

Test 10

Vertici: 1,2,3,4,5,6,7

Archi: (1,2) - (2,3) - (3,1) - (2,4) - (4,5) - (5,6) - (6,4) - (6,7)

SCC: [1,3,2] - [4,6,5] - [7]

Vertice di partenza: 6

Risultato: 1