

Manual Técnico

Projeto N.º 1 - Época Normal

Inteligência Artificial - Escola Superior de Tecnologia de Setúbal

2023/2024

Prof. Joaquim Filipe

Grupo 17

Nuno Martinho, n.º 201901769

João Coelho, n.º 201902001

João Barbosa, n.º 201901785

Índice

- [Introdução](#)
- [Organização do projeto](#)
- [projeto.lisp](#)
- [puzzle.lisp](#)
- [procura.lisp](#)
- [Resultados](#)
- [Conclusões](#)
- [Limitações](#)

Introdução

Neste manual técnico é abordada a implementação de um programa em **LISP** que tem como objetivo resolver tabuleiros do **Problema do Cavalo** (versão simplificada do Jogo do Cavalo), no qual o cavalo branco é deslocado ao longo do tabuleiro em jogadas sucessivas até não ser possível efetuar qualquer movimento ou até atingir o objetivo.

O objetivo deste será permitir que o utilizador possa receber uma **solução possível** para uma dada pontuação definida previamente para o problema, no **menor número de jogadas possível**.

Organização do projeto

O projeto foi implementado no **LispWorks Personal Edition 8.0.1 (64bits)**, um ambiente de desenvolvimento integrado (IDE) para a linguagem de programação **Lisp**. Esta edição pessoal do **LispWorks** é uma versão gratuita e limitada do ambiente completo oferecido pela **LispWorks Ltd**.

Este encontra-se organizado em 3 ficheiros **.lisp**:

- **projeto.lisp** - corre o programa e carrega os outros componentes, lê e escreve ficheiros (funções *Read-Write*), e trata da interação com o utilizador.
- **puzzle.lisp** - implementação da resolução do problema.
- **procura.lisp** - implementação dos algoritmos de procura.

Estruturas utilizadas

Estas foram as estruturas utilizadas na implementação.

```
;; <resultado>::= (<id-tabuleiro> <algoritmo> <objetivo> <hora-inicio> <solucao> <hora-fim> <heuristica/profundidade>)  
;; <no>::= (<tabuleiro> <pai> <pontos-objetivo> <pontos-atual> <profundidade> <>)  
;; <solucao>::= (<caminho-solucao> <n-abertos> <n-fechados>)
```

projeto.lisp

Neste ficheiro encontram-se funções relativas ao carregamento, leitura e escrita de ficheiros, bem como à interação com o utilizador.

O programa é iniciado ao executar a função **jogar** que apresenta um menu principal com 3 opções:

1. mostrar um tabuleiro entre todos os disponíveis no ficheiro **problemas.dat**;
2. resolver um tabuleiro;
3. sair do programa.

```

(defun iniciar ()
  "Inicializa o programa."
  (menu)
  (substituir-f-no-ficheiro)
  (let ((opcao (read)))
    (case opcao
      (1
       (progn
        (print-tabuleiros)
        (iniciar)
       ))
      (2
       (progn
        (opcao-algoritmo)
        (iniciar)
       ))
      (3
       (progn (format t "Obrigado por jogar!~%~%") (quit)
       ))
      (otherwise (progn (format t "Escolha uma opção válida!") (iniciar))))
    )
  )
)

```

```

o          - Problema do Cavalo -          o
|          |          |          |          |
|  1 - Visualizar problemas  |          |
|  2 - Resolver um problema  |          |
|  3 - Sair                  |          |
o          |          |          |          o
>> |

```

Menu principal

Para que seja possível apresentar os tabuleiros contidos no ficheiro *problemas.dat* é usada uma função **ler-tabuleiros** para ler esse mesmo ficheiro.

```

;; (ler-tabuleiros)
(defun ler-tabuleiros ()
  "Le os tabuleiros no ficheiro problemas.dat."
  (with-open-file (stream (concatenate 'string (diretorio) "problemas.dat") :if-does-not-exist nil)
    (do ((result nil (cons next result))
        (next (read stream nil 'eof) (read stream nil 'eof)))
      ((equal next 'eof) (reverse result)))))

```

Ao seleccionar a primeira opção **Visualizar problemas** o utilizador verá então no ecrã uma lista com todos os tabuleiros lidos a partir da função anterior.

O tabuleiro F presente no ficheiro *problemas.dat* é gerado aleatoriamente cada vez que o programa é iniciado através da seguintes função:

```

(defun substituir-tabuleiro-f (dados novo-tabuleiro)
  "Substitui o tabuleiro do problema F."
  (let ((dados-atualizados (mapcar (lambda (item)
                                    (if (and (listp item) (string= "f" (car item)))
                                        (list (car item) (cadr item) novo-tabuleiro)
                                        item)
                                    ) dados)
        )) dados-atualizados
  )
)

(defun substituir-f-no-ficheiro ()
  "Substitui o tabuleiro do problema F no ficheiro."
  (let* ((dados-ficheiro (ler-tabuleiros))
        (novo-tabuleiro (tabuleiro-aleatorio))
        )
    (when dados-ficheiro
      (let ((dados-atualizados (substituir-tabuleiro-f dados-ficheiro novo-tabuleiro)))
        (if dados-atualizados
          (escrever-no-ficheiro dados-atualizados)
          (format t "Tabuleiro F nao gerado!")))))
  )
)

```

Voltando ao menu principal, temos a segunda opção do menu **Resolver um problema** que permite ao utilizador escolher um algoritmo, um tabuleiro e, se aplicável, profundidade máxima ou heurística. No fim, é calculada a solução e apresentada no ecrã do utilizador, voltando de seguida ao menu inicial.

```
(defun opcao-algoritmo ()
  "Recebe a opcao de algoritmo do utilizador e executa-o."
  (progn
    (algoritmos-menu)
    (let ((opcao (read)))
      (cond ((equal opcao '0) (iniciar))
            ((or (< opcao 0) (> opcao 4)) (progn (format t "Escolha uma opcao valida!~%" ) (opcao-algoritmo)))
            ((not (numberp opcao)) (progn (format t "Escolha uma opcao valida!~%" )))
            (t (let* (
                    (id-tabuleiro (opcao-tabuleiro))
                    (problema (escolher-problema id-tabuleiro))
                    (nome (nome-problema problema))
                    (tabuleiro (tabuleiro-problema problema))
                    (objetivo (pontuacao-problema problema))
                  )
                (ecase opcao
                  (1
                   (let* (
                       (resultado (list nome 'BFS objetivo (get-internal-real-time) (bfs-recursivo tabuleiro
objetivo 'usar-operadores 'calcular-pontos 'posicao-cavalo 'tabuleiros-cavalo-inicial) (get-internal-real-time)))
                     )
                     (progn
                       (format-solucao resultado)
                       (if (fifth resultado)
                           (ficheiro-estatisticas resultado)
                           )
                     )
                   )
                 )
                  (2
                   (let* (
                       (profundidade-max (opcao-profundidade))
                       (resultado (list nome 'DFS objetivo (get-internal-real-time) (dfs-recursivo
tabuleiro objetivo 'usar-operadores 'calcular-pontos 'posicao-cavalo 'tabuleiros-cavalo-inicial profundidade-max) (get-
internal-real-time) profundidade-max))
                     )
                     (progn
                       (format-solucao resultado)
                       (if (fifth resultado)
                           (ficheiro-estatisticas resultado)
                           )
                     )
                   )
                 )
                  (3
                   (let* (
                       (heuristica (opcao-heuristica))
                       (resultado (list nome 'A* objetivo (get-internal-real-time) (a* tabuleiro objetivo
'usar-operadores 'calcular-pontos 'posicao-cavalo 'tabuleiros-cavalo-inicial heuristica) (get-internal-real-time)
heuristica))
                     )
                     (progn
                       (format-solucao resultado)
                       (if (fifth resultado)
                           (ficheiro-estatisticas resultado) )))))))))))))))
```

```
o      o
|      |
|  - Escolha o algoritmo -  |
|      |
|      1 - Breadth-First    |
|      2 - Depth-First      |
|      3 - A*               |
|      |                   |
|      0 - Voltar          |
|      |                   |
o      o

>>
```

Menu algoritmo

```

o      - Defina a profundidade maxima      o
|      a utilizar -                        |
|      1 - Valor predefinido (20)          |
|      Ou introduza outro valor.           |
|      0 - Voltar                          |
o                                           o
>> |

```

Menu profundidade máxima

```

o      - Escolha o tabuleiro: -            o
|                                           |
|      1 - Tabuleiro A                    |
|      2 - Tabuleiro B                    |
|      3 - Tabuleiro C                    |
|      4 - Tabuleiro D                    |
|      5 - Tabuleiro E                    |
|      6 - Tabuleiro F (aleatorio)        |
|      0 - Voltar atras                   |
o                                           o
>> |

```

Menu tabuleiro

```

o      - Defina a heuristica a utilizar -  o
|                                           |
|      1 - Heuristica Enunciado           |
|      0 - Voltar                         |
o                                           o
>> |

```

Menu heurística

Também é criado ou ficheiro **resultados.dat** com resultados mais detalhados de todas as soluções encontradas.

```

(defun ficheiro-estatisticas (resultado)
  "Ficheiro de resultados estatisticos (solucao + dados estatisticos sobre a eficiencia)."
  (with-open-file (stream (concatenate 'string (diretorio) "resultados.dat") :direction :output :if-does-not-exist :create
    :if-exists :append)
    (estatisticas stream resultado)
    (finish-output stream)
    (close stream)
  ))

```

puzzle.lisp

A função usar operadores, executa cada operador para o tabuleiro e guarda a lista com os tabuleiros com a jogada realizada, e caso o movimento não for possível para uma operação ela retornará NIL, que depois é removido da lista.

```

(defun usar-operadores (tabuleiro)
  "Lista de tabuleiros com cada jogada possivel."
  (remove-se #'(lambda (x) (eq x nil))
    (list
      (operador-1 tabuleiro)
      (operador-2 tabuleiro)
      (operador-3 tabuleiro)
      (operador-4 tabuleiro)
      (operador-5 tabuleiro)
      (operador-6 tabuleiro)
      (operador-7 tabuleiro)
      (operador-8 tabuleiro))))

```

Função que gera um tabuleiro com valores aleatórios (tabuleiro n x n) com valor default 10x10.

```
;; (tabuleiro-aleatorio)
(defun tabuleiro-aleatorio (&optional (lista (baralhar (lista-numeros))) (n 10))
  "Funcao que gera um tabuleiro n x n (10 x 10 valor default)"
  (cond
    ((null lista) nil)
    (t (cons (subseq lista 0 n) (tabuleiro-aleatorio (subseq lista n) n)))))
```

- **posicionar-cavalo**: permite posicionar o cavalo numa posição do tabuleiro.
- **tabuleiros-cavalo-inicial**: Se o tabuleiro que estamos a analisar não conter o cavalo, então ele precisará de ser colocado numa das posições válidas da primeira linha. Esta função irá retornar uma lista de tabuleiros com o cavalo em cada posição válida da primeira linha.

```
(defun posicionar-cavalo (tabuleiro &optional (lin 0) (col 0))
  "Posiciona o cavalo no tabuleiro na dada linha, coluna."
  (substituir lin col tabuleiro T))

(defun tabuleiros-cavalo-inicial (tabuleiro-sem-cavalo)
  "Devolve uma lista com os tabuleiros em que o cavalo está posicionado numa casa valida da primeira linha."
  (mapcar #'(lambda (pos)
    (posicionar-cavalo tabuleiro-sem-cavalo (car pos) (cadr pos)))
    (casas-validas-posicoes tabuleiro-sem-cavalo)))
```

Função que trata de mover o cavalo para a posição indicada (linha e coluna) e depois aplica as regras do jogo, removendo o simétrico ou o número duplo referente ao valor da casa em que o cavalo se deslocou.

```
(defun mover-cavalo (tabuleiro &optional (vallinha 0) (valColuna 0))
  "Funcao auxiliar para os operadores."
  (let* ((tabuleiroComCavalo tabuleiro)
    (lin (car (posicao-cavalo tabuleiroComCavalo)))
    (col (cadr (posicao-cavalo tabuleiroComCavalo)))
    (novaPosicaoCavalo (celula (+ lin vallinha) (+ col valColuna) tabuleiroComCavalo)))

    (cond
      ((eq novaPosicaoCavalo NIL) NIL) ;;posicao invalida, movimento ilegal.

      (t
        (let* ((tabuleiroJogada (substituir (+ lin vallinha) (+ col valColuna) (substituir lin col tabuleiroComCavalo) T))
          (duplos-list (posicao-duplos tabuleiroJogada))
          (duplo (if duplos-list
            (nth (random (length duplos-list)) duplos-list)
            nil)))
          (if (eq t (duplo novaPosicaoCavalo))
            (substituir (car duplo) (cadr duplo) tabuleiroJogada)
            (eliminar-simetrico novaPosicaoCavalo tabuleiroJogada)))))))
```

procura.lisp

Aqui estão as funções principais dos algoritmos desenvolvidos de forma recursiva.

```
;; ===== ALGORITMOS =====

;;(bfs-recursivo (tabuleiro-jogado) 100 'usar-operadores 'calcular-pontos 'posicionar-cavalo)
;;(bfs-recursivo (tabuleiro-teste) 100 'usar-operadores 'calcular-pontos 'posicionar-cavalo)
(defun bfs-recursivo (tabuleiro pontos-objetivo expandir-nos fn-calcular-pontos fn-pos-cavalo tabuleiros-cavalo-inicial)
  "Algoritmo BFS recursivo para resolver o problema do cavalo."

  (let* ((no-inicial (criar-no-inicial tabuleiro pontos-objetivo))
    (primeiros-sucessores
      (if (funcall fn-pos-cavalo tabuleiro) (list no-inicial) (gerar-sucessores no-inicial tabuleiros-cavalo-inicial fn-calcular-pontos)))
    (abertos primeiros-sucessores))
    (bfs-recursivo-aux abertos '() (lambda (no) (gerar-sucessores no expandir-nos fn-calcular-pontos)))))

;; DFS RECURSIVO
(defun dfs-recursivo (tabuleiro pontos-objetivo expandir-nos fn-calcular-pontos fn-pos-cavalo tabuleiros-cavalo-inicial &optional (d 20))
  "Algoritmo DFS recursivo para resolver o problema do cavalo."

  (let* ((no-inicial (criar-no-inicial tabuleiro pontos-objetivo))
    (primeiros-sucessores
```

```

    (if (funcall fn-pos-cavalo tabuleiro) (list no-inicial) (gerar-sucessores no-inicial tabuleiros-cavalo-inicial fn-
    calcular-pontos)))
    (abertos primeiros-sucessores))
    (dfs-recursivo-aux abertos '() (lambda (no) (gerar-sucessores no expandir-nos fn-calcular-pontos)) d)))

(defun a* (tabuleiro pontos-objetivo expandir-nos fn-calcular-pontos fn-pos-cavalo tabuleiros-cavalo-inicial fn-heuristica)
  "Algoritmo A* recursivo para resolver o problema do cavalo."
  (let* ((no-inicial (criar-no-inicial-a* tabuleiro pontos-objetivo 0 0 0 0))
        (primeiros-sucessores
         (if (funcall fn-pos-cavalo tabuleiro) (list no-inicial) (gerar-sucessores-a* no-inicial tabuleiros-cavalo-inicial
         fn-calcular-pontos fn-heuristica))))
        (abertos primeiros-sucessores))
    (a*-aux abertos '() (lambda (no) (gerar-sucessores-a* no expandir-nos fn-calcular-pontos fn-heuristica)) fn-calcular-
    pontos fn-heuristica)))

```

Aqui estão as funções referentes ao desempenho dos algoritmos:

- **fator-ramificacao-media**: que calcula o fator de ramificação média pelo método da bissecção.
- Depois também temos a função **penetrancia** que calcula a penetrância de um algoritmo.

```

;; ===== MEDIDAS DE DESEMPENHO =====

;; fator de ramificacao media
(defun fator-ramificacao-media (lista &optional (L (tamanho-solucao lista)) (valor-T (num-nos-gerados lista)) (B-min 0) (B-
max valor-T) (margem 0.1))
  "Retorna o fator de ramificacao media (metodo bisseccao)"
  (float (let ((B-avg (/ (+ B-min B-max) 2)))
    (cond ((< (- B-max B-min) margem) (/ (+ B-max B-min) 2))
          ((< (aux-ramificacao B-avg L valor-T) 0) (fator-ramificacao-media lista L valor-T B-avg B-max margem))
          (T (fator-ramificacao-media lista L valor-T B-min B-avg margem))))))

;; B + B^2 + ... + B^L = T
(defun aux-ramificacao (B L valor-T)
  (cond
    ((= 1 L) (- B valor-T))
    (T (+ (expt B L) (aux-ramificacao B (- L 1) valor-T)))))

(defun penetrancia (solucao)
  "Calcula a penetrancia"
  (float (/ (tamanho-solucao solucao) (num-nos-gerados solucao))))

```

Resultados

As tabelas a seguir apresentadas apresentam resultados calculados para cada tabuleiro com os algoritmos implementados.

Tabuleiro	Objetivo (Pontos)	Algoritmo	Heurística	Profundidade máxima	Pontos	Profundidade	Nós gerados	Nós expandidos	Penetrância	F.R.M.	Duração (s)
A	70	BFS	-	-	72	3	9	7	0.4444	1.3711	0.034
A	70	DFS	-	20	72	3	7	5	0.5714	1.2305	0.023
A	70	A*	Base	-	72	3	7	4	0.5714	1.2305	0.027
Tabuleiro	Objetivo (Pontos)	Algoritmo	Heurística	Profundidade máxima	Pontos	Profundidade	Nós gerados	Nós expandidos	Penetrância	F.R.M.	Duração (s)
B	60	BFS	-	-	64	10	50	49	0.2200	1.2207	0.260
B	60	DFS	-	20	64	10	14	9	0.7857	1.066	0.054
B	60	A*	Base	-	64	10	50	49	0.2200	1.2207	0.300
Tabuleiro	Objetivo (Pontos)	Algoritmo	Heurística	Profundidade máxima	Pontos	Profundidade	Nós gerados	Nós expandidos	Penetrância	F.R.M.	Duração (s)
C	270	BFS	-	-	272	6	42	36	0.1666	1.4355	0.183
C	270	DFS	-	20	272	6	16	7	0.4375	1.2188	0.053
C	270	A*	Base	-	282	6	39	31	0.1795	1.4092	0.189
Tabuleiro	Objetivo (Pontos)	Algoritmo	Heurística	Profundidade máxima	Pontos	Profundidade	Nós gerados	Nós expandidos	Penetrância	F.R.M.	Duração (s)
D	600	BFS	-	-	665	12	274	268	0.0474	1.3713	1.235

Tabuleiro	Objetivo (Pontos)	Algoritmo	Heurística	Profundidade máxima	Pontos	Profundidade	Nós gerados	Nós expandidos	Penetrância	F.R.M.	Duração (s)
D	600	DFS	-	20	665	12	40	29	0.3500	1.1328	0.141
D	600	A*	Base	-	665	12	52	33	0.2500	1.1934	0.187

O tabuleiro E é impossível de resolver devido às regras fundamentais do jogo implementado.

Tabuleiro	Objetivo (Pontos)	Algoritmo	Heurística	Profundidade máxima	Pontos	Profundidade	Nós gerados	Nós expandidos	Penetrância	F.R.M.	Duração (s)
E	300	BFS	-	o.m.b.	o.m.b.	o.m.b.	o.m.b.	o.m.b.	o.m.b.	o.m.b.	o.m.b.
E	300	DFS	-	o.m.b.	o.m.b.	o.m.b.	o.m.b.	o.m.b.	o.m.b.	o.m.b.	o.m.b.
E	300	A*	Base	o.m.b.	o.m.b.	o.m.b.	o.m.b.	o.m.b.	o.m.b.	o.m.b.	o.m.b.

```

Tabuleiro F (aleatório)
(
  (35 91 98 37 44 8 61 75 21 43)
  (41 25 9 12 13 26 80 99 84 56)
  (63 16 82 93 20 94 45 32 29 65)
  (73 27 69 47 36 87 83 7 92 74)
  (52 57 24 81 33 60 18 0 76 58)
  (42 66 17 38 39 46 31 89 78 40)
  (97 59 62 34 15 77 30 50 2 67)
  (3 1 53 14 48 79 95 64 4 11)
  (90 28 23 71 70 10 51 86 72 22)
  (88 19 5 6 49 55 54 68 85 96)
)

```

Tabuleiro	Objetivo (Pontos)	Algoritmo	Heurística	Profundidade máxima	Pontos	Profundidade	Nós gerados	Nós expandidos	Penetrância	F.R.M.	Duração (s)
F	2000	BFS	-	s.a.o.	s.a.o.	s.a.o.	s.a.o.	s.a.o.	s.a.o.	s.a.o.	s.a.o.
F	2000	DFS	-	50	2012	46	140	48	0.3357	1.0596	0.706
F	2000	A*	Base	-	2011	27	133	28	0.2105	1.0715	0.692

F.R.M. → Fator de Ramificação Média
 (-) → não aplicável
 s.a.o. → *stack allocation overflow*

Conclusões

Analisando a tabela com os resultados gerados pelos algoritmos, podemos observar que os algoritmos DFS e A* são os mais eficientes em relação ao algoritmo BFS que tem uma performance menor, e quando apresentado com um problema com uma escala maior, muitas das vezes não o consegue o resolver (como mostrado no problema F).

Podemos reparar também que para este tipo de jogo o DFS aparenta encontrar uma solução mais rápida e com uma penetrância mais perto de 1, que o A*, essa solução não sendo necessariamente a melhor solução. Isto deve-se à natureza do jogo e dos algoritmos, em que enquanto o algoritmo A* tenta encontrar o caminho com menor valor para a função de avaliação (gerando e expandindo nós), o DFS só procura num certo caminho até à profundidade limite definida pelo utilizador.

Limitações

A principal limitação do programa corresponde à limitação de memória da edição do *software* **LispWorks Personal Edition**.

Todos os requisitos base enumerados no enunciado foram implementados à exceção de:

- Heurística personalizada
- Bónus
 1. Implementação da estratégia SMA*;
 2. Implementação da estratégia IDA*;
 3. Implementação da estratégia RBFS