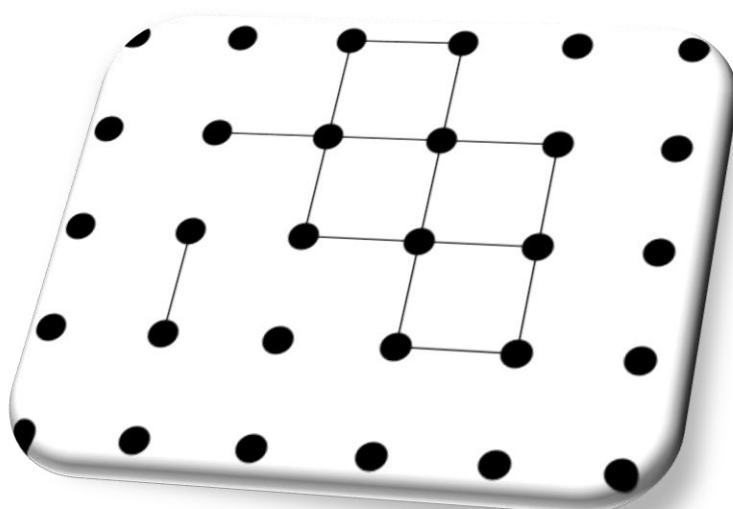


Manual Técnico

Inteligência Artificial 2016/2017



Problema do Puzzle dos Pontos e das Caixas

Professores:

Joaquim Filipe
Cédric Grueau

Turma: 3º-Inf-ES2

140221017 – André Bastos
140221002 – Luís Mestre

Índice

1. Introdução	3
2. Objetos que compõem o projeto	4
2.1. projeto.lisp	4
2.1.1. Objetos de interação com o utilizador	4
2.1.2. Objetos de output e escrita em ficheiros	4
2.2. procura.lisp	4
2.2.1. Procuras	4
2.2.2. Algoritmos	4
2.3. puzzle.lisp	5
2.3.1. Operadores	5
2.3.2. Construtor	5
2.3.3. Criação do tabuleiro	5
2.3.4. Heurística	5
2.3.5. Métodos seletores	5
2.3.6. Funções auxiliares da procura	6
2.3.7. Estatísticas	6
3. Análise crítica de resultados	7
3.1. Breadth-First	7
3.2. Depth-First	7
3.3. A*	8
4. Análise comparativa	8
4.1. Algoritmos	8
4.2. Heurísticas	15
4.2.1. 1ª Heurística	15
4.2.2. 2ª Heurística	16
4.2.3. 3ª Heurística	17
5. Objetivos Não Atingidos	18

1. Introdução

Este documento tem a finalidade de informar o utilizador dos aspetos mais técnicos do projeto. Tendo assim como tópicos o algoritmo geral utilizado, a descrição dos objetos que compõem o projeto (dados e procedimentos), identificação das limitações e opções técnicas. Tem também análises críticas de resultados das execuções do programa, análises comparativas do conjunto de execuções do programa para cada algoritmo e cada problema. Por fim, tem os requisitos não implementados no programa.

Foi-nos solicitado pelos docentes a separação do projeto em 3 ficheiros (projeto.lisp, procura.lisp e puzzle.lisp) diferentes para garantir que a procura seja independente do domínio do problema. Sendo a procura.lisp destinada aos objetos que fazem parte da implementação dos algoritmos, o puzzle.lisp tem os objetos que dependem do domínio do problema e o projeto.lisp tem a parte da interação com o utilizador, escrita e leitura de ficheiros, e importa os outros 2 ficheiros.

Este manual destina-se a utilizadores que compreendam minimamente a linguagem Lisp, visto que é a linguagem que foi sugerida para a implementação do projeto.

2. Objetos que compõem o projeto

2.1. projeto.lisp

2.1.1. Objetos de interação com o utilizador

- iniciar
- load-files
- ler-heuristica
- ler-escolha-utilizador
- ler-tabuleiro-ficheiro
- ler-tabuleiro-ficheiro-aux
- escolher-tabuleiro
- ler-tabuleiro-vazio
- ler-tabuleiro-definido
- ler-dimensoes
- ler-algoritmo
- ler-profundidade
- ler-numero-caixas-fechadas
- limite-numero-caixas-fechadas

2.1.2. Objetos de output e escrita em ficheiros

- escreve
- escreve-ecra-ficheiro

2.2. procura.lisp

2.2.1. Procuras

- procura-generica
- procura-rbfs

2.2.2. Algoritmos

- bfs

- dfs
- a*

2.3. puzzle.lisp

2.3.1. Operadores

- operadores
- arco-vertical
- arco-horizontal
- arco-aux
- arco-na-posicao

2.3.2. Construtor

- cria-no

2.3.3. Criação do tabuleiro

- tabuleiro-vazio
- vertical-vazio
- horizontal-vazio
- linha-vazia

2.3.4. Heurística

- heurística
- heuristica-nova
- heuristica-nova2

2.3.5. Métodos seletores

- get-tabuleiro
- get-profundidade
- get-heuristica
- get-pai
- get-arcos-horizontais

- get-arcos-verticais
- fcusto

2.3.6. Funções auxiliares da procura

- solucaop
- ordenar-nos
- ordenar-nos-rbfs
- sucessores
- sucessores-aux
- existep
- existe-solucao
- posições-dos-sucessores
- lista-posicao
- posicao
- numero-caixas-fechadas
- tira-primeiras
- numero-caixas-fechadas-horizontal
- ver-caixa-fechada
- ver-se-1ª-caixa-potencial
- ver-pos-lista-ligadas
- intersecao
- esta-no-conjunto
- numero-caixas-quase-fechadas
- numero-caixas-quase-fechadas-horizontal
- ver-caixa-quase-fechada
- ver-se-1a-caixa-tem-possivel-quase-caixa

2.3.7. Estatísticas

- numero-de-nos-gerados
- fator-ramificacao-close-guess
- fator-ramificacao
- fator-ramificacao-aux

3. Análise crítica de resultados

Neste projeto foi-nos solicitado a implementação dos algoritmos BFS, DFS, A* e RBFS. Cada um destes tem a sua maneira de chegar ao resultado e por consequência cada um demora o seu tempo, gastando diferentes quantidades de memória. Este estudo é importante para a compreensão dos resultados obtidos, pois, uns algoritmos consomem mais recursos que outros como por exemplo o BFS que tem muitos problemas de memória e isto vai transparecer nos testes feitos em baixo.

Esta análise vai ser feita com os exercícios sugeridos no enunciado, no IDE LispWorks.

3.1. Breadth-First

Sendo este algoritmo uma procura em largura, é o algoritmo que encontra a solução de menor profundidade mas também o que utiliza mais recursos.

Sendo isso bastante transparente no ponto seguinte, pois, apenas conseguiu executar os primeiros 2 exercícios. Tendo como exemplo o primeiro exercício em que o BFS tem apenas uma profundidade de 2 enquanto os restantes algoritmos estão sujeitos a soluções com mais profundidade. Apesar disto, se olharmos para a penetrância este algoritmo fica em desvantagem.

3.2. Depth-First

O algoritmo DFS encontra a solução primeiro a chegar aos últimos ramos das árvores, isto é, está sujeito às soluções de maior profundidade, se pusermos diferentes profundidades máximas nos exercícios pode-se verificar várias soluções diferentes.

Por exemplo, no primeiro exercício do enunciado onde este algoritmo chega a profundidade de 6. Por isso a eficiência deste algoritmo depende muito de onde se localizam as soluções do problema.

3.3. A*

Este algoritmo já é considerado informado, ou seja, considera uma heurística que depende do domínio do problema. As heurísticas podem ser admissíveis ou não, no nosso caso temos a primeira que foi sugerida no enunciado, e mais duas criadas pelos programadores.

O desempenho deste algoritmo depende da sua heurística como podemos observar nos exercícios. Mas para todos os efeitos é suposto encontrar a solução ótima.

Estas heurísticas vão ser faladas mais aprofundadamente num ponto a seguir.

3.4. RBFS

O RBFS também é informado, ou seja, depende de uma heurística para tomar decisões. É um algoritmo mais lento devido à quantidade de operações e iterações que faz, mas compensa em eficácia.

4. Análise comparativa

4.1. Algoritmos

Em baixo vão estar as tabelas com os resultados. Mostra o problema inicial, o algoritmo escolhido, o objetivo. Mostra também as linhas e colunas do nó objetivo, a profundidade (G), a heurística (H, será de 9999 quando são algoritmos que não precisam), tempo de execução, o fator de ramificação, o número de nós gerados, o número de nós expandidos, a penetrância e o nó pai.

Ex. a)	
BFS	<p>Problema: ((NIL NIL NIL) (NIL NIL T) (NIL T T) (NIL NIL T)) ((NIL NIL NIL) (NIL T NIL) (NIL NIL T) (NIL T T))</p> <p>Algoritmo Escolhido: BFS</p> <p>Numero de Caixas Fechadas (Objetivo): 3</p> <p> Linhas: ((NIL NIL NIL) (NIL T T) (NIL T T) (NIL NIL T)) Colunas: ((NIL NIL NIL) (NIL T NIL) (NIL T T) (NIL T T)) G: 2 H: 9999 </p> <p> Tempo de Execucao (segundos): 0 Fator-Ramificacao: 31457265/2097152 </p> <p> Nos-Gerados: 1139 Nos-Expandidos: 80 Penetrancia: 2/1139 </p> <p> Pai: (((NIL NIL NIL) (NIL T T) (NIL T T) (NIL NIL T)) ((NIL NIL NIL) (NIL T NIL) (NIL NIL T) (NIL T T))) 1 9999 (((# # #) (# # #)) 0 9999 NIL)</p>
DFS	<p>Problema: ((NIL NIL NIL) (NIL NIL T) (NIL T T) (NIL NIL T)) ((NIL NIL NIL) (NIL T NIL) (NIL NIL T) (NIL T T))</p> <p>Algoritmo Escolhido: DFS</p> <p>Numero de Caixas Fechadas (Objetivo): 3</p> <p>Profundidade Maxima: 10</p> <p> Linhas: ((T T T) (T T T) (NIL T T) (NIL NIL T)) Colunas: ((NIL NIL NIL) (NIL T NIL) (NIL T T) (NIL T T)) G: 6 H: 9999 </p> <p> Tempo de Execucao (segundos): 0 Fator-Ramificacao: 30085/16384 </p> <p> Nos-Gerados: 82 Nos-Expandidos: 5 Penetrancia: 3/41 </p> <p> Pai: (((T T T) (T T T) (NIL T T) (NIL NIL T)) ((NIL NIL NIL) (NIL T NIL) (NIL NIL T) (NIL T T))) 5 9999 (((# # #) (# # #)) 4 9999 ((# #) 3 9999 (# 2 9999 #)))</p>
A* 1ª H	<p>Problema: ((NIL NIL NIL) (NIL NIL T) (NIL T T) (NIL NIL T)) ((NIL NIL NIL) (NIL T NIL) (NIL NIL T) (NIL T T))</p> <p>Algoritmo Escolhido: A*</p> <p>Numero de Caixas Fechadas (Objetivo): 3</p> <p>Heuristica Escolhida: HEURISTICA</p> <p> Linhas: ((NIL NIL NIL) (NIL T T) (NIL T T) (NIL NIL T)) Colunas: ((NIL NIL NIL) (NIL T NIL) (NIL T T) (NIL T T)) G: 2 H: -1 </p> <p> Tempo de Execucao (segundos): 0 Fator-Ramificacao: 10605/2048 </p> <p> Nos-Gerados: 32 Nos-Expandidos: 2 Penetrancia: 1/16 </p> <p> Pai: (((NIL NIL NIL) (NIL NIL T) (NIL T T) (NIL NIL T)) ((NIL NIL NIL) (NIL T NIL) (NIL T T) (NIL T T))) 1 0 (((# # #) (# # #)) 0 1 NIL)</p>
A* 2ª H	<p>Problema: ((NIL NIL NIL) (NIL NIL T) (NIL T T) (NIL NIL T)) ((NIL NIL NIL) (NIL T NIL) (NIL NIL T) (NIL T T))</p> <p>Algoritmo Escolhido: A*</p> <p>Numero de Caixas Fechadas (Objetivo): 3</p> <p>Heuristica Escolhida: HEURISTICA-NOVA</p> <p> Linhas: ((NIL NIL NIL) (NIL T T) (NIL T T) (NIL NIL T)) Colunas: ((NIL NIL NIL) (NIL T NIL) (NIL T T) (NIL T T)) G: 2 H: 0 </p> <p> Tempo de Execucao (segundos): 0 Fator-Ramificacao: 14680065/1048576 </p> <p> Nos-Gerados: 552 Nos-Expandidos: 39 Penetrancia: 1/276 </p> <p> Pai: (((NIL NIL NIL) (NIL NIL T) (NIL T T) (NIL NIL T)) ((NIL NIL NIL) (NIL T NIL) (NIL T T) (NIL T T))) 1 0 (((# # #) (# # #)) 0 1 NIL)</p>
A* 3ª H	<p>Problema: ((NIL NIL NIL) (NIL NIL T) (NIL T T) (NIL NIL T)) ((NIL NIL NIL) (NIL T NIL) (NIL NIL T) (NIL T T))</p> <p>Algoritmo Escolhido: A*</p> <p>Numero de Caixas Fechadas (Objetivo): 3</p> <p>Heuristica Escolhida: HEURISTICA-NOVA2</p> <p> Linhas: ((NIL NIL NIL) (NIL T T) (NIL T T) (NIL NIL T)) Colunas: ((NIL NIL NIL) (NIL T NIL) (NIL T T) (NIL T T)) G: 2 H: 0 </p> <p> Tempo de Execucao (segundos): 0 Fator-Ramificacao: 6525/1024 </p> <p> Nos-Gerados: 47 Nos-Expandidos: 3 Penetrancia: 2/47 </p> <p> Pai: (((NIL NIL NIL) (NIL NIL T) (NIL T T) (NIL NIL T)) ((NIL NIL NIL) (NIL T NIL) (NIL T T) (NIL T T))) 1 1 (((# # #) (# # #)) 0 2 NIL)</p>
RBFS (1ª H)	<p>Problema: ((NIL NIL NIL) (NIL NIL T) (NIL T T) (NIL NIL T)) ((NIL NIL NIL) (NIL T NIL) (NIL NIL T) (NIL T T))</p> <p>Algoritmo Escolhido: RBFS</p> <p>Numero de Caixas Fechadas (Objetivo): 3</p> <p>Heuristica Escolhida: HEURISTICA</p> <p> Linhas: ((NIL NIL NIL) (NIL T T) (NIL T T) (NIL NIL T)) Colunas: ((NIL NIL NIL) (NIL T NIL) (NIL T T) (NIL T T)) G: 2 H: -1 </p> <p> Tempo de Execucao (segundos): 0 Fator-Ramificacao: 16.00000 </p> <p> Nos-Gerados: 31 Nos-Expandidos: 2 Penetrancia: 2/31 </p> <p> Pai: (((NIL NIL NIL) (NIL NIL T) (NIL T T) (NIL NIL T)) ((NIL NIL NIL) (NIL T NIL) (NIL T T) (NIL T T))) 1 0 (((# # #) (# # #)) 0 1 NIL)</p>

Ex. b)	
BFS	<p>Problema: ((NIL NIL T NIL) (T T T T) (NIL NIL T T) (NIL NIL T T) (NIL NIL T T)) ((NIL NIL T T) (NIL NIL T T) (T T T T) (T NIL T T) (NIL T T T))</p> <p>Algoritmo Escolhido: BFS</p> <p>Numero de Caixas Fechadas (Objetivo): 7</p> <p> Linhas: ((NIL NIL T NIL) (T T T T) (NIL NIL T T) (NIL NIL T T) (NIL NIL T T)) Colunas: ((NIL NIL T T) (NIL NIL T T) (T T T T) (T T T T) (NIL T T T)) G: 1 H: 9999 </p> <p> Tempo de Execucao (segundos): 0 Fator-Ramificacao: 31457265/2097152 </p> <p> Nos-Gerados: 198 Nos-Expandidos: 14 Penetrancia: 1/198 </p> <p> Pai: (((NIL NIL T NIL) (T T T T) (NIL NIL T T) (NIL NIL T T) (NIL NIL T T)) ((NIL NIL T T) (NIL NIL T T) (T T T T) (T NIL T T) (NIL T T T)) 0 9999 NIL)</p>
DFS	<p>Problema: ((NIL NIL T NIL) (T T T T) (NIL NIL T T) (NIL NIL T T) (NIL NIL T T)) ((NIL NIL T T) (NIL NIL T T) (T T T T) (T NIL T T) (NIL T T T))</p> <p>Algoritmo Escolhido: DFS</p> <p>Numero de Caixas Fechadas (Objetivo): 7</p> <p>Profundidade Maxima: 20</p> <p> Linhas: ((NIL NIL T NIL) (T T T T) (NIL NIL T T) (NIL NIL T T) (NIL NIL T T)) Colunas: ((NIL NIL T T) (NIL NIL T T) (T T T T) (T T T T) (NIL T T T)) G: 1 H: 9999 </p> <p> Tempo de Execucao (segundos): 0 Fator-Ramificacao: 31457265/2097152 </p> <p> Nos-Gerados: 16 Nos-Expandidos: 0 Penetrancia: 1/16 </p> <p> Pai: (((NIL NIL T NIL) (T T T T) (NIL NIL T T) (NIL NIL T T) (NIL NIL T T)) ((NIL NIL T T) (NIL NIL T T) (T T T T) (T NIL T T) (NIL T T T)) 0 9999 NIL)</p>
A* 1ª heurística	<p>Problema: ((NIL NIL T NIL) (T T T T) (NIL NIL T T) (NIL NIL T T) (NIL NIL T T)) ((NIL NIL T T) (NIL NIL T T) (T T T T) (T NIL T T) (NIL T T T))</p> <p>Algoritmo Escolhido: A*</p> <p>Numero de Caixas Fechadas (Objetivo): 7</p> <p>Heuristica Escolhida: HEURISTICA</p> <p> Linhas: ((NIL NIL T NIL) (T T T T) (NIL NIL T T) (NIL NIL T T) (NIL NIL T T)) Colunas: ((NIL NIL T T) (NIL NIL T T) (T T T T) (T T T T) (NIL T T T)) G: 1 H: -1 </p> <p> Tempo de Execucao (segundos): 0 Fator-Ramificacao: 31457265/2097152 </p> <p> Nos-Gerados: 16 Nos-Expandidos: 1 Penetrancia: 1/16 </p> <p> Pai: (((NIL NIL T NIL) (T T T T) (NIL NIL T T) (NIL NIL T T) (NIL NIL T T)) ((NIL NIL T T) (NIL NIL T T) (T T T T) (T NIL T T) (NIL T T T)) 0 1 NIL)</p>
A* 2ª heurística	<p>Problema: ((NIL NIL T NIL) (T T T T) (NIL NIL T T) (NIL NIL T T) (NIL NIL T T)) ((NIL NIL T T) (NIL NIL T T) (T T T T) (T NIL T T) (NIL T T T))</p> <p>Algoritmo Escolhido: A*</p> <p>Numero de Caixas Fechadas (Objetivo): 7</p> <p>Heuristica Escolhida: HEURISTICA-NOVA</p> <p> Linhas: ((NIL NIL T NIL) (T T T T) (NIL NIL T T) (NIL NIL T T) (NIL NIL T T)) Colunas: ((NIL NIL T T) (NIL NIL T T) (T T T T) (T T T T) (NIL T T T)) G: 1 H: 0 </p> <p> Tempo de Execucao (segundos): 0 Fator-Ramificacao: 15 </p> <p> Nos-Gerados: 15 Nos-Expandidos: 1 Penetrancia: 1/15 </p> <p> Pai: (((NIL NIL T NIL) (T T T T) (NIL NIL T T) (NIL NIL T T) (NIL NIL T T)) ((NIL NIL T T) (NIL NIL T T) (T T T T) (T NIL T T) (NIL T T T)) 0 0 NIL)</p>
A* 3ª heurística	<p>Problema: (((NIL NIL T NIL) (T T T T) (NIL NIL T T) (NIL NIL T T) (NIL NIL T T)) ((NIL NIL T T) (NIL NIL T T) (T T T T) (T NIL T T) (NIL T T T))</p> <p>Algoritmo Escolhido: A*</p> <p>Numero de Caixas Fechadas (Objetivo): 7</p> <p>Heuristica Escolhida: HEURISTICA-NOVA2</p> <p> Linhas: ((NIL NIL T NIL) (T T T T) (NIL NIL T T) (NIL NIL T T) (NIL NIL T T)) Colunas: ((NIL NIL T T) (NIL NIL T T) (T T T T) (T T T T) (NIL T T T)) G: 1 H: 0 </p> <p> Tempo de Execucao (segundos): 0 Fator-Ramificacao: 31457265/2097152 </p> <p> Nos-Gerados: 16 Nos-Expandidos: 1 Penetrancia: 1/16 </p> <p> Pai: (((NIL NIL T NIL) (T T T T) (NIL NIL T T) (NIL NIL T T) (NIL NIL T T)) ((NIL NIL T T) (NIL NIL T T) (T T T T) (T NIL T T) (NIL T T T)) 0 2 NIL)</p>
RBFS (1ª Heurística)	<p>Problema: ((NIL NIL T NIL) (T T T T) (NIL NIL T T) (NIL NIL T T) (NIL NIL T T)) ((NIL NIL T T) (NIL NIL T T) (T T T T) (T NIL T T) (NIL T T T))</p> <p>Algoritmo Escolhido: RBFS</p> <p>Numero de Caixas Fechadas (Objetivo): 7</p> <p>Heuristica Escolhida: HEURISTICA</p> <p> Linhas: ((NIL NIL T NIL) (T T T T) (NIL NIL T T) (NIL NIL T T) (NIL NIL T T)) Colunas: ((NIL NIL T T) (NIL NIL T T) (T T T T) (T T T T) (NIL T T T)) G: 1 H: -1 </p> <p> Tempo de Execucao (segundos): 0 Fator-Ramificacao: 15.00000 </p> <p> Nos-Gerados: 15 Nos-Expandidos: 1 Penetrancia: 1/15 </p> <p> Pai: (((NIL NIL T NIL) (T T T T) (NIL NIL T T) (NIL NIL T T) (NIL NIL T T)) ((NIL NIL T T) (NIL NIL T T) (T T T T) (T NIL T T) (NIL T T T)) 0 1 NIL)</p>

Ex. c)	
BFS	Problemas de memória
DFS	<p>Problema: ((NIL NIL T NIL) (T NIL T T) (NIL NIL T T) (NIL NIL T T) (NIL NIL T T)) ((NIL NIL T T) (NIL NIL T T) (NIL NIL T T) (T NIL T T) (NIL T T T))</p> <p>Algoritmo Escolhido: DFS</p> <p>Numero de Caixas Fechadas (Objetivo): 10</p> <p>Profundidade Maxima: 20</p> <p> Linhas: ((T T T T) (T T T T) (T T T T) (T T T T) (T T T T)) Colunas: ((T T T T) (T T T T) (NIL NIL T T) (T NIL T T) (NIL T T T)) G: 14 H: 9999 </p> <p> Tempo de Execucao (segundos): 0 Fator-Ramificacao: 84995/65536 </p> <p> Nos-Gerados: 162 Nos-Expandidos: 13 Penetrancia: 7/81 </p> <p> Pai: (((T T T T) (T T T T) (T T T T) (T T T T) (T T T T)) ((T T T T) (T NIL T T) (NIL NIL T T) (T NIL T T) (NIL T T T)) 13 9999 (((# # # #) (# # # #)) 12 9999 ((# #) 11 9999 (# 10 9999 #))))</p>
A* 1ª heurística	<p>Problema: ((NIL NIL T NIL) (T NIL T T) (NIL NIL T T) (NIL NIL T T) (NIL NIL T T)) ((NIL NIL T T) (NIL NIL T T) (NIL NIL T T) (T NIL T T) (NIL T T T))</p> <p>Algoritmo Escolhido: A*</p> <p>Numero de Caixas Fechadas (Objetivo): 10</p> <p>Heuristica Escolhida: HEURISTICA</p> <p> Linhas: ((NIL NIL T T) (T NIL T T) (T NIL T T) (T NIL T T) (T NIL T T)) Colunas: ((NIL NIL T T) (NIL NIL T T) (T T T T) (T T T T) (T T T T)) G: 8 H: -1 </p> <p> Tempo de Execucao (segundos): 0 Fator-Ramificacao: 2722709/1048576 </p> <p> Nos-Gerados: 3359 Nos-Expandidos: 225 Penetrancia: 8/3359 </p> <p> Pai: (((NIL NIL T T) (T NIL T T) (T NIL T T) (T NIL T T) (T NIL T T)) ((NIL NIL T T) (NIL NIL T T) (T NIL T T) (T T T T) (T T T T)) 7 0 (((# # # #) (# # # #)) 6 1 ((# #) 5 2 (# 4 3 #))))</p>
A* 2ª heurística	Problemas de memória
A* 3ª heurística	<p>Problema: ((NIL NIL T NIL) (T NIL T T) (NIL NIL T T) (NIL NIL T T) (NIL NIL T T)) ((NIL NIL T T) (NIL NIL T T) (NIL NIL T T) (T NIL T T) (NIL T T T))</p> <p>Algoritmo Escolhido: A*</p> <p>Numero de Caixas Fechadas (Objetivo): 10</p> <p>Heuristica Escolhida: HEURISTICA-NOVA2</p> <p> Linhas: ((NIL NIL T NIL) (T NIL T T) (T T T T) (T T T T) (T T T T)) Colunas: ((NIL NIL T T) (NIL NIL T T) (T NIL T T) (T T T T) (T T T T)) G: 8 H: 0 </p> <p> Tempo de Execucao (segundos): 1 Fator-Ramificacao: 6186851/2097152 </p> <p> Nos-Gerados: 8678 Nos-Expandidos: 665 Penetrancia: 4/4339 </p> <p> Pai: (((NIL NIL T NIL) (T NIL T T) (T T T T) (T T T T) (T T T T)) ((NIL NIL T T) (NIL NIL T T) (T NIL T T) (T NIL T T) (NIL T T T)) 7 1 (((# # # #) (# # # #)) 6 2 ((# #) 5 3 (# 4 4 #))))</p>
RBFS (1ª Heurística)	<p>Problema: ((NIL NIL T NIL) (T NIL T T) (NIL NIL T T) (NIL NIL T T) (NIL NIL T T)) ((NIL NIL T T) (NIL NIL T T) (NIL NIL T T) (T NIL T T) (NIL T T T))</p> <p>Algoritmo Escolhido: RBFS</p> <p>Numero de Caixas Fechadas (Objetivo): 10</p> <p>Heuristica Escolhida: HEURISTICA</p> <p> Linhas: ((NIL NIL T T) (T NIL T T) (T NIL T T) (T NIL T T) (T NIL T T)) Colunas: ((NIL NIL T T) (NIL NIL T T) (T T T T) (T T T T) (T T T T)) G: 8 H: -1 </p> <p> Tempo de Execucao (segundos): 0 Fator-Ramificacao: 18.00000 </p> <p> Nos-Gerados: 26047 Nos-Expandidos: 1947 Penetrancia: 8/26047 </p> <p> Pai: (((NIL NIL T NIL) (T NIL T T) (T NIL T T) (T NIL T T) (T NIL T T)) ((NIL NIL T T) (NIL NIL T T) (T T T T) (T T T T) (T T T T)) 7 0 (((# # # #) (# # # #)) 6 0 ((# #) 5 1 (# 4 2 #))))</p>

[illegible]

Ex. e)	
BFS	Problemas de memória
DFS	<p>Problema: ((NIL NIL NIL T NIL NIL) (NIL NIL NIL T T T) (T T T T T NIL) (NIL NIL NIL T T NI L) (NIL NIL NIL T T NIL) (NIL NIL T T T T) (NIL NIL T T T T)) ((NIL NIL NIL T T T) (NIL T N IL NIL T T) (NIL T T NIL T T) (NIL NIL T T NIL NIL) (T NIL T NIL T NIL) (NIL NIL T T NIL NI L) (NIL T T T T T))</p> <p>Algoritmo Escolhido: DFS</p> <p>Numero de Caixas Fechadas (Objetivo): 20</p> <p>Profundidade Maxima: 40</p> <p> Linhas: ((T T T T T T) (T T T T T T) (T T T T T T) (T T T T T T) (T T T T T T) (T T T T T T) (T T T T T T)) Colunas: ((T T T T T T) (T T T T T T) (T T T T T T) (T NIL T T T NIL NIL) (T NIL T NIL T NIL) (NIL NIL T T NIL NIL) (NIL T T T T T)) G: 30 H: 9999 </p> <p> Tempo de Execucao (segundos): 0 Fator-Ramificacao: 76833/65536 </p> <p> Nos-Gerados: 796 Nos-Expandidos: 29 Penetrancia: 15/398 </p> <p> Pai: (((T T T T T T) (T T T T T T) (T T T T T T) (T T T T T T) (T T T T T T) (T T T T T T) (T T T T T T)) ((T T T T T T) (T T T T T T) (T T T T T T) (NIL NIL T T T NIL NIL) (T NIL T NIL T NIL) (NIL NIL T T T NIL NIL) (NIL T T T T T T)) 29 9999 (((# # # # # #) (# # # # # #) (# # # # # #) 28 9999 ((# #) 27 9999 (# 26 9999 #))))</p>
A* 1ª heurística	<p>Problema: ((NIL NIL NIL T NIL NIL) (NIL NIL NIL T T T) (T T T T T NIL) (NIL NIL NIL T T NI L) (NIL NIL NIL T T NIL) (NIL NIL T T T T) (NIL NIL T T T T)) ((NIL NIL NIL T T T) (NIL T N IL NIL T T) (NIL T T NIL T T) (NIL NIL T T NIL NIL) (T NIL T NIL T NIL) (NIL NIL T T NIL NI L) (NIL T T T T T))</p> <p>Algoritmo Escolhido: A*</p> <p>Numero de Caixas Fechadas (Objetivo): 20</p> <p>Heuristica Escolhida: HEURISTICA</p> <p> Linhas: ((NIL NIL NIL T NIL NIL) (NIL T NIL T T T) (T T T T T T) (NIL NIL T T T T) (NIL N IL T T T T) (NIL NIL T T T T) (NIL NIL T T T T)) Colunas: ((NIL NIL NIL T T T) (NIL T NIL T T T) (NIL T T T T T T) (T NIL T T T T) (T NIL T T T T) (T T T T T T) (NIL T T T T T T)) G: 16 H: -1 </p> <p> Tempo de Execucao (segundos): 0 Fator-Ramificacao: 1472237/1048576 </p> <p> Nos-Gerados: 789 Nos-Expandidos: 23 Penetrancia: 16/789 </p> <p> Pai: (((NIL NIL NIL T NIL NIL) (NIL T NIL T T T) (T T T T T T) (NIL NIL T T T T) (NIL NI L T T T T) (NIL NIL T T T T) (NIL NIL T T T T)) ((NIL NIL NIL T T T) (NIL T NIL NIL T T) (N IL T T T T) (T NIL T T T T) (T NIL T T T T) (NIL T T T T T) (NIL T T T T T T)) 15 0 (((# # # # #) (# # # # #) (# # # # #) 14 1 ((# #) 13 2 (# 12 3 #))))</p>
A* 2ª heurística	Problemas de memória
A* 3ª heurística	Problemas de memória
RBFS (1ª Heurística)	<p>Problema: ((NIL NIL NIL T NIL NIL) (NIL NIL NIL T T T) (T T T T T NIL) (NIL NIL NIL T T NI L) (NIL NIL NIL T T NIL) (NIL NIL T T T T) (NIL NIL T T T T)) ((NIL NIL NIL T T T) (NIL T N IL NIL T T) (NIL T T NIL T T) (NIL NIL T T T NIL) (T NIL T NIL T NIL) (NIL NIL T T T NIL NI L) (NIL T T T T T))</p> <p>Algoritmo Escolhido: RBFS</p> <p>Numero de Caixas Fechadas (Objetivo): 20</p> <p>Heuristica Escolhida: HEURISTICA</p> <p> Linhas: ((NIL NIL NIL T NIL NIL) (NIL NIL NIL T T T) (T T T T T T) (NIL NIL T T T T) (NIL T T T T T) (NIL NIL T T T T) (NIL NIL T T T T)) Colunas: ((NIL NIL NIL T T T) (NIL T N IL NIL T T) (NIL T T T T T) (T T T T T T) (T T T T T T) (NIL T T T T T) (NIL T T T T T)) G: 16 H: -1 </p> <p> Tempo de Execucao (segundos): 0 Fator-Ramificacao: 40.99999 </p> <p> Nos-Gerados: 536 Nos-Expandidos: 16 Penetrancia: 2/67 </p> <p> Pai: (((NIL NIL NIL T NIL NIL) (NIL NIL NIL T T T) (T T T T T T) (NIL NIL T T T T) (NIL T T T T T) (NIL NIL T T T T) (NIL NIL T T T T)) ((NIL NIL NIL T T T) (NIL T NIL NIL T T) (N IL T T T T) (T NIL T T T T) (T T T T T T) (NIL T T T T T) (NIL T T T T T T)) 15 0 (((# # # # #) (# # # # #) (# # # # #) 14 1 ((# #) 13 2 (# 12 3 #))))</p>

Ex. f)	
BFS	Problemas de memória
DFS	<p>Problema: (((NIL NIL NIL NIL NIL NIL NIL) (NIL NIL NIL NIL NIL NIL NIL) (NIL NIL NIL NIL NIL NIL NIL) (NIL NIL NIL NIL NIL NIL NIL) (NIL T NIL NIL NIL NIL NIL) (NIL T NIL NIL NIL NIL NIL) (NIL NIL NIL NIL NIL NIL NIL) ((NIL NIL NIL NIL NIL NIL NIL)) ((NIL NIL NIL NIL NIL NIL NIL) (NIL NIL NIL NIL T NIL NIL) (NIL NIL NIL NIL NIL NIL NIL) (NIL NIL NIL NIL NIL NIL NIL) (NIL NIL NIL NIL NIL NIL NIL) (NIL NIL NIL NIL NIL NIL NIL) (NIL NIL NIL NIL NIL NIL NIL)))</p> <p>Algoritmo Escolhido: DFS Numero de Caixas Fechadas (Objetivo): 45 Profundidade Maxima: 200</p> <pre> Linhas: ((T T T T T T T) (T T T T T T T) (T T T T T T T) (T T T T T T T) (T T T T T T T) > (T T T T T T T) (T T T T T T T) (T T T T T T T)) Colunas: ((T T T T T T T) (T T T T T T T)) (T T T T T T T) (T T T T T T T) (T T T T T T T) (T T T T T T T) (T T T T T T T) (T T T NI> L NIL NIL NIL)) G: 105 H: 9999 Tempo de Execucao (segundos): 0 Fator-Ramificacao: 2215665/2097152 Nos-Gerados: 5986 Nos-Expandidos: 104 Penetrancia: 105/5986 Pai: (((((T T T T T T T) (T T T T T T T) (T T T T T T T) (T T T T T T T) (T T T T T T T) (T T T T T T T) (T T T T T T T) (T T T T T T T)) ((T T T T T T T) (T T T T T T T) (T T T T T T) (T T T T T T T) (T T T T T T T) (T T T T T T T) (T T T T T T T) (T T NIL NIL NIL NIL NIL)))) 104 9999 (((# # # # # # #) (# # # # # # #)) 103 9999 ((# #) 102 9999 (# 101 9999 #)))))</pre>
A* 1ª heurística	Problemas de memória
A* 2ª heurística	Problemas de memória
A* 3ª heurística	Problemas de memória
RBFS (1ª Heurística)	Problemas de memória

4.2. Heurísticas

Nesta parte vai ser explicada a admissibilidade de cada heurística implementada, tendo como exemplo o exercício c proposto no enunciado.

4.2.1. 1ª Heurística

Esta heurística tem em consideração o objetivo e o número de caixas já fechadas -1 (obj – nr-caixas-fechadas -1), logo o valor da heurística vai ser sempre a previsão mais lógica (obj – nr-caixas-fechadas) menos 1 valor, a consequência disto é que os nós objetivos ficam com uma heurística de -1.

Iremos verificar se $h' \leq h$.

```
Problema: (((NIL NIL T NIL) (T NIL T T) (NIL NIL T T) (NIL NIL T T) (NIL NIL T T)) ((NIL NI
L T T) (NIL NIL T T) (NIL NIL T T) (T NIL T T) (NIL T T T)))
Algoritmo Escolhido: A*
Numero de Caixas Fechadas (Objetivo): 10
Heuristica Escolhida: HEURISTICA
| Linhas: ((NIL NIL T T) (T NIL T T) (T NIL T T) (T NIL T T) (T NIL T T)) | Colunas: ((NIL
NIL T T) (NIL NIL T T) (T T T T) (T T T T) (T T T T)) | G: 8 | H: -1 |
| Tempo de Execucao (segundos): 0 | Fator-Ramificacao: 2722709/1048576 |
| Nos-Gerados: 3359 | Nos-Expandidos: 225 | Penetrancia: 8/3359 |
| Pai: (((((NIL NIL T T) (T NIL T T) (T NIL T T) (T NIL T T) (T NIL T T)) ((NIL NIL T T) (NI
L NIL T T) (T NIL T T) (T T T T) (T T T T))) 7 0 (((((NIL NIL T T) (T NIL T T) (T NIL T T) (
T NIL T T) (T NIL T T)) ((NIL NIL T T) (NIL NIL T T) (T NIL T T) (T NIL T T) (T T T T))) 6
1 (((((NIL NIL T T) (T NIL T T) (T NIL T T) (T NIL T T) (T NIL T T)) ((NIL NIL T T) (NIL NIL
T T) (NIL NIL T T) (T NIL T T) (T T T T))) 5 2 (((((NIL NIL T T) (T NIL T T) (T NIL T T) (T
NIL T T) (NIL NIL T T)) ((NIL NIL T T) (NIL NIL T T) (NIL NIL T T) (NIL NIL T T) (T NIL T T)
4 3 (((((NIL NIL T T) (T NIL T T) (T NIL T T) (NIL NIL T T) (NIL NIL T T)) ((NIL NIL T T) (
NIL NIL T T) (NIL NIL T T) (T NIL T T) (T T T T))) 3 4 (((((NIL NIL T T) (T NIL T T) (T NI
L T T) (NIL NIL T T) (NIL NIL T T)) ((NIL NIL T T) (NIL NIL T T) (NIL NIL T T) (T NIL T T)
(T T T T))) 2 5 (((((NIL NIL T T) (T NIL T T) (NIL NIL T T) (NIL NIL T T) (NIL NIL T T)) (
NIL NIL T T) (NIL NIL T T) (NIL NIL T T) (T NIL T T) (T T T T))) 1 5 (((((NIL NIL T T) (T
NIL T T) (NIL NIL T T) (NIL NIL T T) (NIL NIL T T)) ((NIL NIL T T) (NIL NIL T T) (NIL NIL
T T) (T NIL T T) (NIL T T T))) 0 5 NIL)))))))))
```

Estão assinaladas na imagem a vermelho as heurísticas.

Podemos concluir que em qualquer nó o h' é sempre inferior ao real h . Sabendo que esta encontra o melhor caminho, podemos concluir que esta heurística é admissível mas tem implicações sobre o custo pois mostra um decremento de 1 e o nó final acaba com heurística de -1.

4.2.2. 2ª Heurística

Esta heurística foi proposta pelos programadores e terá em conta o objetivo, número de caixas já fechadas e o número de caixas quase fechadas (- obj (numero-caixas-fechadas tabuleiro) (cond ((< (numero-caixas-quase-fechadas tabuleiro) 0) (abs (numero-caixas-quase-fechadas tabuleiro)))) (t 0))). Primeiramente houve a ideia da heurística ser objetivo – nrCaixasFechadas – nrCaixasQuaseFechadas mas não era admissível de maneira nenhuma pois haviam nós com heurísticas negativas e o programa escolhia uma solução menos eficiente pois escolhia os tabuleiros com mais caixas quase fechadas, não dando a solução ótima.

Chegámos à conclusão que se usássemos o mesmo conceito mas quando a heurística se torna negativa, que quer dizer que é um nó com mais caixas quase fechadas do que devia, tornamos o valor positivo, ficando mais abaixo no posicionamento visto que a escolha é pelo nó com menor valor de heurística. Sendo assim, esta heurística escolhe o melhor caminho e quanto mais perto a soma de número de caixas fechadas com o número de caixas quase fechadas for do número 0, mais cedo será considerada pelo programa.

```
Problema: (((NIL NIL T NIL) (T T T T) (NIL NIL T T) (NIL NIL T T) (NIL NIL T T)) ((NIL NIL T T) (NIL NIL T T) (T T T T) (T NIL T T) (NIL T T T)))
Algoritmo Escolhido: A*
Numero de Caixas Fechadas (Objetivo): 9
Heuristica Escolhida: HEURISTICA-NOVA
| Linhas: ((NIL NIL T NIL) (T T T T) (T NIL T T) (T NIL T T) (T NIL T T)) | Colunas: ((NIL T T) (NIL NIL T T) (T T T T) (T T T T) (NIL T T T)) | G: 4 | H: 0 |
| Tempo de Execucao (segundos): 1 | Fator-Ramificacao: 7864319/524288 |
| Nos-Gerados: 5368 | Nos-Expandidos: 446 | Penetrancia: 1/1342 |
| Pai: (((NIL NIL T NIL) (T T T T) (T NIL T T) (T NIL T T) (NIL NIL T T)) ((NIL NIL T T) (NIL NIL T T) (T T T T) (T T T T) (NIL T T T))) 3 0 (((# # # #) (# # # #)) 2 1 ((# #) 1 1 (# 0 2 NIL)))
```

```
Problema: (((NIL NIL NIL) (NIL NIL T) (NIL T T) (NIL NIL T)) ((NIL NIL NIL) (NIL T NIL) (NIL T NIL) (NIL T T)))
Algoritmo Escolhido: A*
Numero de Caixas Fechadas (Objetivo): 3
Heuristica Escolhida: HEURISTICA-NOVA
| Linhas: ((NIL NIL NIL) (NIL T T) (NIL T T) (NIL NIL T)) | Colunas: ((NIL NIL NIL) (NIL T NIL) (NIL T T) (NIL T T)) | G: 2 | H: 0 |
| Tempo de Execucao (segundos): 0 | Fator-Ramificacao: 14680065/1048576 |
| Nos-Gerados: 552 | Nos-Expandidos: 39 | Penetrancia: 1/276 |
| Pai: (((NIL NIL NIL) (NIL NIL T) (NIL T T) (NIL NIL T)) ((NIL NIL NIL) (NIL T NIL) (NIL T T) (NIL T T))) 1 0 (((# # #) (# # #)) 0 1 NIL))
```

Concluimos que esta heurística é admissível apesar de a partir de uma certa altura no algoritmo as heurísticas dos nós escolhidos

ficam todos a 0 e não apenas o nó final, pois o h' nunca ultrapassar o real h e encontra a melhor solução.

4.2.3. 3ª Heurística

A última heurística também tem em consideração o objetivo, número de caixas já fechadas e o número de caixas quase fechadas ($\text{obj} - (\text{max nr-caixas-fechadas nr-caixas-quase-fechadas})$), assim escolhe sempre o maior dos dois valores para retirar ao valor do objetivo.

```
Problema: (((NIL NIL T NIL) (T NIL T T) (NIL NIL T T) (NIL NIL T T) (NIL NIL T T)) ((NIL NI
L T T) (NIL NIL T T) (NIL NIL T T) (T NIL T T) (NIL T T T)))
Algoritmo Escolhido: A*
Numero de Caixas Fechadas (Objetivo): 10
Heuristica Escolhida: HEURISTICA-NOVA2
| Linhas: ((NIL NIL T NIL) (T NIL T T) (T T T T) (T T T T) (T T T T)) | Colunas: ((NIL NIL
T T) (NIL NIL T T) (T NIL T T) (T T T T) (NIL T T T)) | G: 8 | H: 0 |
| Tempo de Execucao (segundos): 2 | Fator-Ramificacao: 6186851/2097152 |
| Nos-Gerados: 8678 | Nos-Expandidos: 665 | Penetrancia: 4/4339 |
| Pai: (((((NIL NIL T NIL) (T NIL T T) (T T T T) (T T T T) (T T T T)) ((NIL NIL T T) (NIL NI
L T T) (T NIL T T) (T NIL T T) (NIL T T T))) 7 1 (((((NIL NIL T NIL) (T NIL T T) (T T T T) (
T T T T) (T T T T)) ((NIL NIL T T) (NIL NIL T T) (NIL NIL T T) (T NIL T T) (NIL T T T))) 6
2 (((((NIL NIL T NIL) (T NIL T T) (T T T T) (T T T T) (T NIL T T)) ((NIL NIL T T) (NIL NIL T
T) (NIL NIL T T) (T NIL T T) (NIL T T T))) 5 3 (((((NIL NIL T NIL) (T NIL T T) (T T T T) (T
T T T) (NIL NIL T T)) ((NIL NIL T T) (NIL NIL T T) (NIL NIL T T) (T NIL T T) (NIL T T T)))
4 4 (((((NIL NIL T NIL) (T NIL T T) (T NIL T T) (T T T T) (NIL NIL T T)) ((NIL NIL T T) (NI
L NIL T T) (NIL NIL T T) (T NIL T T) (NIL T T T))) 3 5 (((((NIL NIL T NIL) (T NIL T T) (NIL
NIL T T) (T T T T) (NIL NIL T T)) ((NIL NIL T T) (NIL NIL T T) (NIL NIL T T) (T NIL T T) (N
IL T T T))) 2 4 (((((NIL NIL T NIL) (T NIL T T) (NIL NIL T T) (T NIL T T) (NIL NIL T T)) ((N
IL NIL T T) (NIL NIL T T) (NIL NIL T T) (T NIL T T) (NIL T T T))) 1 6 (((((NIL NIL T NIL) (T
NIL T T) (NIL NIL T T) (NIL NIL T T) (NIL NIL T T)) ((NIL NIL T T) (NIL NIL T T) (NIL NIL
T T) (T NIL T T) (NIL T T T))) 0 6 NIL)))))))))
```

É revelante apontar o facto desta heurística fazer a simulação demorar mais tempo de execução, apesar de todo o seu h' também não ser maior que o valor real de h . Tem um valor de penetrância menor e gera/expande muitos mais nós.

Podíamos afirmar que esta heurística é admissível mas reparámos que existem situações em que esta não escolhe a melhor solução, nomeadamente quando o tabuleiro inicial já tem muitas caixas quase fechadas, como faz o max e subtrai o número de quase fechadas pois é mais alto, acaba por ter heurística negativa dar prioridade a caminhos que envolvam o máximo número de quase caixas possível.

```

| Linhas: ((NIL NIL NIL T T NIL) (NIL NIL NIL T T T) (T T T T T NIL) (NIL NIL NIL T T T) (N
IL NIL T T T NIL) (T T T T T T) (NIL NIL T T T T)) | Colunas: ((NIL T T T T T) (NIL T T NIL
T T) (NIL T T T T T) (NIL T T T NIL NIL) (T NIL T NIL T T) (NIL T T T T NIL) (NIL T T T T
T)) | G: 13 | H: -24 |
| Pai: (((NIL NIL NIL T T NIL) (NIL NIL NIL T T T) (T T T T T NIL) (NIL NIL NIL T T T) (NI
L NIL T T T NIL) (T T T T T T) (NIL NIL T T T T)) ((NIL T T T T T) (NIL T T NIL T T) (NIL T
T T T T) (NIL T T T NIL NIL) (T NIL T NIL T T) (NIL T T T NIL NIL) (NIL T T T T T))) 12 -2
4 (((NIL NIL NIL T NIL NIL) (NIL NIL NIL T T T) (T T T T T NIL) (NIL NIL NIL T T T) (NIL N
IL T T T NIL) (T T T T T T) (NIL NIL T T T T)) ((NIL T T T T T) (NIL T T NIL T T) (NIL T T
T T T) (NIL T T T NIL NIL) (T NIL T NIL T T) (NIL T T T NIL NIL) (NIL T T T T T))) 11 -23 (
(((NIL NIL NIL T NIL NIL) (NIL NIL NIL T T T) (T T T T T NIL) (NIL NIL NIL T T T) (NIL NIL
T T T NIL) (T T T T T T) (NIL NIL T T T T)) ((NIL T T T T T) (NIL T T NIL T T) (NIL T T NIL
T T) (NIL T T T NIL NIL) (T NIL T NIL T T) (NIL T T T NIL NIL) (NIL T T T T T))) 10 -22 ((
(NIL NIL NIL T NIL NIL) (NIL NIL NIL T T T) (T T T T T NIL) (NIL NIL NIL T T T) (NIL NIL T
T T NIL) (T T T T T T) (NIL NIL T T T T)) ((NIL T NIL T T T) (NIL T T NIL T T) (NIL T T NI
L T T) (NIL T T T NIL NIL) (T NIL T NIL T T) (NIL T T T NIL NIL) (NIL T T T T T))) 9 -21 ((
(NIL NIL NIL T NIL NIL) (NIL NIL NIL T T T) (T T T T T NIL) (NIL NIL NIL T T T) (NIL NIL T
T T NIL) (T T T T T T) (NIL NIL T T T T)) ((NIL T NIL T T T) (NIL T NIL NIL T T) (NIL T T
NIL T T) (NIL T T T NIL NIL) (T NIL T NIL T T) (NIL T T T NIL NIL) (NIL T T T T T))) 8 -20
(((NIL NIL NIL T NIL NIL) (NIL NIL NIL T T T) (T T T T T NIL) (NIL NIL NIL T T T) (NIL NIL
T T T NIL) (T T T T T T) (NIL NIL T T T T)) ((NIL NIL NIL T T T) (NIL T NIL NIL T T) (NIL
T T NIL T T) (NIL T T T NIL NIL) (T NIL T NIL T T) (NIL T T T NIL NIL) (NIL T T T T T))) 7

```

5. Objetivos Não Atingidos

Neste projeto todos os objetivos foram atingidos.