

Trabalho de Planejamento em Inteligência Artificial

8-puzzle e 15-puzzle

Júlia Eidelwein (00274700)

Eduardo Buttelli (????????)

Implementação

As estruturas utilizadas (sem considerar as fornecidas pelas bibliotecas padrão do C++) são Estado e Nodo.

Estado (State no código) é uma classe que conta com o valor do estado (um unsigned long long, como explicado no tópico seguinte), um valor heurístico (inteiro), a posição do tile em branco (outro inteiro) e um vetor de ponteiros para os sucessores do estado, além das funções de geração do sucessores, cálculo do valor heurístico e teste de correspondência com o estado objetivo.

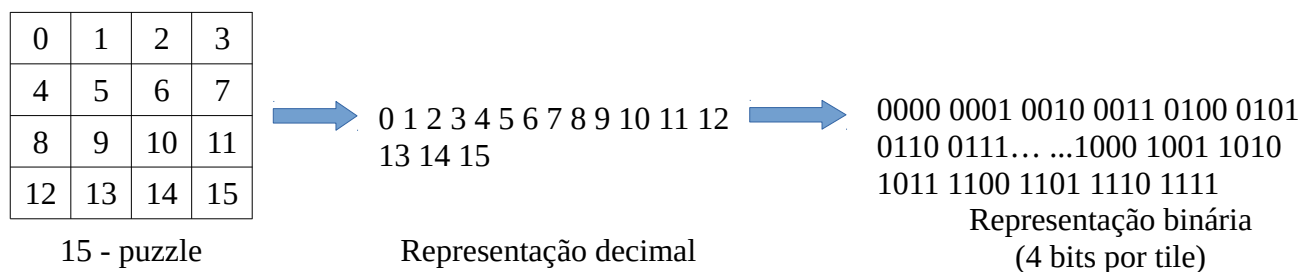
Nodo (Node no código) é uma classe que possui um id, utilizado nos comparadores do A* e do Greedy Best-first Search (unsigned long long, a fim de garantir que não haverá overflow nos índices de nodos), além de um custo e um ponteiro para um estado.

Os algoritmos de busca foram implementados seguindo o pseudo código disponibilizado nos slides. O A* foi implementado sem reabertura, pois a heurística utilizada (distância Manhattan) é admissível e consistente, garantindo a otimalidade do algoritmo sem a reabertura.

Estratégias

Para diminuir a quantidade de memória utilizada, decidimos representar os estados do puzzle com menor número de bits possível. Como o 15 puzzle possui um total de 16 tiles (contando o espaço em branco), precisamos de 4 bits para representar cada tile ($2^4 = 16$ valores), somando um total de 64 bits para todo o puzzle ($16 \times 4 = 64$ bits).

Em C e em C++ não há um tipo que ocupe apenas 4 bits, portanto representar o estado com um array de elementos de 4 bits não seria possível. Para contornar essa situação, utilizamos o tipo unsigned long long, um inteiro positivo de 64 bits, concatenando o valor de cada um dos tiles.



Para montar o valor de 64 bits, precisamos trabalhar com os valores bit a bit, utilizando operações de deslocamento de bits (shift left e shift right). Estabelecemos que cada tile ocuparia uma posição conforme a ilustração abaixo. Essa posição representa o número de shift lefts que são necessários para colocar um valor naquela posição do unsigned long long.

15	14	13	12
11	10	9	8
7	6	5	4
3	2	1	0

Posições dos tiles no
15 - puzzle



15 14 13 12 11 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1 0

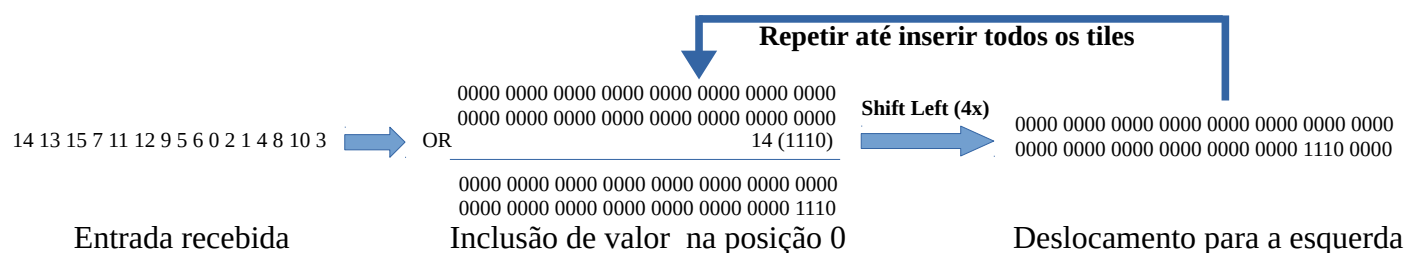
Posições dos tiles em uma dimensão



Número de shift lefts necessários
para atingir a posição

Significado

Dado o estado que recebemos na entrada do programa, o processo para geração do estado inicial no formato do unsigned long long exige que cada tile seja inserido na posição 0, sendo feito então um shift left quatro vezes (4 bits para a esquerda) para que o próximo tile seja inserido novamente na posição 0. As inserções são feitas começando pela posição 15 (ou 8, no caso do 8-puzzle) até a posição 0. No exemplo abaixo, o processo é repetido até que a representação do unsigned long long tenha o valor 1110 1101 1111 0111 1011 1100 1001 0101 0110 0000 0010 0001 0100 1000 1010 0011.



A partir de um estado em unsigned long long, para gerarmos os estados vizinhos, utilizamos a posição do espaço em branco (guardada na estrutura do estado). Iniciamos com uma máscara que possui todos os valores em zero, com exceção dos 4 bits menos significativos, que estão em 1. Deslocamos a máscara para a esquerda até que ela chegue na nova posição do tile em branco (4 vezes a posição do zero +/- deslocamento), fazendo um AND com o estado, obtendo assim o valor do tile que trocará de lugar com o espaço em branco. O deslocamento depende do tamanho do puzzle e do movimento (cima, baixo, esquerda ou direita).

Para colocar o espaço em branco no seu novo lugar, realizamos um AND do estado com a máscara, mas, dessa vez, com o valor da máscara negado (todos os bits em 1, com exceção dos bits da nova posição do zero). Por fim, deslocamos o valor do tile que foi extraído com a máscara até que ele chegue na antiga posição do espaço em branco (para a esquerda ou para a direita, dependendo do movimento), realizando então uma operação de OR para substituir os valores em zero pelo valor do tile.

Desafios

A maior dificuldade enfrentada durante o trabalho foi a falta de eficiência do código. Achou-se que o A* estava entrando em loop no 15-puzzle, porém, dado tempo suficiente, o algoritmo executava até o final, mantendo a solução ótima.

Para encontrar a causa do problema, foi feito o profile do código por meio da ferramenta Callgrind do Valgrind. Com o profile, duas alterações foram realizadas no código: os ponteiros automáticos (shared_ptr) foram substituídos por ponteiros comuns, o que reduziu levemente o

tempo de execução, e o estado contido no nodo foi substituído por um ponteiro para um estado, acelerando a execução em cerca de 4 vezes (pois não era mais necessário realizar a cópia do valor).

Mesmo assim, os algoritmos continuaram mais lentos do que o observado na execução de colegas que mostraram o 15-puzzle sendo resolvido durante a aula do segundo laboratório da disciplina. Suspeitamos que essa lentidão seja relacionada ao custo de calcular a posição de cada tile durante o cálculo da distância Manhattan (é necessário mapear o valor unidimensional para sua respectiva posição bidimensional) e de gerar os estado vizinhos devido a representação escolhida, que não possui correspondência direta com a representação bidimensional do puzzle.

Outro problema que encontramos durante a implementação foi a dificuldade de chegar ao valor médio da função heurística tal qual o apresentado nos exemplos da especificação. Nosso resultado é relativamente próximo do esperado, mas distante o bastante para sabermos que ele foi calculado de forma diferente ao do exemplo, não sendo essa diferença devida ao arredondamento dos valores.

Para o Greedy Best-first Search, tivemos também problemas para atingir o número de nodos expandidos e o custo da solução final dos exemplos da especificação. Não conseguimos achar a causa dessa discrepância, sendo que esse algoritmo se difere do A* apenas em seu comparador e, quando esse tem os resultados como o esperado, aquele se distanciou dos valores da especificação.

Valores médios dos algoritmos

Algoritmo	Média do número de nodos expandidos	Média do comprimento da solução	Média do tempo para a solução	Média do valor médio da função heurística	Média do valor da função heurística no estado inicial
BFS-Graph	81459.54	22.16	0.4460003	0	13.88
Iterative Deepening	2578290.56	22.16	3.93726065	0	13.88
A* (8-puzzle)	895	22.16	0.00546637	10.08393757	13.88
A* (15-puzzle) ¹	943909.5106	49.14893	8.48782	24.83751	35.5745
IDA*	2373.03	22.16	0.003878765	10.41506972	13.88
Greedy Best-first Search	205.65	64.62	0.00129712	6.69646499	13.88

¹Total de estados iniciais resolvidos: 47 estados.

BFS-Graph

Instância	Número de nodos expandidos	Comprimento da solução	Tempo para a solução	Valor médio da função heurística	Valor da função heurística no estado inicial
1	70436	22	0.394838	0.000000	12
2	98412	23	0.550634	0.000000	15
3	11718	17	0.061557	0.000000	13
4	134664	25	0.740138	0.000000	17
5	5209	16	0.025624	0.000000	10

6	59830	22	0.318725	0.000000	12
7	71614	22	0.397784	0.000000	14
8	42704	21	0.224724	0.000000	11
9	10486	17	0.059139	0.000000	7
10	55230	21	0.304607	0.000000	13
11	86288	23	0.470120	0.000000	15
12	87902	23	0.480980	0.000000	11
13	24271	19	0.133809	0.000000	13
14	67445	22	0.373953	0.000000	14
15	21294	19	0.108292	0.000000	13
16	67976	22	0.362053	0.000000	10
17	30932	20	0.166553	0.000000	10
18	51926	21	0.285779	0.000000	19
19	74010	22	0.411087	0.000000	18
20	57200	22	0.303989	0.000000	16
21	6175	16	0.038690	0.000000	14
22	4890	16	0.024625	0.000000	10
23	128087	25	0.696072	0.000000	15
24	59140	22	0.317406	0.000000	14
25	86044	23	0.470801	0.000000	13
26	124428	25	0.674421	0.000000	15
27	55828	21	0.310492	0.000000	15
28	1904	13	0.016240	0.000000	7
29	89286	23	0.483426	0.000000	13
30	96167	24	0.520963	0.000000	16
31	108997	24	0.597460	0.000000	14
32	6800	16	0.038877	0.000000	12
33	12237	18	0.060926	0.000000	16
34	91221	23	0.497821	0.000000	13
35	146642	26	0.810316	0.000000	14
36	166169	27	0.912803	0.000000	17
37	61999	22	0.332203	0.000000	14
38	149038	26	0.821542	0.000000	14
39	66394	22	0.358249	0.000000	12
40	134964	25	0.743925	0.000000	13
41	3528	14	0.018408	0.000000	8
42	141058	25	0.786105	0.000000	19

43	51334	21	0.278246	0.000000	11
44	147235	26	0.807870	0.000000	16
45	96629	24	0.522284	0.000000	14
46	117820	24	0.653268	0.000000	20
47	12721	18	0.066497	0.000000	14
48	82402	23	0.442102	0.000000	15
49	55950	21	0.304308	0.000000	11
50	170358	28	0.930683	0.000000	16
51	41346	20	0.223181	0.000000	12
52	163708	27	0.898717	0.000000	15
53	25948	19	0.142461	0.000000	11
54	146431	26	0.810408	0.000000	16
55	16644	18	0.092572	0.000000	12
56	113398	24	0.626696	0.000000	16
57	12763	18	0.072163	0.000000	8
58	102477	24	0.570835	0.000000	12
59	91593	23	0.500452	0.000000	17
60	116022	24	0.648734	0.000000	16
61	170975	27	0.940995	0.000000	19
62	132375	25	0.725796	0.000000	13
63	43631	21	0.227782	0.000000	15
64	61343	22	0.333913	0.000000	18
65	173107	28	0.947646	0.000000	14
66	37323	20	0.206928	0.000000	16
67	166627	27	0.915656	0.000000	17
68	165544	27	0.910312	0.000000	15
69	136365	25	0.751829	0.000000	19
70	101428	24	0.553175	0.000000	10
71	99337	24	0.539830	0.000000	16
72	69657	22	0.383104	0.000000	16
73	169153	27	0.931860	0.000000	15
74	146614	26	0.803553	0.000000	18
75	136769	25	0.757731	0.000000	11
76	144168	26	0.789756	0.000000	20
77	32178	20	0.174812	0.000000	14
78	149505	26	0.819987	0.000000	16
79	6810	16	0.036161	0.000000	10

80	165286	27	0.900405	0.000000	17
81	20088	19	0.107203	0.000000	11
82	134133	25	0.729410	0.000000	21
83	3471	15	0.022769	0.000000	11
84	9452	17	0.048319	0.000000	13
85	4001	15	0.020105	0.000000	7
86	134421	25	0.732672	0.000000	17
87	10951	17	0.063657	0.000000	11
88	165164	27	0.904021	0.000000	17
89	32194	20	0.173838	0.000000	8
90	37083	20	0.202011	0.000000	12
91	163614	27	0.890263	0.000000	21
92	145000	26	0.792882	0.000000	18
93	68791	22	0.374129	0.000000	12
94	69185	22	0.384708	0.000000	14
95	66051	22	0.361347	0.000000	12
96	25603	19	0.140832	0.000000	17
97	30499	20	0.158693	0.000000	8
98	45472	21	0.237975	0.000000	9
99	106698	24	0.587997	0.000000	14
100	130566	25	0.718335	0.000000	13

Iterative Deepening

Instância	Número de nodos expandidos	Comprimento da solução	Tempo para a solução	Valor médio da função heurística	Valor da função heurística no estado inicial
1	809224	22	1.244768	0.000000	12
2	1659716	23	2.564997	0.000000	15
3	56332	17	0.093035	0.000000	13
4	3832745	25	5.851459	0.000000	17
5	20305	16	0.034641	0.000000	10
6	572929	22	0.875676	0.000000	12
7	840836	22	1.301952	0.000000	14
8	336804	21	0.521769	0.000000	11
9	48030	17	0.080549	0.000000	7
10	523656	21	0.804232	0.000000	13
11	1183127	23	1.806941	0.000000	15

12	1229083	23	1.873072	0.000000	11
13	144153	19	0.228726	0.000000	13
14	726908	22	1.119789	0.000000	14
15	119854	19	0.186740	0.000000	13
16	746437	22	1.147014	0.000000	10
17	201422	20	0.314494	0.000000	10
18	463439	21	0.716972	0.000000	19
19	880730	22	1.352954	0.000000	18
20	529433	22	0.811070	0.000000	16
21	25389	16	0.046390	0.000000	14
22	18803	16	0.034793	0.000000	10
23	3233556	25	4.905482	0.000000	15
24	559966	22	0.852758	0.000000	14
25	1161412	23	1.766083	0.000000	13
26	3012022	25	4.577212	0.000000	15
27	533665	21	0.817112	0.000000	15
28	6472	13	0.016021	0.000000	7
29	1258485	23	1.913297	0.000000	13
30	1506581	24	2.284632	0.000000	16
31	2082556	24	3.226453	0.000000	14
32	28816	16	0.048603	0.000000	12
33	57963	18	0.089344	0.000000	16
34	1339032	23	2.046855	0.000000	13
35	5227219	26	7.946971	0.000000	14
36	10582097	27	16.081235	0.000000	17
37	618550	22	0.943893	0.000000	14
38	5647709	26	8.623699	0.000000	14
39	707091	22	1.084179	0.000000	12
40	3906491	25	5.968502	0.000000	13
41	13166	14	0.021201	0.000000	8
42	4826279	25	7.404389	0.000000	19
43	445186	21	0.681562	0.000000	11
44	5301125	26	8.062677	0.000000	16
45	1521264	24	2.301721	0.000000	14
46	2550556	24	3.889323	0.000000	20
47	60744	18	0.101872	0.000000	14
48	1071876	23	1.633675	0.000000	15

49	542261	21	0.845683	0.000000	11
50	13426501	28	20.321415	0.000000	16
51	323493	20	0.495463	0.000000	12
52	9617303	27	14.615900	0.000000	15
53	160297	19	0.245247	0.000000	11
54	5150682	26	7.834747	0.000000	16
55	86884	18	0.135267	0.000000	12
56	2296791	24	4.139026	0.000000	16
57	60654	18	0.099267	0.000000	8
58	1715624	24	2.606598	0.000000	12
59	1336827	23	2.049910	0.000000	17
60	2536222	24	3.917737	0.000000	16
61	15171649	27	23.321723	0.000000	19
62	3587527	25	5.445535	0.000000	13
63	344582	21	0.522093	0.000000	15
64	599226	22	0.916136	0.000000	18
65	15073854	28	22.871446	0.000000	14
66	277227	20	0.434576	0.000000	16
67	10843669	27	16.493483	0.000000	17
68	10295974	27	15.656660	0.000000	15
69	4095213	25	6.266184	0.000000	19
70	1665813	24	2.544869	0.000000	10
71	1583030	24	2.412904	0.000000	16
72	792904	22	1.223495	0.000000	16
73	12496979	27	19.062220	0.000000	15
74	5225955	26	7.961092	0.000000	18
75	4088312	25	6.241711	0.000000	11
76	4873453	26	7.380850	0.000000	20
77	214527	20	0.327332	0.000000	14
78	5735592	26	8.731134	0.000000	16
79	28881	16	0.050363	0.000000	10
80	10128430	27	15.360243	0.000000	17
81	110829	19	0.171674	0.000000	11
82	3745531	25	5.717494	0.000000	21
83	12608	15	0.023365	0.000000	11
84	42323	17	0.065961	0.000000	13
85	15054	15	0.023423	0.000000	7

86	3814064	25	5.828042	0.000000	17
87	51080	17	0.083489	0.000000	11
88	10083429	27	15.342870	0.000000	17
89	216000	20	0.332515	0.000000	8
90	269408	20	0.412619	0.000000	12
91	9608157	27	14.608279	0.000000	21
92	4963354	26	7.549363	0.000000	18
93	761900	22	1.169912	0.000000	12
94	779904	22	1.207870	0.000000	14
95	713444	22	1.099693	0.000000	12
96	156601	19	0.256503	0.000000	17
97	197513	20	0.310612	0.000000	8
98	365116	21	0.556397	0.000000	9
99	1905883	24	2.933476	0.000000	14
100	3411288	25	5.201415	0.000000	13

A* - Instâncias do 8-puzzle

Instância	Número de nodos expandidos	Comprimento da solução	Tempo para a solução	Valor médio da função heurística	Valor da função heurística no estado inicial
1	835	22	0.007479	9.069538	12
2	1024	23	0.011055	10.093118	15
3	72	17	0.000375	9.284264	13
4	953	25	0.005046	11.836435	17
5	91	16	0.000827	6.661417	10
6	652	22	0.008477	9.291833	12
7	350	22	0.001848	10.564102	14
8	612	21	0.003323	9.863636	11
9	232	17	0.001161	7.561014	7
10	177	21	0.002543	10.859873	13
11	511	23	0.007594	10.022744	15
12	1037	23	0.005546	10.367812	11
13	197	19	0.000995	8.416822	13
14	697	22	0.003761	9.232994	14
15	239	19	0.001239	7.895476	13
16	1622	22	0.013546	9.629885	10
17	315	20	0.002802	8.777648	10

18	30	21	0.000139	10.580247	19
19	373	22	0.001915	10.771859	18
20	550	22	0.002765	10.636796	16
21	34	16	0.000161	8.382978	14
22	118	16	0.000567	8.448598	10
23	1449	25	0.008418	10.865614	15
24	873	22	0.004706	10.118905	14
25	808	23	0.004260	9.782529	13
26	1167	25	0.006050	10.593128	15
27	308	21	0.001544	9.518029	15
28	41	13	0.000209	5.991304	7
29	533	23	0.002903	11.054149	13
30	346	24	0.001997	11.700108	16
31	929	24	0.004916	10.369896	14
32	117	16	0.000566	8.802507	12
33	26	18	0.000148	9.150685	16
34	666	23	0.003480	10.134049	13
35	1734	26	0.009786	10.843086	14
36	1824	27	0.010072	12.291623	17
37	231	22	0.001084	11.593496	14
38	1807	26	0.010382	10.781548	14
39	655	22	0.003636	9.411631	12
40	2298	25	0.013029	10.216819	13
41	76	14	0.000372	7.304762	8
42	786	25	0.004498	11.416506	19
43	609	21	0.003122	9.135718	11
44	2231	26	0.012682	10.694921	16
45	1757	24	0.010267	9.848607	14
46	299	24	0.001438	11.831869	20
47	41	18	0.000204	10.157895	14
48	543	23	0.002707	10.765031	15
49	438	21	0.002390	10.033107	11
50	2864	28	0.020983	12.437920	16
51	221	20	0.002224	9.798680	12
52	2849	27	0.016327	11.161755	15
53	179	19	0.001524	8.808642	11
54	1075	26	0.005603	11.732819	16

55	177	18	0.001678	8.541323	12
56	752	24	0.003988	10.177579	16
57	182	18	0.001601	8.150407	8
58	1355	24	0.010428	10.072455	12
59	205	23	0.000979	11.230072	17
60	712	24	0.009540	10.665620	16
61	1421	27	0.007342	12.271489	19
62	2186	25	0.011921	9.902309	13
63	168	21	0.000808	10.796909	15
64	39	22	0.000181	12.396227	18
65	4038	28	0.023340	11.225081	14
66	90	20	0.000420	9.860083	16
67	2905	27	0.016271	10.940865	17
68	2301	27	0.012332	12.010624	15
69	698	25	0.003809	11.009101	19
70	2190	24	0.012179	9.419497	10
71	936	24	0.004732	11.966962	16
72	238	22	0.001131	10.145963	16
73	3038	27	0.017460	11.000495	15
74	1632	26	0.008987	10.894079	18
75	4306	25	0.027325	10.285652	11
76	739	26	0.004084	12.154713	20
77	382	20	0.002055	9.361576	14
78	2084	26	0.011860	10.754519	16
79	99	16	0.000553	7.474452	10
80	2764	27	0.015440	11.540628	17
81	428	19	0.002489	8.572294	11
82	715	25	0.003489	13.386460	21
83	68	15	0.000328	7.328043	11
84	34	17	0.000160	9.442105	13
85	121	15	0.000586	7.109423	7
86	993	25	0.008702	10.838868	17
87	163	17	0.000780	8.934685	11
88	2389	27	0.012991	11.827178	17
89	369	20	0.001889	8.174874	8
90	356	20	0.002146	8.549634	12
91	1461	27	0.007612	11.347736	21

92	854	26	0.004386	11.648506	18
93	730	22	0.008605	9.536723	12
94	257	22	0.001635	11.500000	14
95	414	22	0.003638	9.894454	12
96	181	19	0.001394	10.116565	17
97	336	20	0.001878	8.961665	8
98	707	21	0.003696	8.465201	9
99	1467	24	0.007728	11.101968	14
100	1319	25	0.007370	10.812268	13

IDA*

Instância	Número de nodos expandidos	Comprimento da solução	Tempo para a solução	Valor médio da função heurística	Valor da função heurística no estado inicial
1	2631	22	0.004222	9.774966	12
2	3276	23	0.005065	10.594288	15
3	145	17	0.000233	9.950617	13
4	2720	25	0.004228	11.775547	17
5	165	16	0.000276	7.096774	10
6	1734	22	0.002700	9.239794	12
7	1741	22	0.002882	10.431170	14
8	439	21	0.000679	10.747945	11
9	464	17	0.000757	7.584399	7
10	611	21	0.000930	11.494012	13
11	724	23	0.001097	11.710304	15
12	1659	23	0.002583	10.909189	11
13	372	19	0.000576	9.049839	13
14	1420	22	0.002402	9.650211	14
15	465	19	0.000728	8.188131	13
16	2130	22	0.003385	9.634297	10
17	794	20	0.001292	9.225782	10
18	71	21	0.000116	12.862386	19
19	456	22	0.000681	11.522388	18
20	368	22	0.000574	10.877483	16
21	27	16	0.000054	9.428572	14
22	76	16	0.000139	8.516394	10
23	2805	25	0.004419	11.123680	15

24	805	22	0.001314	10.197925	14
25	1666	23	0.002634	10.279697	13
26	2470	25	0.004062	10.338623	15
27	1294	21	0.002105	9.674256	15
28	100	13	0.000168	6.926554	7
29	1609	23	0.002489	11.258124	13
30	225	24	0.000422	13.974648	16
31	1820	24	0.002758	11.518036	14
32	129	16	0.000230	9.446511	12
33	37	18	0.000073	10.050847	16
34	1500	23	0.002425	10.924990	13
35	4075	26	0.006549	11.363244	14
36	5873	27	0.008946	12.110498	17
37	487	22	0.000746	11.700876	14
38	5296	26	0.008999	11.093875	14
39	2349	22	0.003613	9.767512	12
40	5296	25	0.008704	10.856009	13
41	125	14	0.000203	7.920188	8
42	3436	25	0.005906	11.440825	19
43	1193	21	0.001817	9.667332	11
44	9239	26	0.014254	10.242444	16
45	2256	24	0.003472	10.428988	14
46	626	24	0.001068	13.136726	20
47	92	18	0.000151	10.040269	14
48	1145	23	0.001990	11.032413	15
49	1201	21	0.001906	10.724241	11
50	5557	28	0.008475	12.398662	16
51	730	20	0.001109	9.963636	12
52	9355	27	0.015029	10.633541	15
53	661	19	0.001017	8.776682	11
54	2195	26	0.003330	12.085301	16
55	257	18	0.000403	9.281031	12
56	2440	24	0.003717	10.662484	16
57	339	18	0.000611	8.489547	8
58	2316	24	0.003954	10.874057	12
59	272	23	0.000450	13.174825	17
60	3401	24	0.005654	10.825363	16

61	9544	27	0.014505	11.499490	19
62	8845	25	0.014175	9.668015	13
63	360	21	0.000600	10.340641	15
64	103	22	0.000182	13.312500	18
65	11359	28	0.018862	11.550103	14
66	406	20	0.000627	9.658753	16
67	8302	27	0.013310	11.223281	17
68	6762	27	0.010612	11.856771	15
69	2421	25	0.003683	11.353425	19
70	3944	24	0.006697	9.623235	10
71	899	24	0.001353	11.501695	16
72	868	22	0.001390	10.489273	16
73	14476	27	0.022940	10.901702	15
74	3141	26	0.004828	11.717854	18
75	8979	25	0.014093	9.914412	11
76	1631	26	0.002484	11.589589	20
77	413	20	0.000683	9.480118	14
78	8936	26	0.014833	10.440800	16
79	166	16	0.000301	8.793706	10
80	7986	27	0.014095	11.351538	17
81	490	19	0.000797	8.274940	11
82	324	25	0.000529	14.129741	21
83	56	15	0.000099	7.910112	11
84	83	17	0.000138	9.681481	13
85	186	15	0.000293	7.261981	7
86	2713	25	0.004136	11.469310	17
87	206	17	0.000338	9.240687	11
88	5691	27	0.008863	11.792600	17
89	1408	20	0.002127	8.118837	8
90	573	20	0.001415	9.419624	12
91	2764	27	0.004312	11.321617	21
92	2791	26	0.009253	10.968472	18
93	2006	22	0.006001	9.711864	12
94	1238	22	0.002976	10.955782	14
95	1016	22	0.001593	10.972749	12
96	244	19	0.000386	9.900744	17
97	722	20	0.001108	9.404429	8

98	2213	21	0.003505	8.089580	9
99	2265	24	0.003412	11.273212	14
100	3613	25	0.005560	10.673361	13

Greedy Best-first Search

Instância	Número de nodos expandidos	Comprimento da solução	Tempo para a solução	Valor médio da função heurística	Valor da função heurística no estado inicial
1	462	112	0.003144	6.674473	12
2	216	79	0.001187	7.104452	15
3	269	69	0.001638	6.236167	13
4	286	87	0.001621	6.713562	17
5	16	16	0.000080	5.555555	10
6	257	48	0.001559	6.155148	12
7	206	48	0.002564	6.259787	14
8	168	49	0.000903	6.870044	11
9	45	19	0.000233	5.566929	7
10	174	69	0.002395	7.673774	13
11	45	31	0.000246	7.757812	15
12	380	101	0.002389	6.831901	11
13	104	47	0.000547	5.671378	13
14	377	102	0.002367	6.287081	14
15	89	41	0.000540	5.734694	13
16	376	102	0.002261	6.235407	10
17	110	50	0.000570	6.013333	10
18	112	59	0.000715	6.460784	19
19	137	28	0.000806	6.922667	18
20	152	66	0.000829	6.900474	16
21	399	98	0.003000	6.314079	14
22	195	48	0.001062	6.339622	10
23	251	71	0.001412	6.695335	15
24	181	60	0.001025	7.118367	14
25	289	87	0.001789	6.287671	13
26	290	81	0.001740	6.476846	15
27	146	67	0.000803	6.771289	15
28	17	15	0.000132	5.300000	7
29	143	57	0.000855	6.714286	13

30	433	108	0.002765	6.601829	16
31	237	68	0.001908	6.582946	14
32	220	62	0.001219	6.299003	12
33	237	80	0.001333	6.510769	16
34	318	93	0.001810	6.567010	13
35	396	118	0.002311	6.547445	14
36	66	53	0.000338	9.174864	17
37	252	64	0.001787	6.138528	14
38	312	94	0.001899	6.489607	14
39	191	70	0.001042	6.619231	12
40	165	75	0.000888	7.522421	13
41	126	28	0.001045	5.779710	8
42	88	45	0.000456	7.190871	19
43	374	111	0.002164	6.269305	11
44	242	80	0.001339	6.775384	16
45	422	94	0.002592	6.516239	14
46	82	46	0.000431	8.658009	20
47	19	18	0.000134	7.592593	14
48	158	47	0.000898	6.780093	15
49	315	95	0.001921	6.418098	11
50	282	88	0.001663	7.368011	16
51	308	62	0.001996	7.066667	12
52	111	51	0.000645	6.903974	15
53	201	51	0.001117	6.092391	11
54	319	100	0.001832	7.132420	16
55	335	90	0.001925	6.501085	12
56	45	36	0.000228	7.228346	16
57	204	62	0.001322	6.587388	8
58	117	58	0.000622	8.228395	12
59	100	57	0.000527	7.080000	17
60	91	48	0.000480	6.160643	16
61	233	77	0.001288	6.822684	19
62	133	27	0.000792	6.210959	13
63	459	89	0.003009	6.670616	15
64	196	74	0.001130	7.155722	18
65	238	96	0.001322	8.197227	14
66	20	20	0.000096	8.109091	16

67	174	57	0.000960	7.222222	17
68	259	83	0.001720	6.873061	15
69	82	43	0.000467	6.942983	19
70	165	56	0.000969	6.169643	10
71	389	114	0.002313	6.425532	16
72	138	44	0.000746	6.562500	16
73	161	73	0.000955	7.337054	15
74	183	64	0.001034	6.607646	18
75	269	73	0.001588	6.108725	11
76	191	62	0.001057	6.950000	20
77	163	46	0.000894	6.193694	14
78	286	74	0.001941	6.638677	16
79	241	80	0.001559	6.262444	10
80	325	91	0.003574	6.593050	17
81	120	41	0.001245	6.020833	11
82	293	77	0.002621	6.871128	21
83	71	39	0.000369	5.454082	11
84	18	17	0.000089	7.326923	13
85	119	41	0.000640	5.883234	7
86	159	67	0.000925	7.498835	17
87	89	41	0.000509	6.086066	11
88	359	121	0.002161	6.866197	17
89	240	44	0.001596	5.918305	8
90	399	106	0.002555	6.302430	12
91	439	117	0.002801	6.793585	21
92	151	72	0.000882	7.068558	18
93	189	58	0.001040	6.454369	12
94	70	26	0.000389	9.000000	14
95	146	40	0.001097	6.571429	12
96	146	37	0.000875	6.402500	17
97	131	38	0.000752	6.994413	8
98	71	31	0.000399	5.413265	9
99	211	64	0.001218	6.622838	14
100	181	83	0.001086	7.017787	13

A* - Instâncias do 15-puzzle

Total de estados iniciais resolvidos: 47 estados.

Instância	Número de nodos expandidos	Comprimento da solução	Tempo para a solução	Valor médio da função heurística	Valor da função heurística no estado inicial
1	-	-	-	-	-
2	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-
5	2021382	56	17.840445	28.321953	42
6	969356	52	8.706600	27.543631	36
7	-	-	-	-	-
8	2618503	50	24.747721	24.456249	32
9	313211	46	2.710164	21.557644	32
10	-	-	-	-	-
11	-	-	-	-	-
12	32334	45	0.242212	26.371912	35
13	831333	46	7.656761	19.528006	36
14	-	-	-	-	-
15	-	-	-	-	-
16	909219	42	8.743217	18.559265	24
17	-	-	-	-	-
18	1267588	55	10.877876	27.424858	43
19	154092	46	1.255249	23.108568	36
20	1995813	52	18.487992	24.684555	36
21	-	-	-	-	-
22	-	-	-	-	-
23	1398857	49	12.565612	24.344225	33
24	-	-	-	-	-
25	-	-	-	-	-
26	-	-	-	-	-
27	-	-	-	-	-
28	909442	52	7.955370	28.002388	36
29	-	-	-	-	-
30	215990	47	1.840593	24.940025	35
31	192534	50	1.547091	28.294950	38
32	-	-	-	-	-

33	-	-	-	-	-
34	2063117	52	18.790561	26.108921	36
35	-	-	-	-	-
36	2309697	52	22.205283	25.870504	36
37	-	-	-	-	-
38	827864	53	6.934842	28.868954	41
39	1118025	49	10.102827	24.362581	35
40	-	-	-	-	-
41	-	-	-	-	-
42	48447	42	0.366182	23.382273	30
43	-	-	-	-	-
44	2731989	50	25.522226	24.648655	32
45	539196	51	4.571135	27.438337	39
46	1430455	49	12.997427	22.994534	35
47	179689	47	1.458473	25.568657	35
48	119535	49	0.961695	25.340958	39
49	-	-	-	-	-
50	-	-	-	-	-
51	3031922	56	27.013921	28.238684	44
52	-	-	-	-	-
53	-	-	-	-	-
54	-	-	-	-	-
55	152123	41	1.282277	20.665936	29
56	-	-	-	-	-
57	484048	50	4.342617	26.253199	36
58	506538	51	4.419993	25.660463	37
59	-	-	-	-	-
60	-	-	-	-	-
61	508957	45	4.471850	21.780647	31
62	1828847	57	15.928708	29.265055	43
63	-	-	-	-	-
64	-	-	-	-	-
65	920623	47	8.433012	22.667009	31
66	-	-	-	-	-
67	-	-	-	-	-
68	-	-	-	-	-
69	-	-	-	-	-

70	-	-	-	-	-
71	557862	44	5.006286	20.647442	30
72	-	-	-	-	-
73	188717	49	1.527814	24.028975	37
74	1373939	56	11.943022	28.942999	46
75	-	-	-	-	-
76	-	-	-	-	-
77	2184110	54	19.808766	27.712954	34
78	619299	53	5.153689	27.553869	41
79	68633	42	0.550868	21.808853	28
80	-	-	-	-	-
81	744209	53	6.368533	28.171513	39
82	-	-	-	-	-
83	1900358	49	18.099851	24.146561	31
84	-	-	-	-	-
85	158355	44	1.331516	20.948565	32
86	195222	45	1.604244	22.416063	35
87	-	-	-	-	-
88	-	-	-	-	-
89	-	-	-	-	-
90	820923	50	7.093491	26.201864	36
91	-	-	-	-	-
92	-	-	-	-	-
93	438960	46	3.838283	21.013203	34
94	276325	53	2.217917	27.989904	45
95	751475	50	6.567801	25.156515	34
96	1263033	49	11.242091	23.028461	35
97	191601	44	1.593452	21.341738	32
98	-	-	-	-	-
99	-	-	-	-	-
100	-	-	-	-	-

Configuração

O computador utilizado é um Intel(R) Core(TM) i5-3337U CPU @ 1.80GHz com 2 núcleos e 4 threads, 32KB de cache L1, 256KB de cache L2 e 8GB de memória RAM, rodando Ubuntu 18.04.2 LTS.

A linguagem de programação utilizada é C++11 com uso das bibliotecas padrão e o compilador utilizado é o g++.

Observações

Há dois scripts inseridos no arquivo de entrega, um para cada conjunto de instâncias. No caso do 15-puzzle, executar esse script resultará na impressão de uma linha com informações além de “Killed” caso o algoritmo não consiga resolver a instância em menos de 30 segundos, portanto, recomenda-se executar as três instruções do script separadamente (setar o limite de tempo e memória e só então rodar o laço que faz a chamada do programa para cada uma das instâncias).

No csv submetido para o 15-puzzle, “Killed” foi substituído por “-,-,-,-”.