

Relatório de Resultados

Lucas Henrique Valentim Rocha

January 19, 2025

1 Introdução

Este trabalho tem como objetivo implementar e comparar heurísticas para a resolução de dois problemas clássicos de otimização: o Problema do Caixeiro Viajante (TSP) e o Problema da Mochila 0/1. As heurísticas consideradas são: GRASP, Simulated Annealing (SA) e Busca Tabu. Para cada abordagem, diferentes configurações de parâmetros foram testadas, e os resultados obtidos foram analisados em termos de função objetivo e tempo de execução.

2 Resultados

2.1 Simulated Annealing

Nesta seção, apresentamos os resultados para o Simulated Annealing aplicado ao TSP e ao Problema da Mochila, com diferentes combinações de temperatura inicial, função de resfriamento e número máximo de iterações. Os resultados incluem os melhores, piores e médios valores da função objetivo, bem como os tempos de execução. O objetivo é avaliar o impacto das configurações nos resultados obtidos.

Os valores dos parâmetros foram:

- Temperatura = [100, 1000, 10000]
- Função de resfriamento = [0.5, 0.75, 0.9, 0.999]
- Número de iterações = [5, 10, 50, 100]

Os resultados para o Simulated Annealing, ao testar todas as combinações de parâmetros, gerou um arquivo extenso com várias informações. A seguir os resultados mostrados são um resumo do extenso arquivo CSV gerado.

2.1.1 TSP

Table 1: Resultados do Simulated Annealing no Problema TSP com baixos valores de parâmetros

Temperatura	Coef. de Resfriamento	Máx. Iterações	Execução	Função Objetivo	Tempo (ms)
100	0.50	5	1	1141.79	0.33
100	0.50	5	2	1158.33	0.34
100	0.50	5	3	1183.22	0.22
100	0.50	5	4	1223.51	0.32
100	0.50	5	5	1211.84	0.21
100	0.50	5	6	1134.14	0.23
100	0.50	5	7	1210.39	0.21
100	0.50	5	8	1254.83	0.22
100	0.50	5	9	1136.21	0.21
100	0.50	5	10	1288.77	0.20

O valor de **1134.14** foi o melhor obtido, enquanto **1288.77** representou o pior resultado. A média da função objetivo foi de **1194.30**. Observamos que, com valores baixos para os parâmetros escolhidos, os resultados ficaram consideravelmente distantes do esperado.

Table 2: Resultados do Simulated Annealing no Problema TSP com altos valores de parâmetros

Temperatura	Coef. de Resfriamento	Máx. Iterações	Execução	Função Objetivo	Tempo (ms)
10000	0.999	50	1	458.46	651.07
10000	0.999	50	2	472.36	651.19
10000	0.999	50	3	482.41	650.30
10000	0.999	50	4	454.08	652.32
10000	0.999	50	5	458.66	650.65
10000	0.999	50	6	471.81	649.83
10000	0.999	50	7	442.30	651.27
10000	0.999	50	8	464.48	650.27
10000	0.999	50	9	486.94	650.17
10000	0.999	50	10	475.03	650.52
10000	0.999	100	1	472.48	1300.18
10000	0.999	100	2	470.61	1301.72
10000	0.999	100	3	455.53	1301.04
10000	0.999	100	4	458.02	1301.02
10000	0.999	100	5	449.25	1303.79
10000	0.999	100	6	461.14	1301.42
10000	0.999	100	7	462.59	1299.96
10000	0.999	100	8	468.64	1301.26
10000	0.999	100	9	478.72	1302.92
10000	0.999	100	10	458.58	1300.20

O valor de **442.30** foi o melhor obtido, enquanto **486.94** representou o pior resultado. A média da função objetivo foi de **465.10**. Observou-se que, com valores mais altos para a temperatura e a função de resfriamento, os resultados apresentaram melhor desempenho. Além disso, o número máximo de iterações teve uma influência menor sobre o resultado final.

2.1.2 Problema da Mochila

O mesmo ocorreu com o Problema da Mochila: ao utilizarmos valores menores para os parâmetros, obtemos resultados com um desempenho inferior. Sendo a temperatura e a função de resfriamento os parâmetros de maiores impactos.

Table 3: Resultados do Simulated Annealing no Problema da Mochila com baixos valores de parâmetros e alterando o número máximo de iterações

Temperatura	Coef. de Resfriamento	Máx. Iterações	Execução	Função Objetivo	Tempo (ms)
100	0.50	5	1	2934	1.94
100	0.50	5	2	2090	0.63
100	0.50	5	3	1915	0.76
100	0.50	5	4	4795	0.40
100	0.50	5	5	2414	0.66
100	0.50	5	6	1366	0.79
100	0.50	5	7	1221	0.75
100	0.50	5	8	1366	0.79
100	0.50	5	9	1163	1.17
100	0.50	100	1	6345	6.64
100	0.50	100	2	4145	8.54
100	0.50	100	3	5538	7.32
100	0.50	100	4	6959	6.70
100	0.50	100	5	5970	6.84
100	0.50	100	6	4223	9.70
100	0.50	100	7	5942	7.12
100	0.50	100	8	3132	14.74
100	0.50	100	9	4294	8.50
100	0.50	100	10	7157	6.04

O melhor valor foi obtido nas 10 execuções em que o número máximo de iterações foi 100, enquanto o pior resultado ocorreu quando o máximo de iterações foi 5. Isso demonstra o impacto desse parâmetro, já que a média das execuções com 10 iterações foi de **2140.4** e com 100 iterações foi de **5370.5**. No entanto, observaremos a seguir que, ao aumentar a temperatura e a função de resfriamento, a média dos valores tende a melhorar significativamente.

Table 4: Resultados do Simulated Annealing no Problema da Mochila com altos valores de parâmetros e alterando o número máximo de iterações

Temperatura	Coef. de Resfriamento	Máx. Iterações	Execução	Função Objetivo	Tempo (ms)
10000	0.999	5	1	8990	262.97
10000	0.999	5	2	9147	272.25
10000	0.999	5	3	8929	271.53
10000	0.999	5	4	9147	270.86
10000	0.999	5	5	9147	264.04
10000	0.999	5	6	8990	271.36
10000	0.999	5	7	9147	271.97
10000	0.999	5	8	9147	271.31
10000	0.999	5	9	8990	264.77
10000	0.999	5	10	9147	272.99
10000	0.999	100	1	9147	5422.90
10000	0.999	100	2	9147	5433.02
10000	0.999	100	3	9147	5423.77
10000	0.999	100	4	9147	5269.78
10000	0.999	100	5	9147	5432.00
10000	0.999	100	6	9147	5432.66
10000	0.999	100	7	9147	5430.96
10000	0.999	100	8	9147	5427.04
10000	0.999	100	9	9147	5425.29
10000	0.999	100	10	9147	5596.92

Percebemos, portanto, que mesmo variando significativamente o número máximo de iterações, os resultados não apresentaram diferenças substanciais. O melhor valor foi obtido durante as 10 execuções em ambos os valores de iterações máximas. A média apresentou uma pequena diferença, sendo **9070.44** para 5 iterações e **9147.44** para 100 iterações.

2.2 Busca Tabu

Já nesta seção, mostraremos os resultados da Busca Tabu. A Busca Tabu é uma heurística determinística, portanto não faz sentido executá-la 10 vezes e observar resultados distintos, pois eles serão idênticos. Assim, ao aplicar essa heurística em ambos os problemas (TSP e o problema da mochila), os resultados tabulados foram obtidos combinando os valores dos seguintes parâmetros.

- Duração Tabu = [5, 10, 20]
- Máximo de iteração = [5, 100, 200]

2.2.1 TSP

Table 5: Resultados da Busca Tabu para o TSP

Duração	Máx. Iterações	Função Objetivo	Tempo (ms)
5	5	602.012	31.21
5	100	587.97	81.61
5	200	607.67	132.12
10	5	596.44	33.62
10	100	612.90	85.40
10	200	544.28	139.68
20	5	605.95	36.56
20	100	578.85	87.05
20	200	553.79	163.59

Percebemos que o pior valor obtido foi **607.67**, enquanto o melhor foi **544.28**, com a média sendo **587.75**.

2.2.2 Problema da mochila

Table 6: Resultados da Busca Tabu para o Problema da mochila

Duração	Máx. Iterações	Função Objetivo	Tempo (ms)
5	5	5245	2.09
5	100	5162	4.75
5	200	4496	9.54
10	5	3242	0.37
10	100	3242	4.60
10	200	7167	9.35
20	5	6531	0.69
20	100	5245	4.92
20	200	7167	9.52

Percebemos que o pior valor obtido foi **3242**, enquanto o melhor foi **7167**, com a média sendo **5277.44**.

2.3 GRASP

Nesta seção, apresentamos os resultados para o General Responsibility Assignment Software Patterns (GRASP) aplicado ao TSP e ao Problema da Mochila, com diferentes combinações do coeficiente de aleatoriedade α e número máximo de iterações. Os resultados incluem os melhores, piores e médios valores da função objetivo, bem como os tempos de execução. O objetivo é avaliar o impacto das configurações nos resultados obtidos.

Podemos adiantar que, ao contrário do Simulated Annealing, o GRASP não gera resultados substancialmente diferentes ao alterar os parâmetros envolvidos, pelo menos com os valores escolhidos. O que varia é a média dos resultados, que pode ser próxima do desejado ou não, mas sem apresentar diferenças extremas.

Os valores para os parâmetros utilizados foram:

- Máximo de iterações = [10, 100, 1000]
- α = [0.1, 0.125, 0.25, 0.5, 0.75]

2.3.1 TSP

Table 7: Resultados da GRASP para o TSP com baixas iterações

Máx. Iterações	Coeficiente de aleatoriedade	Execução	Função Objetivo	Tempo (ms)
10	0.10	1	474.83	124.53
10	0.10	2	471.46	116.59
10	0.10	3	449.19	114.32
10	0.10	4	474.40	116.71
10	0.10	5	472.16	118.13
10	0.10	6	468.01	107.73
10	0.10	7	467.06	111.77
10	0.10	8	483.66	113.42
10	0.10	9	442.95	110.58
10	0.10	10	462.29	92.92
10	0.75	1	516.04	368.78
10	0.75	2	498.46	391.49
10	0.75	3	532.97	384.92
10	0.75	4	518.68	402.05
10	0.75	5	515.99	385.11
10	0.75	6	511.66	354.87
10	0.75	7	485.00	359.27
10	0.75	8	526.24	370.58
10	0.75	9	536.48	380.16
10	0.75	10	516.92	384.66

Podemos observar nesta tabela que, quando o número de iterações é baixo, um aumento no coeficiente de aleatoriedade (α) tende a piorar, ainda que de forma moderada, os resultados finais. O pior valor foi obtido com $\alpha = 0.75$, resultando em 536.48, enquanto o melhor valor ocorreu com $\alpha = 0.1$, alcançando 442.95. A média dos resultados foi a seguinte: para $\alpha = 0.75$, a média foi de 515.84; já para $\alpha = 0.1$, a média foi de 466.60.

Table 8: Resultados da GRASP para o TSP com altas iterações

Máx. Iterações	Coeficiente de aleatoriedade	Execução	Função Objetivo	Tempo (ms)
1000	0.10	1	445.71	13538.43
1000	0.10	2	437.22	13845.68
1000	0.10	3	445.16	13776.89
1000	0.10	4	437.39	13676.08
1000	0.10	5	434.61	13740.70
1000	0.10	6	437.65	13525.76
1000	0.10	7	434.97	13720.12
1000	0.10	8	440.78	13568.48
1000	0.10	9	435.10	13619.51
1000	0.10	10	436.56	13727.29
1000	0.75	1	470.44	39028.02
1000	0.75	2	462.28	35708.47
1000	0.75	3	472.91	35593.38
1000	0.75	4	464.25	37567.29
1000	0.75	5	480.02	40509.06
1000	0.75	6	462.61	41614.16
1000	0.75	7	464.66	41175.21
1000	0.75	8	467.76	41615.47
1000	0.75	9	484.99	34159.73
1000	0.75	10	467.90	32643.76

Observa-se que, com um número elevado de iterações, o resultado foi bastante satisfatório, ficando bem próximo do ótimo. Mesmo assim, nota-se que, com um valor alto para o coeficiente de aleatoriedade, há uma leve deterioração nos resultados, embora essa diferença seja pequena. O resumo dos resultados é o seguinte: o pior valor foi obtido com $\alpha = 0.75$, resultando em 484.99, enquanto o melhor valor ocorreu com $\alpha = 0.1$, alcançando 434.61. A média dos resultados foi a seguinte: para $\alpha = 0.75$, a média foi de 469.78; já para $\alpha = 0.1$, a média foi de 438.51.

Além disso, notamos que o resultado para 1000 iterações foi excelente, mas o tempo necessário para obter esses resultados foi consideravelmente elevado, chegando a 41 mil milissegundos, o que equivale a aproximadamente **41.61** segundos.

2.3.2 Problema da mochila

O contrário ocorre aqui. Quando o α aumenta, observa-se uma melhora nos resultados. O interessante, ao analisar, é que, quando o coeficiente de aleatoriedade está bem ajustado, os resultados já são satisfatórios, mesmo com um número reduzido de iterações. No entanto, com um número elevado de iterações (por exemplo, 1000), os resultados praticamente não se alteram, como se já tivesse sido alcançado o máximo da heurística, mesmo com a variação do α . As seguintes tabelas demonstram isso.

Table 9: Resultados da GRASP para o Problema da mochila com baixas iterações

Máx. Iterações	Coefficiente de aleatoriedade	Execução	Função Objetivo	Tempo (ms)
10	0.0625	1	7635	6.75
10	0.0625	2	8631	3.28
10	0.0625	3	9147	3.72
10	0.0625	4	8990	2.76
10	0.0625	5	8364	2.72
10	0.0625	6	8900	2.66
10	0.0625	7	9147	2.50
10	0.0625	8	9147	2.74
10	0.0625	9	8506	2.57
10	0.0625	10	8551	2.44
10	0.75	1	9147	3.28
10	0.75	2	9147	3.34
10	0.75	3	8911	3.43
10	0.75	4	9147	3.27
10	0.75	5	9147	3.25
10	0.75	6	9147	3.18
10	0.75	7	9147	3.37
10	0.75	8	9147	3.57
10	0.75	9	9147	3.23
10	0.75	10	9147	3.29

Nota-se que, mesmo com pouca variação, $\alpha = 0.75$ já demonstra bons resultados. Percebe-se que, com $\alpha = 0.0625$, os resultados são mais inconsistentes, gerando o pior resultado desse teste: 7635. No entanto, ainda foi possível atingir o melhor valor, que foi 9147. As médias, entretanto, foram distintas: para $\alpha = 0.75$, a média foi de 9123.4; e para $\alpha = 0.0625$, a média foi de 8701.8.

Table 10: Resultados da GRASP para o Problema da mochila com altas iterações

Máx. Iterações	Coefficiente de aleatoriedade	Execução	Função Objetivo	Tempo (ms)
10000	0.25	1	9147	2759.47
10000	0.25	2	9147	2728.81
10000	0.25	3	9147	2689.97
10000	0.25	4	9147	2836.98
10000	0.25	5	9147	2724.73
10000	0.25	6	9147	2725.78
10000	0.25	7	9147	2729.11
10000	0.25	8	9147	2729.36
10000	0.25	9	9147	2824.13
10000	0.25	10	9147	2793.20
10000	0.75	1	9147	3040.44
10000	0.75	2	9147	3037.64
10000	0.75	3	9147	3087.29
10000	0.75	4	9147	3066.60
10000	0.75	5	9147	3081.20
10000	0.75	6	9147	3150.04
10000	0.75	7	9147	2969.91
10000	0.75	8	9147	2978.06
10000	0.75	9	9147	2972.38
10000	0.75	10	9147	2978.12

Perceba que, como foi mencionado, em altas iterações, os valores de α não interferem no resultado final. Dessa forma, o pior e o melhor valor, assim como a média, foram os mesmos: 9147.

3 Conclusão

Podemos concluir que todas as heurísticas avaliadas apresentaram resultados satisfatórios, cada uma destacando-se de acordo com sua eficiência e eficácia. A Busca Tabu, embora tenha apresentado a menor eficácia entre as abordagens analisadas, demonstrou um custo computacional reduzido, sendo uma opção interessante em cenários com restrições de tempo ou recursos. Por outro lado, o Simulated Annealing alcançou resultados similares, mas com um tempo computacional significativamente maior, o que pode limitar sua aplicabilidade em algumas situações. O destaque foi o GRASP, que, mesmo com um número reduzido de iterações, conseguiu entregar resultados de alta qualidade com baixo custo computacional, comprovando sua eficácia no conjunto de testes aplicado.