

# Têmpera Simulada - Simulated Annealing

Clécio Gois  
Centro Universitário Unieuro  
Brasília, Brasil  
cleciosilva87@gmail.com

Gutemberg Dantas  
Centro Universitário Unieuro  
Brasília, Brasil  
gutemberg.dantas.18@gmail.com

Valentina Helena Pimenta  
Centro Universitário Unieuro  
Brasília, Brasil  
valentinahpn@gmail.com

**Resumo:** O artigo apresenta uma breve descrição sobre a metaheurística em questão, descrevendo seu processo e sua participação dentro da Inteligência Artificial.

**Palavras-chave:** *Simulated Annealing, Recozimento Simulado, Têmpera Simulada, Física, Inteligencia Artificial.*

## I. INTRODUÇÃO

Algumas técnicas utilizadas na idade média foram estudadas e aplicadas em diferentes situações, auxiliando na resolução de problemas. Como exemplo disso, temos a Têmpera Simulada ou Simulated Annealing, que será especificada no decorrer deste artigo. A ideia inicial de têmpera consiste no recozimento de metais, semelhante ao processo de fabricação manual de armas e equipamentos medievais, sendo um processo que altera as propriedades de um material metálico através de um aquecimento e resfriamento lento.

Segundo Júnior [1] Têmpera Simulada têm sido utilizada de forma complementar a outras técnicas, principalmente algoritmos de busca utilizados em resolução de problemas na engenharia e computação moderna.

Um dos objetivos desse artigo é realizar um estudo e explanar de forma geral sobre Têmpera Simulada, associando sua originalidade a que se destina desde a origem vinculada a física e rusticidade até aplicação na tecnologia e

engenharia, especialmente na área de inteligência artificial.

Foram encontrados vários estudos sobre o tema, no entanto sempre relacionados com outras técnicas e algoritmos de inteligência artificial, desta forma o objetivo principal consistirá em destrinchar a relação entre conceitos da implementação em áreas distintas e a de informática, especialmente IA relacionando sempre que necessário com outros algoritmos.

## II. TÊMPERA

Segundo Viana [2], o processo de têmpera consiste em submeter os materiais inicialmente a elevadas temperaturas e reduzi-las gradualmente até atingirem, com aumentos e reduções do estado de energia, o equilíbrio térmico, tornando-os rígidos e consistentes. O resfriamento deve ser feito de forma cuidadosa (lentamente) para que o material atinja um estado fundamental (baixa energia), de modo a produzir um material com uma estrutura que tenha a resistência desejada. Caso o resfriamento não seja feito de forma adequada, o sistema não terá tempo suficiente para alcançar o equilíbrio térmico, podendo o estado final ter alta energia e como consequência o material apresentar defeitos em sua estrutura, não alcançando as características desejadas.

## III. TÊMPERA SIMULADA

É um método probabilístico para otimização global de problemas, Ele é baseado em um processo físico chamado annealing no qual um

sólido é gradualmente resfriado de uma alta temperatura, por um tempo suficiente para atingir o equilíbrio de suas partículas internas (Kirkpatrick et al, 1983) [3].

Têmpera simulada ou Recozimento Simulado é uma técnica simples que se baseia em ideias da mecânica estatística (Jaynes, 1951) [4] e no algoritmo de simulação proposto por Metropolis em 1953 [5].

Foi apresentado inicialmente em 1983 por Kirkpatrick que utilizou o método no projeto de circuitos eletrônicos.

A têmpera simulada, uma tradução para simulated annealing, é uma abordagem heurística desenvolvida para encontrar uma boa solução, não necessariamente ótima, para problemas de otimização, dentro de um tempo computacional razoável. Ela tem sido aplicada com sucesso tanto a problemas de otimização combinatória (discreta) como a problemas de otimização global (Lorezoni, 2002) [6].

É um processo que consiste em simular o recozimento, aceitando alterações ruins, para que encontre uma solução ótima. A estratégia é utilizar conceitos de processos físicos, conforme apresentado na seção III, para formular cálculos e buscar um objetivo que seja o melhor possível, passando por fases ruins, até alcançar o melhor possível.

Para verificar a probabilidade e analisar se vale a pena ir para uma solução ruim, a fim de chegar à uma solução ótima, é utilizada a fórmula abaixo:

$$p = \frac{e^{\Delta E}}{T}$$

Figura 1: Fórmula para verificar probabilidade.

Sendo T a temperatura atual e  $\Delta E$  a variação da energia.

Inicialmente, terá uma probabilidade alta de escolher soluções ruins, porém, na medida que o algoritmo vai se especializando, ele não encontrará mais essas soluções ruins com grande probabilidade.

Existe uma estratégia similar à têmpera simulada, a subida de encosta, porém em vez de verificar as probabilidades, passando por pontos menores, ela passa apenas por pontos extremos, ou seja, não diminui o valor para alcançar um valor mais alto que o atual.

#### IV. RELAÇÃO COM A FÍSICA

Segundo Corrêa [7], o processo físico ocorre em duas etapas: elevar a temperatura de um determinado sólido ao valor no qual este se transforme em líquido, realizando o resfriamento logo após, até que o material se solidifique novamente. O resfriamento deve ser feito de forma lenta e gradual, pois é necessário deixar que os átomos se organizem em uma estrutura que utilize o mínimo de energia para determinada temperatura. Após isso, a temperatura é reduzida novamente e deve-se aguardar novamente até que o material encontre uma configuração de energia mínima para essa temperatura. Caso a temperatura seja diminuída de forma muito rápida, o material apresentará imperfeições, pois não foi dado o tempo para que os átomos encontrassem a configuração de energia mínima.

#### V. TÊMPERA SIMULADA NA TECNOLOGIA

Segundo Russell e Norvig [8] é crescente o interesse em aplicar técnicas de inteligência artificial (IA) em sistemas tradicionais, para solucionar problemas do mundo real. Complementa Júnior [1] em particular existe um interesse especial nas técnicas que envolvem aplicar planejamento (AI planning) em áreas especializadas como: missões espaciais, robótica, planejamento de missões militares e controle de elevadores.

Na Figura 2 temos ilustrada a analogia entre o processo físico de têmpera dos materiais e os problemas de otimização utilizados na área de informática e afins.

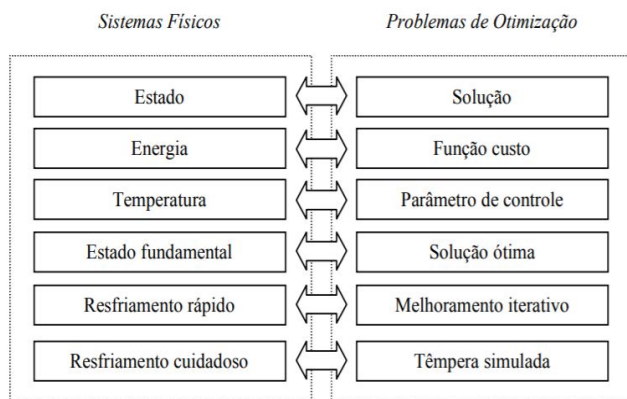


Figura 2: Analogia entre sistemas físicos e problemas de otimização.

Nessa analogia, os diferentes estados dos materiais correspondem às diferentes soluções dos problemas.

A maior dificuldade do algoritmo, é decidir quando a temperatura  $T$  será adaptada e a verificação da verdadeira condição de equilíbrio. Na imagem a seguir, é mostrado um exemplo da utilização do algoritmo, demonstrando o estado inicial e o estado final.

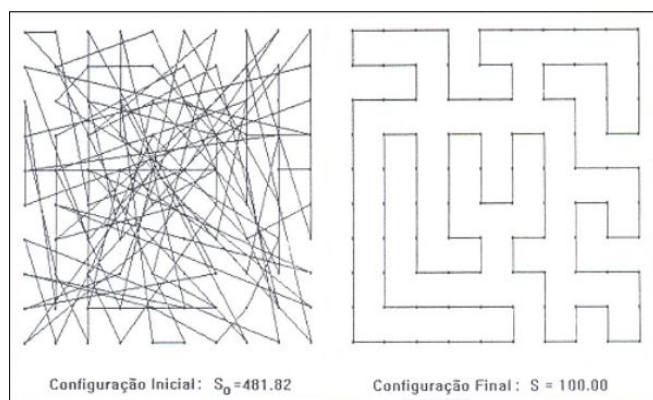


Figura 3 - Exemplo da Utilização do Algoritmo.

Na figura 3, podemos perceber que na configuração inicial as partículas estão totalmente desorganizadas, correspondendo a uma configuração aleatória de um problema de otimização, que, geralmente, é distante da configuração desejada. Com alterações nas posições de algumas partículas, é possível resultar em uma variação de energia e encontrar um ponto de equilíbrio.

O algoritmo de Metropolis et al. [5] descreve Simulated Annealing para um sistema físico. Cada átomo que compõe o sistema pode mover-se,

produzindo uma variação de energia. Como o objetivo é chegar a uma energia que represente o equilíbrio do sistema, o deslocamento do átomo pode ser aceito ou não, pois seu deslocamento pode significar uma aproximação ou não do estado de equilíbrio.

O método Recozimento de Boltzmann (BA) foi criado para ajustar funções de custo não convexas que surgem em uma variedade de problemas, por exemplo, encontrar a fiação ideal para um chip de computador densamente conectado (Kirkpatrick et al, 1983). As escolhas das distribuições de probabilidade descritas nesta seção são geralmente especificadas como recozimento de Boltzmann (BA) (Szu e Hartley, 1987)

A representação mais comum é feita através de grafos. Nesta representação cada porta lógica é representada por um vértice e as conexões (entradas e saídas de cada porta) são representadas pelas arestas. O maior problema dessa abordagem é o custo de memória e o esforço computacional necessário para encontrar as soluções, devido a este problema ser considerado NP-Completo (MARQUES, 2008) [9].

O algoritmo MOGAMAP, desenvolvido por Sousa [10] é a abordagem mais recente que utiliza Inteligência Artificial no mapeamento genético. Essa abordagem também busca tratar o problema de Mapeamento Tecnológico para FPGAs (*Field Programmable Gate Arrays*).

Manohararajah, Mishchenko [11]. Desenvolveu uma técnica otimizada que associa heurísticas ao método, buscando evitar esforço computacional. Propondo uma técnica tradicional na utilização de “podas” na enumeração, que podem limitar o espaço de soluções ou seja, ele tenta não efetuar podas..

Para Michielssen [12] devidos as técnicas de otimização utilizando Inteligência Artificial. No Mapeamento Tecnológico torna-se uma alternativa interessante, pois, com ela é possível produzir resultados favoráveis.

Para Perttunen [13] ele menciona que no caixeiro viajante, pode-se por exemplo tentar utilizar alguma heurística para determinar uma solução inicial mais favorável do que a rota aleatória. Apesar de se mostrar eficiente e evitar o consumo do custo computacional, ela pode direcionar o algoritmo para uma direção errada, levando a temperatura simulada para um ótimo local, ou seja, seriam necessários estudos mais cautelosos para o tipo de inicialização do algoritmo.

#### REFERÊNCIAS

- [1] Júnior, Ricardo Rames Basílio. Explorando o uso de Temperatura Simulada no Desenvolvimento de um Sistema de Planejamento. Uberlândia - MG, 2009.
- [2] Viana, V., 1998. Meta-Heurísticas e programação paralela em otimização combinatória, Edições UFC, Fortaleza, Ceará.
- [3] Kirkpatrick, S.; Gelatt, Jr., C. D.; Vecchi, M. P.; 1983: Optimization by Simulated Annealing. Science 220, núm. 4598, 671-680.
- [4] Jaynes, E. T.; 1957: Information theory and statistical mechanics. Phys. Rev. 106, 620-630.
- [5] Metropolis, N.; Rosenbluth, A. W.; Rosenbluth, M. N.; Teller, A. H.; 1953: Equation of State Calculations by Fast Computing Machines. 1. Chem. Phys. 21, 1087-1092.
- [6] Lorenzoni, Luciano Lessa. Temperatura Simulada aplicada ao problema de escalonamento com restrição de recursos. Rio de Janeiro - RJ, 2002.,
- [7] F. Corrêa, “Temperatura Simulada Aplicada ao Problema de Designação Quadrática” Porto Alegre - RS, 3 de Dezembro de 2007.
- [8] Russell, S. J. and Norvig, P. Artificial Intelligence: A Modern Approach. PrenticeHall, third edition, 2009.
- [9] MARQUES, F. S. Technology mapping for virtual libraries based on cells with minimal transistor stacks. 2008. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) - Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- [10] Souza, v.; silva-filho, a. mogamap: an application of multi-objective genetic algorithm for lut-based fpga technology mapping. in: electronics, circuits, and systems (icecs), 2013 ieee 20th international conference on, 2013. anais. . . [s.l.: s.n.], 2013. p.485–488.
- [11] Mishchenko, a.; chatterjee, s.; brayton, r. k. improvements to technology mapping for lut-based fpgas. computer-aided design of integrated circuits and systems, ieee transactions on, [s.l.], v.26, n.2, p.240–253, 2007.
- [12] Grefenstette, j.; gopal, r.; rosmaita, b.; van gucht, d. genetic algorithms for the traveling salesman problem. in: international conference on genetic algorithms and their applications, 1985. proceedings [s.l.: s.n.], 1985. p.160–168.
- [13] PERTTUNEN, J. On the significance of the initial solution in travelling salesman heuristics. Journal of the Operational Research Society, [S.l.], p.1131–1140, 1994.