

FATEC de Registro

Desenvolvimento de Software Multiplataforma

Adeldivo Alves de Sousa Junior

Sistemas Imunológicos Artificiais

Registro

2024

Adeldivo Alves de Sousa Junior
Sistemas Imunológicos Artificiais

Trabalho apresentado ao curso de Desenvolvimento de Software Multiplataforma, da FATEC de Registro, na disciplina de Laboratório - Computação Natural.

Faculdade de Tecnologia Campus Registro
Desenvolvimento de Software Multiplataforma
Laboratório - Computação Natural

Professora: Thissiany Beatriz Almeida

Registro - Brasil

2024

Sumário

Sumário		
1	INTRODUÇÃO	1
2	FUNDAMENTOS DOS SISTEMAS IMUNOLÓGICOS ARTIFICIAIS	2
2.1	Seleção clonal e negativa	2
2.2	Modelos de rede	3
3	ALGORITMO DE SELEÇÃO NEGATIVA	4
3.1	Como o Algoritmo de Seleção Negativa é usado nos SIA	4
3.1.1	Aplicações e exemplos do Algoritmo de Seleção Negativa	4
3.1.2	Fluxograma de um Algoritmo de Seleção Negativa	5
4	OPTAINET	6
4.1	Como o optAiNet é usado nos SIA	7
4.1.1	Aplicações e exemplos do optAiNet	7
4.1.2	Fluxograma de um Algoritmo optAiNet	8
5	COMPARAÇÃO ENTRE SELEÇÃO NEGATIVA E OPTAINET . . .	10
5.0.1	Pontos em comum	10
5.0.2	Diferenças	10
5.0.3	Aplicações específicas	11
6	VANTAGENS E DESVANTAGENS	12
6.0.1	Algoritmo de Seleção Negativa	12
6.0.2	optAiNet	12
7	CONCLUSÃO	13
	REFERÊNCIAS	14

1 INTRODUÇÃO

Os Sistema Imunológicos Artificiais (SIA) são uma ramificação da computação bioinspirada que se concentra em vários aspectos dos sistemas imunológicos. A motivação para construção de soluções inspiradas no sistema imunológico surge da identificação de propriedades dentro do sistema imunológico que são atraentes do ponto de vista da Engenharia. Essas propriedades incluem a auto-organização de um grande número de células imunológicas, a operação distribuída do sistema imunológico em todo o corpo, o reconhecimento de padrões e a detecção de anomalias para permitir que o sistema imunológico reconheça patógenos, e a otimização e memória para melhorar e lembrar as respostas imunológicas (NUNES, 2001).

2 FUNDAMENTOS DOS SISTEMAS IMUNOLÓGICOS ARTIFICIAIS

Os SIA são sistemas adaptativos inspirados pela imunologia teórica e pelas funções imunológicas observadas, princípios e modelos, que são aplicados à resolução de problemas. Eles são tipicamente modelados após as características de aprendizado e memória do sistema imunológico para uso na resolução de problemas (BOCCATO, s.d.a). Os principais modelos de SIA incluem algoritmos de seleção clonal e negativa, e modelos de rede.

2.1 Seleção clonal e negativa

A seleção clonal e negativa são dois mecanismos fundamentais do sistema imunológico que foram adaptados para uso em SIA.

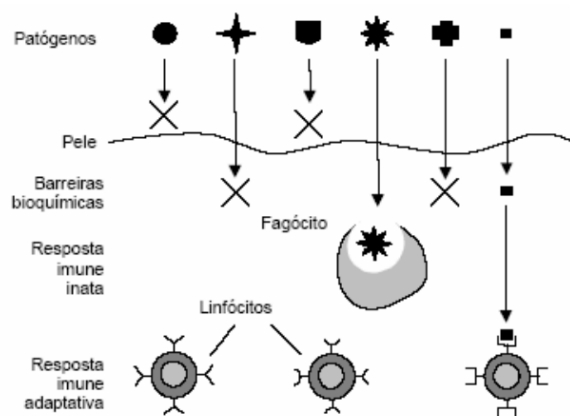


Figura 1 – Camadas de defesa do sistema imunológico.

Fonte: (CASTRO; ZUBEN, 1999)

A **seleção clonal** é um processo pelo qual as células imunológicas (linfócitos B¹) que reconhecem um antígeno² são selecionadas para proliferação e diferenciação. Este processo é usado para aumentar o número de células que podem reconhecer e responder a um antígeno específico (WILLIAMS; DANESHYARI, s.d.)

¹Os **linfócitos** são um tipo de leucócito ou glóbulo branco do sangue, responsáveis pelo reconhecimento e destruição de micro-organismos infecciosos como bactérias e vírus (Toda Matéria, 2024). Os **linfócitos B** são os responsáveis por garantir a chamada imunidade humoral, que se destaca pela resposta imunológica realizada pela produção de anticorpos. Esses anticorpos são capazes de neutralizar ou ainda destruir os antígenos(SANTOS, s.d.b).

²Os **antígenos** podem ser definidos como moléculas que podem ligar-se aos anticorpos. Muitos autores preferem defini-lo como qualquer substância capaz de promover uma resposta por parte do sistema imunológico, entretanto, existem substâncias antigênicas que reagem com o anticorpo, mas não são capazes de estimular sua produção. Fonte: (SANTOS, s.d.a)

A **seleção negativa** é um mecanismo pelo qual as células imunológicas que reagem fortemente aos próprios antígenos do corpo são eliminados, ajudando a prevenir respostas imunológicas prejudiciais ao próprio corpo (GREENSMITH; WHITBROOK; AICKELIN, 2022). Em SIA, a seleção negativa é usada para detectar anomalias ou padrões desconhecidos, fornecendo uma forma de detecção de novidade (WILLIAMS; DANESHYARI, s.d.).

2.2 Modelos de rede

Os modelos de rede em SIA são inspirados pela forma como as células imunológicas interagem entre si para coordenar respostas imunológicas. Estes modelos podem ser usados para resolver uma variedade de problemas, incluindo detecção de anomalias, otimização e reconhecimento de padrões (GREENSMITH; WHITBROOK; AICKELIN, 2022).

Um exemplo de um modelo de rede em SIA é a abordagem de **rede idiotípica**³, que modela as interações complexas entre diferentes tipos de células imunológicas. Este modelo pode ser usado para criar sistemas que são capazes de aprendizado e memória, permitindo que eles se adaptem a novos desafios ao longo do tempo (GREENSMITH; WHITBROOK; AICKELIN, 2022).

Outro exemplo é o **Algoritmo de Células Dendríticas**, que modela o papel das células dendríticas⁴ no sistema imunológico. Este algoritmo pode ser usado para detectar anomalias em dados complexos⁵ e ruidosos⁶, tornando-o útil para aplicações como detecção de invasões em sistemas de computador (GREENSMITH; WHITBROOK; AICKELIN, 2022).

³A **rede idiotípica** é um conceito na imunologia que se refere a uma rede de interações entre diferentes tipos de células imunológicas (LEMKE, 2005).

⁴As **células dendríticas** são leucócitos originários da medula óssea, presentes no sangue, pele e sistemas digestivo e respiratório. Elas identificam infecções e desencadeiam a resposta imune (LEMO, 2022).

⁵Os tipos de dados compostos, também conhecidos como tipos de **dados complexos**, são um conjunto de tipos de dados que podem armazenar um valor de cada vez (CURSA, 2024).

⁶**Noisy data**, ou **dados ruidosos**, podem ser causados por uma variedade de fatores, incluindo coleta inadequada de dados, erros humanos, falhas nos sistemas de coleta e problemas durante a transmissão dos dados (RAMOS, 2024)

3 ALGORITMO DE SELEÇÃO NEGATIVA

O Algoritmo de Seleção Negativa se baseia no processo do sistema imunológico que envolve a **maturação**¹ das células-T, também conhecidas como **linfócitos-T**², tornando-as capazes de identificar os **não-próprios**³. No âmbito do algoritmo, **hiperesferas**⁴ são empregadas para representar os detectores em um espaço de dados **N-dimensional**⁵ (AISP, 2024).

3.1 Como o Algoritmo de Seleção Negativa é usado nos SIA

Nos Sistemas Imunológicos Artificiais (SIA), o Algoritmo de Seleção Negativa é usado para identificar anomalias ou intrusões. Ele gera um conjunto de detectores que não correspondem a nenhum padrão normal (próprio). Esses detectores podem então identificar qualquer entrada que não seja considerada normal (não-próprio).

3.1.1 Aplicações e exemplos do Algoritmo de Seleção Negativa

- **Deteção de arritmias cardíacas:** O Algoritmo de Seleção Negativa foi aplicado para detectar arritmias cardíacas em sinais de eletrocardiogramas (ECGs). Os resultados mostraram uma sensibilidade de 81,96% e uma especificidade de 62,41%, indicando que o algoritmo tem potencial para ser explorado por pesquisadores (PETRIKICZ; OLIVEIRA; ABREU, 2016).
- **Deteção de spams:** O algoritmo também foi implementado para a detecção de spams em e-mails. A aplicação foi capaz de identificar se uma mensagem de e-mail era spam ou não (CUNHA; OLIVEIRA, 2012).

¹A **maturação celular** é um processo biológico fundamental para o desenvolvimento e manutenção dos organismos vivos. Envolve uma série de etapas complexas, incluindo a proliferação, diferenciação e especialização das células (CISCE, 2024).

²**Linfócitos-T** são células do sistema imunológico responsáveis pela defesa do organismo contra agentes desconhecidos (antígenos) (MAESTROVIRTUALE, 2024).

³**Não-próprios** se refere a elementos que não são próprios, ou seja, que são estranhos ou não pertencem ao sistema (GHAFAR, 2024).

⁴**Hiperesferas** são uma generalização da esfera para um espaço euclidiano de dimensão arbitrária (WEISSTEIN, 2024).

⁵Dados **N-dimensional** se referem a dados que existem em um espaço de N dimensões (HABBEMA, 2022).

3.1.2 Fluxograma de um Algoritmo de Seleção Negativa

O Algoritmo de Seleção Negativa pode ser dividido em várias etapas, conforme descrito a seguir e ilustrado na Figura 2:

- **Geração de Detectores Aleatórios:** Nesta etapa, o algoritmo gera um conjunto de detectores aleatórios.
- **Comparação com Padrões Normais:** Cada detector é comparado com os padrões normais (próprios).
- **Seleção Negativa:** Se um detector corresponder a qualquer padrão normal, ele é descartado. Caso contrário, ele é mantido.
- **Conjunto de Detectores:** Após a seleção negativa, o conjunto resultante de detectores é aquele que não corresponde a nenhum padrão normal.
- **Deteção de Anomalias:** Os detectores são então usados para identificar qualquer entrada que não seja considerada normal (não-próprio).

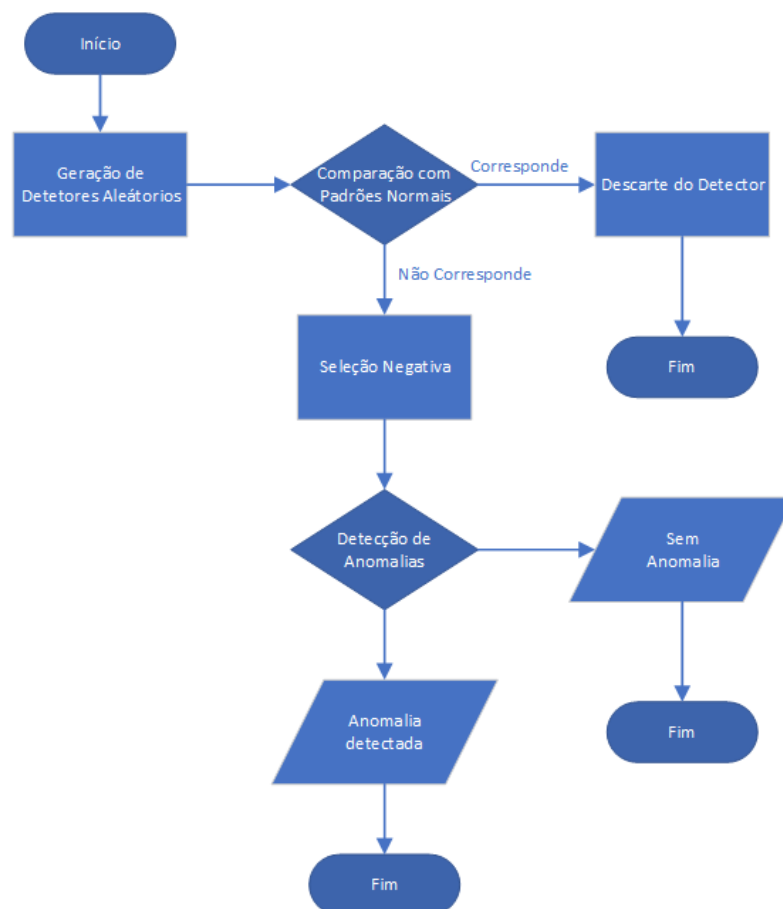


Figura 2 – Fluxograma do Algoritmo de Seleção Negativa

Fonte: Autoria própria.

4 OPTAINET

O optAiNet (*Artificial Immune Network for Optimization*) é um algoritmo de otimização inspirado no sistema imunológico que utiliza a abordagem de rede imune artificial (aiNet) para resolver problemas de otimização. A ideia central do optAiNet é a criação de uma população de anticorpos que evolui através de processos de clonagem, mutação e seleção, semelhante ao que ocorre no sistema imunológico natural (SOUZA; ROMERO, 2015).

Além disso, o optAiNet é uma rede artificial que imita o sistema imunológico e é projetada para otimizar funções com variáveis reais. A rede combina os conceitos de seleção clonal e maturação de afinidade com a ideia de uma rede imunológica, proporcionando um equilíbrio sofisticado entre a exploração e a exploração do espaço de busca. Isso abre novas possibilidades em domínios com múltiplos modos.

A optAiNet integra o conceito de rede imunológica através da implementação de um controle dinâmico do tamanho da população. Este controle é responsável por suprimir anticorpos semelhantes e introduzir novos anticorpos, mantendo assim a diversidade da população e permitindo uma exploração adequada do espaço de busca.

Semelhante às técnicas de *niching*¹, a similaridade entre indivíduos na optAiNet é determinada por uma métrica de distância: dois indivíduos são considerados semelhantes se a distância entre eles for menor que um **limiar de similaridade**, σ_s ².

Uma característica única da optAiNet é que as operações de supressão e inserção de anticorpos só ocorrem quando se detecta estagnação na população. A estagnação é considerada quando a variação percentual do *fitness* médio da população entre duas iterações é menor que um valor pequeno. Vale ressaltar que essa verificação ocorre apenas em períodos específicos de iterações. Isso permite que a população evolua por um período, através de operações contínuas de seleção clonal e mutação de afinidade, antes de executar a operação de supressão.

¹**Técnicas de *niching*** são métodos que estendem os algoritmos evolutivos para domínios que requerem a identificação e a manutenção de múltiplas soluções. Inspirados no conceito de nichos ecológicos, que representam regiões do ambiente que suportam diferentes tipos de vida compartilhando os recursos disponíveis, esses métodos foram desenvolvidos com o propósito de manter a diversidade na população e permitir a investigação de múltiplos ótimos de modo paralelo (BOCCATO, s.d.b).

²O **limiar de similaridade**, denotado por σ_s , é um valor que determina o grau de semelhança entre dois indivíduos ou entidades. Se a distância entre dois indivíduos for menor que s , eles são considerados similares. Este conceito é usado em várias técnicas de *niching* e algoritmos de otimização, como o optAiNet, para manter a diversidade na população e permitir uma exploração adequada do espaço de busca (EDISCIPLINAS, s.d.)

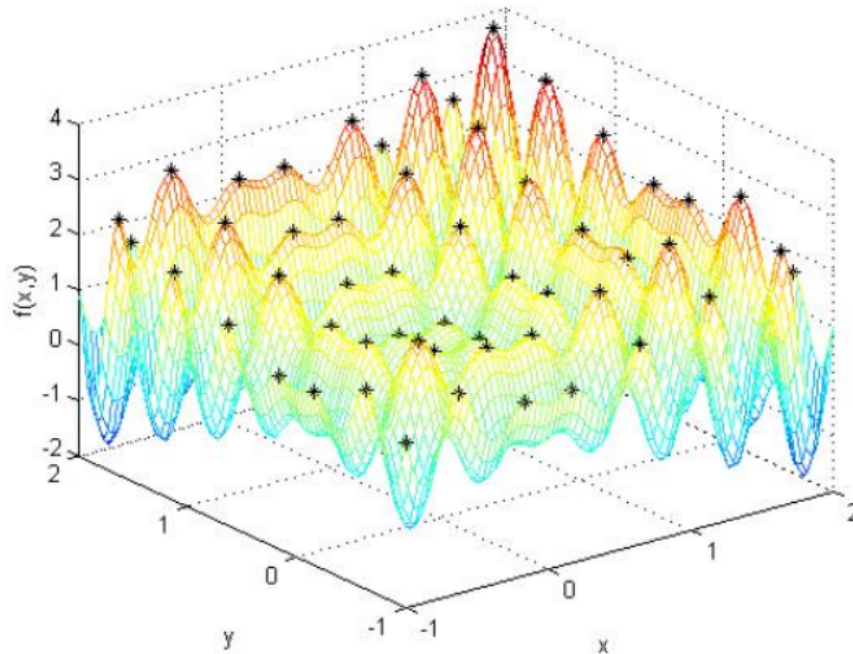


Figura 3 – Composição da população final após uma execução da optAiNet.

Fonte: (BOCCATO, s.d.a).

4.1 Como o optAiNet é usado nos SIA

Nos Sistemas Imunológicos Artificiais (SIA), o optAiNet é usado para resolver problemas de otimização complexos. Ele gera uma população de soluções (anticorpos) que evolui ao longo do tempo para encontrar a melhor solução possível para o problema em questão.

4.1.1 Aplicações e exemplos do optAiNet

- **Reconfiguração de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica:** O optAiNet foi aplicado para resolver o problema de reconfiguração de sistemas de distribuição com demandas variáveis não uniformes. O objetivo era encontrar uma única topologia radial que satisfaça os requisitos para operar em todos os níveis de demanda em um sistema de distribuição, visando minimizar os custos de perdas de energia ao longo de um período de operação (SOUZA; ROMERO, 2015).
- **Problema do Caixeiro Viajante:** O optAiNet pode ser aplicado para resolver o Problema do Caixeiro Viajante (PCV)³. Neste contexto, cada anticorpo na população representa uma possível rota que visita todas as cidades uma vez e retorna à cidade de origem. O optAiNet pode encontrar a rota mais curta, ou seja, a solução

³O **Problema do Caixeiro Viajante** (PCV) é um problema clássico de otimização combinatória. Ele tenta determinar a menor rota para percorrer uma série de cidades (visitando cada uma delas apenas uma vez), retornando à cidade de origem (UFRGS, s.d.).

ótima para o PCV, através de um processo iterativo de clonagem, mutação, seleção, e supressão de anticorpos (TAUFER; PEREIRA, 2011).

4.1.2 Fluxograma de um Algoritmo optAiNet

- **Geração de população inicial de anticorpos:** Uma população inicial de anticorpos é gerada aleatoriamente.
- **Avaliação do *fitness* dos anticorpos:** O *fitness*⁴ de cada anticorpo na população é avaliado.
- **Clonagem dos anticorpos e maturação de afinidade:** Cada anticorpo é clonado e os clones passam por um processo de maturação de afinidade (mutação).
- **Seleção dos melhores anticorpos:** Os melhores anticorpos são selecionados com base em seu *fitness*.
- **Verificação de estagnação da população:** Verifica-se se a população está estagnada, ou seja, se não houve melhoria significativa no *fitness* médio da população.
- **Supressão de anticorpos similares e inserção de novos anticorpos:** Se a população estiver estagnada, os anticorpos que são muito semelhantes entre si são suprimidos e novos anticorpos são inseridos na população.
- **Verificação de critério de parada:** Verifica-se se um critério de parada foi atingido. Se sim, o algoritmo termina. Se não, o algoritmo volta para a etapa de clonagem dos anticorpos.
- **Fim:** O algoritmo termina e retorna a melhor solução encontrada.

⁴Em um contexto biológico ou de otimização, *fitness* pode se referir à aptidão ou capacidade de um organismo ou solução para sobreviver e se reproduzir no seu meio, ou para atingir um objetivo específico (CONCEITO.DE, 2024).

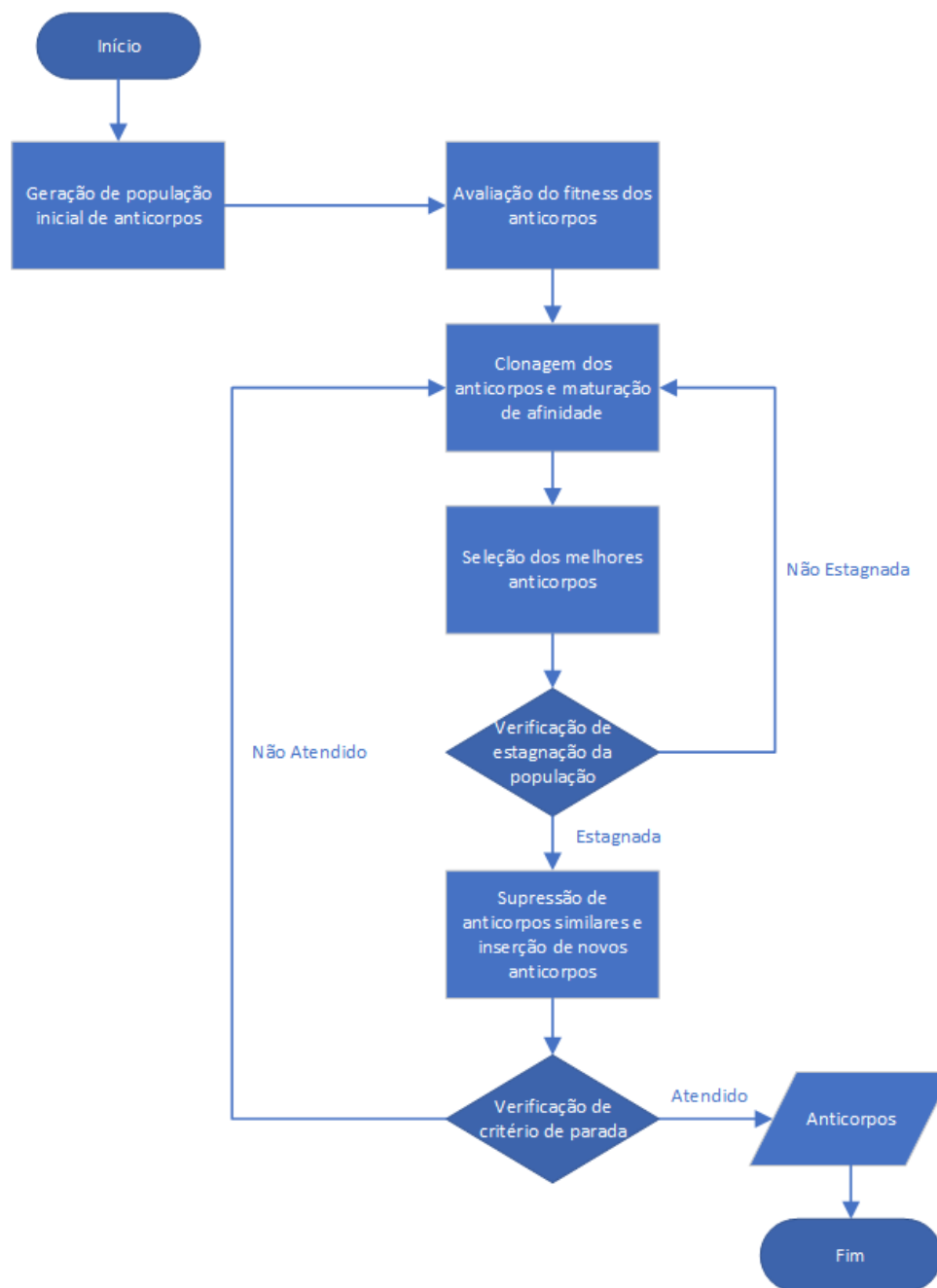


Figura 4 – Fluxograma do Algoritmo de optAiNet.

Fonte: Autoria própria.

5 COMPARAÇÃO ENTRE SELEÇÃO NEGATIVA E OPTAINET

Ambos os algoritmos possuem características e aplicações distintas, sendo importante entender suas diferenças para escolher a ferramenta mais adequada para cada problema.

5.0.1 Pontos em comum

- **Inspiração no sistema imunológico:** Tanto o Algoritmo de Seleção Negativa quanto o optAiNet se baseiam em princípios do sistema imunológico natural para o desenvolvimento de suas funcionalidades. Essa inspiração permite que os algoritmos explorem mecanismos de aprendizagem, memória e adaptação, características essenciais para a resolução de problemas desafiadores.
- **Aplicações em SIA:** Ambos os algoritmos encontram aplicações em diversas áreas dentro dos SIA, como detecção de anomalias, otimização e reconhecimento de padrões. A escolha entre um ou outro depende das características específicas do problema a ser resolvido.

5.0.2 Diferenças

Diferenças no objetivo:

- **Algoritmo de Seleção Negativa:** O objetivo principal do Algoritmo de Seleção Negativa é identificar anomalias ou intrusões em dados. Ele busca detectar elementos que não se encaixam nos padrões normais, utilizando a analogia da seleção dos **linfócitos T** no sistema imunológico para combater patógenos.
- **optAiNet:** O objetivo principal do optAiNet é resolver problemas de otimização complexos. Ele busca encontrar a melhor solução possível para um problema específico, utilizando a analogia da evolução dos anticorpos no sistema imunológico para encontrar a resposta mais eficaz contra um agente infeccioso.

Diferenças no funcionamento:

- **Algoritmo de Seleção Negativa:** O algoritmo gera um conjunto de detectores aleatórios e os compara com padrões normais. Os detectores que não correspondem a nenhum padrão normal são selecionados e utilizados para identificar novas anomalias.

- **optAiNet:** O algoritmo gera uma população inicial de soluções (anticorpos) e as avalia de acordo com seu *fitness*. As melhores soluções são clonadas e passam por um processo de mutação (maturação de afinidade). As soluções mais aptas são selecionadas, e a população é periodicamente verificada quanto à estagnação. Se estagnada, anticorpos similares são suprimidos e novos anticorpos são inseridos.

5.0.3 Aplicações específicas

Algoritmo de Seleção Negativa:

- Detecção de fraudes em transações financeiras;
- Detecção de intrusões em redes de computadores;
- Detecção de falhas em sistemas de engenharia;
- Monitoramento de saúde e diagnóstico de doenças.

optAiNet:

- Otimização de rotas de entrega;
- Otimização de alocação de recursos;
- Otimização de parâmetros de modelos de aprendizado de máquina;
- Otimização de *design* de produtos e sistemas.

6 Vantagens e Desvantagens

6.0.1 Algoritmo de Seleção Negativa

Vantagens:

- Eficaz na detecção de anomalias em dados complexos e ruidosos;
- Simples de implementar e interpretar;
- Robusto a *outliers*¹.

Desvantagens:

- Pode não ser eficaz na detecção de anomalias sutis;
- Não otimizado para problemas de otimização;
- Requer um conjunto de dados de treinamento com padrões normais.

6.0.2 optAiNet

Vantagens:

- Eficaz na resolução de problemas de otimização complexos;
- Capaz de encontrar soluções de alta qualidade;
- Robusto a diferentes tipos de problemas;

Desvantagens:

- Pode ser mais complexo de implementar e interpretar do que o Algoritmo de Seleção Negativa;
- Sensível à escolha dos parâmetros do algoritmo;
- Pode não ser eficaz em todos os tipos de problemas de otimização.

¹ *Outliers*, também conhecidos como valores aberrantes, valores atípicos ou discrepantes, são observações em um conjunto de dados que se desviam significativamente do padrão geral (QUALITY, 2023).

7 CONCLUSÃO

Os Sistemas Imunológicos Artificiais (SIA), com seus algoritmos inspirados no sistema imunológico, representam um campo de pesquisa promissor com potencial para revolucionar diversos setores, como por exemplo, na saúde, cibersegurança, finanças e logística. Ao compreender as características e aplicações desses algoritmos, podemos explorar novas soluções inovadoras e eficazes para os desafios do mundo moderno. Estes desafios incluem a necessidade de sistemas de saúde mais eficientes e personalizados, a crescente ameaça de ataques cibernéticos, a volatilidade dos mercados financeiros e a crescente complexidade das cadeias de suprimentos globais.

Referências

- AISP. *Negative Selection*. 2024. [Online; acessado em 28-Abril-2024]. Disponível em: <https://ais-package.github.io/pt-br/docs/aisp-techniques/Negative%20Selection/>.
- BOCCATO, L. *Tópico 12: Sistemas Imunológicos*. s.d. [Online; acessado em 27-Abril-2024]. Disponível em: https://www.dca.fee.unicamp.br/~lboccato/topico_12_sistemas_imunologicos.pdf.
- BOCCATO, L. *Tópico 6: niching*. s.d. [Online; acessado em 28-Abril-2024]. Disponível em: https://www.dca.fee.unicamp.br/~lboccato/topico_6_niching.pdf.
- CASTRO, L.; ZUBEN, F. J. V. *Artificial Immune Systems: Part I - Basic Theory and Applications*. 1999. [Online; acessado em 27-Abril-2024]. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/228712042_Artificial_Immune_Systems_Part_I-Basic_Theory_and_Applications.
- CISCE. *O que é maturação celular?* 2024. [Online; acessado em 28-Abril-2024]. Disponível em: <https://cisce.com.br/glossario/o-que-e-maturacao-celular/>.
- CONCEITO.DE. *Fitness - O que é, benefícios, conceito e definição*. 2024. [Online; acessado em 28-Abril-2024]. Disponível em: <https://conceito.de/fitness>.
- CUNHA, L. G.; OLIVEIRA, F. L. *Implementação do algoritmo de seleção negativa para detecção de spams*. 2012. [Online; acessado em 28-Abril-2024]. Disponível em: <https://ulbra-to.br/encoinfo/edicoes/2012/artigos/implementacao-do-algoritmo-de-selecao-negativa-para-deteccao-de-spams/>.
- CURSA. *Tipos de Dados: Tipos de Dados Compostos*. 2024. [Online; acessado em 28-Abril-2024]. Disponível em: <https://cursa.app/pt/pagina/tipos-de-dados-tipos-de-dados-compostos>.
- EDISCIPLINAS. *Processamento de Imagens Segmentação*. s.d. [Online; acessado em 28-Abril-2024]. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/1086819/mod_resource/content/1/Segmenta%C3%A7%C3%A3o2016.pdf.
- GHAFFAR, A. *Chapter 16: The Adaptive Immune Response*. 2024. [Online; acessado em 28-Abril-2024]. Disponível em: <https://microbiologybook.org/Portuguese/immuno-port-chapter16.htm>.
- GREENSMITH, J.; WHITBROOK, A.; AICKELIN, U. *Artificial Immune Systems*. 2022. [Online; acessado em 27-Abril-2024]. Disponível em: <https://arxiv.org/pdf/1006.4949>.
- HABBEMA, H. *Modelagem Dimensional na Prática*. 2022. [Online; acessado em 28-Abril-2024]. Disponível em: <https://medium.com/@habbema/modelagem-dimensional-na-pr%C3%A1tica-f7d1eaa7eb38>.
- LEMKE, H. Idiotypic network. In: _____. *Encyclopedia of Immunotoxicology*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2005. p. 1–16. ISBN 978-3-642-27786-3. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-642-27786-3_733-2.

LEMOS, M. *Células Dendríticas*. 2022. [Online; acessado em 27-Abril-2024]. Disponível em: <https://www.tuasaude.com/celulas-dendriticas/>.

MAESTROVIRTUALE. *Linfócitos T: estrutura, funções, tipos, maturação*. 2024. [Online; acessado em 28-Abril-2024]. Disponível em: <https://maestrovirtuale.com/linfocitos-t-estrutura-funcoes-tipos-maturacao/>.

NUNES, L. *Defesa de Doutorado*. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual de Campinas, 2001. [Online; acessado em 27-Abril-2024]. Disponível em: <https://www.dca.fee.unicamp.br/~vonzuben/research/lnunes.dout/defesa/apresentacao.pdf>.

PETRIKICZ, D. H.; OLIVEIRA, B. R.; ABREU, C. C. E. *Aplicação do algoritmo de seleção negativa na detecção de arritmias cardíacas*. 2016. [Online; acessado em 28-Abril-2024]. Disponível em: https://www.academia.edu/28135173/Aplica%C3%A7%C3%A3o_do_algoritmo_de_sele%C3%A7%C3%A3o_negativa_na_detec%C3%A7%C3%A3o_de_arritmias_card%C3%ADacas.

QUALITY, C. *O QUE É: OUTLIERS (VALORES ATÍPICOS)*. 2023. [Online; acessado em 28-Abril-2024]. Disponível em: <https://cirusquality.com.br/glossario/o-que-e-outliers-valores-atipicos/>.

RAMOS, M. *O que é Noisy Data (Dados Ruidosos)?* 2024. [Online; acessado em 28-Abril-2024]. Disponível em: <https://glossario.maiconramos.com/glossario/o-que-e-noisy-data-dados-ruidosos/>.

SANTOS, V. S. *Antígeno, anticorpo e vacinação*. s.d. [Online; acessado em 27-Abril-2024]. Disponível em: <https://brasilescola.uol.com.br/biologia/antigeno-anticorpo-vacinacao.htm>.

SANTOS, V. S. *Linfócitos*. s.d. [Online; acessado em 27-Abril-2024]. Disponível em: <https://mundoeducacao.uol.com.br/biologia/linfocitos.htm>.

SOUZA, S. S. F.; ROMERO, R. *ALGORITMO IMUNOLÓGICO ARTIFICIAL OPT-AINET APLICADO A RECONFIGURAÇÃO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO CONSIDERANDO DEMANDAS VARIÁVEIS*. 2015. [Online; acessado em 28-Abril-2024]. Disponível em: <https://docplayer.com.br/8387899-Algorithmo-imunologico-artificial-opt-ainet-aplicado-a-reconfiguracao-de-sistemas-de-distribuicao.html>.

TAUFER, F. S. G.; PEREIRA, E. C. *APLICAÇÃO DO PROBLEMA DO CAIXEIRO VIAJANTE NA OTIMIZAÇÃO DE ROTEIROS*. 2011. [Online; acessado em 28-Abril-2024]. Disponível em: https://abepro.org.br/biblioteca/enegep2011_TN_STO_140_885_18795.pdf.

Toda Matéria. *Linfócitos*. 2024. [Online; acessado em 27-Abril-2024]. Disponível em: <https://www.todamateria.com.br/linfocitos/>.

UFRGS, I. de Matemática e Estatística da. *O Problema do Caixeiro Viajante*. s.d. [Online; acessado em 28-Abril-2024]. Disponível em: <http://www.mat.ufrgs.br/~portosil/caixeiro.html>.

WEISSTEIN, E. W. *Hypersphere – from Wolfram MathWorld*. 2024. [Online; acessado em 28-Abril-2024]. Disponível em: <https://mathworld.wolfram.com/Hypersphere.html>.

WILLIAMS, M.; DANESHYARI, M. D. *Clonal vs. Negative Selection in Artificial Immune Systems (AIS)*. s.d. [Online; acessado em 27-Abril-2024]. Disponível em: <https://www.admiusa.org/admi2016/Papers_Graduate_Student/ADMI2016_Williams_Artificial%20Imune%20Systems.pdf>.