

RACIOCÍNIO BASEADO EM CASOS: UMA ABORDAGEM UTILIZANDO O SISTEMA IMUNE ARTIFICIAL

EDUARDO E. O. CARVALHO, WALMIR M. CAMINHAS

Laboratório de Inteligência Computacional, Depto. de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais

Avenida Antônio Carlos 6627, Belo Horizonte, Minas Gerais (MG), CEP: 31270-910, Brasil

E-mails: eduardoeoc@cpdee.ufmg.br, walmir@cpdee.ufmg.br

Abstract— Case-Based Reasoning (CBR) is a powerful method of solving problems and is fundamented on the human cognitive system, which is strongly based on solving them using solutions to similar problems already solved. The solution is given by searching memory for a similar problem, which in turn can or cannot have its solution adapted to current situation. From the process perspective of search and adaptation, Artificial Immune System (AIS) is an interesting computational paradigm that can be used in conjunction with CBR. The reason is that AIS is based on sophisticated features of human immune system, as pattern detection, data compression, population generation and dynamic environment adaptation, all those relevant characteristics to CBR. This work presents a hybrid model of CBR and AIS that the end is applied to a fault detection and diagnosis of an electrical engine.

Keywords— case-based reasoning, artificial immune systems, antibody, antigen, fault detection, electrical engine.

Resumo— O Raciocínio Baseado em Casos (RBC) é um poderoso método de resolução de problemas que se baseia no sistema cognitivo humano, alicerçado na utilização de soluções encontradas em problemas egrossos semelhantes resolvidos. A solução em questão se dá pela busca na memória por um problema semelhante, que pode ou não ter a sua solução adaptada à demanda presente. Sob a ótica deste processo de busca e adaptação, o Sistema Imune Artificial (SIA) é um paradigma computacional interessante que pode ser utilizado em conjunto com o RBC. A razão é que ele se apóia em sofisticados atributos do sistema imunológico humano, como a detecção de padrões, compressão de dados, geração de população e adaptação dinâmica ao ambiente, características relevantes para o RBC. Este trabalho apresenta um modelo híbrido de RBC e SIA que ao final é aplicado a um problema de detecção e diagnóstico de falhas de uma máquina de corrente contínua.

Palavras-chave— raciocínio baseado em casos, sistema imune artificial, anticorpo, antígeno, detecção de falhas, motor elétrico.

1 Introdução

O estudo do modelo cognitivo humano inspirou o Raciocínio Baseado em Casos (*Case-Based Reasoning* – CBR ou RBC) (Kolodner 1993), uma metodologia alicerçada no aprendizado, memória e raciocínio humanos capaz de utilizar experiência contextualizada, ou casos, na resolução de problemas. No RBC, um novo problema, ou caso a ser resolvido, é solucionado encontrando-se o mais similar na memória, ou base de casos, e reutilizando a solução encontrada no problema proposto. Em seguida, o caso recém resolvido é armazenando para que seja útil em situações futuras. A apresentação sucessiva de casos faz com que o RBC possua um aprendizado incremental e sustentável, já que os problemas solucionados estão imediatamente disponíveis para uso (Aamodt e Plaza 1994).

Como metodologia, o RBC está aberto a diversos paradigmas computacionais que possam contribuir na resolução de problemas de maneira eficiente.

Alinhado com esta abertura de uma abordagem conjunta, foi proposto (Hunt, Cooke e Holstein 1995) o uso do sistema imune artificial nas principais atividades do RBC objetivando diminuir a duração do seu ciclo de desenvolvimento e possibilitar o agrupamento da memória de casos, apresentando resultados animadores.

Considerando o potencial de uso conjunto de RBC e SIA e a baixa produção acadêmica conjunta

por dez anos após a primeira publicação de SIA envolvendo RBC, este trabalho utiliza de novas técnicas e algoritmos aplicados na melhoria das suas atividades e processos. O objetivo é reposicionar um modelo híbrido como uma alternativa para a resolução de problemas.

Este trabalho divide-se de tal modo que o item 2 trata das características do raciocínio baseado em casos, o item 3 do sistema imune artificial, o item 4 de um modelo híbrido, o 5 da avaliação deste modelo no domínio de falhas em motores elétricos e por último o item 6 das conclusões e propostas de pesquisas futuras.

2 Raciocínio Baseado em Casos

O RBC é um modelo cognitivo e também um método para a construção de máquinas inteligentes, onde novos problemas são abordados levando-se em conta experiências semelhantes anteriores e tratando a solução como algo construído pelo reaproveitamento destas experiências. Os problemas e as situações são avaliados para que uma solução adequada seja encontrada, fazendo inferências e questionamentos, quando necessário, para completar as lacunas existentes. Como resultado, o aprendizado surge do enriquecimento da memória com novos casos. Neste contexto, um caso é o conhecimento adquirido a partir da experiência de uma situação concreta prévia para se atingir um objetivo (Kolodner 1993) (Aamodt

e Plaza 1994). Os casos são compostos de pelo menos duas partes, o problema (algo a ser resolvido) e a solução.

Com o objetivo de estruturar o RBC, suas tarefas foram reunidas formando quatro processos: recuperação, reutilização, revisão e retenção de casos. Juntos compõem seu ciclo de vida (Aamodt e Plaza 1994). Cada um deles explicado separadamente a seguir.

2.1 Recuperação

É o processo de selecionar um ou mais casos da base de casos que sejam úteis na resolução da situação ou problema proposto.

O processo de recuperação de casos é tido como o principal, pois cabe a ele encontrar o caso que forneça a melhor solução, além de ser pré-requisito para os demais processos.

A recuperação depende fortemente da maneira como os casos estão representados na base de casos, dos índices usados (quando aplicável) e dos algoritmos de busca e cálculo de similaridade. Dentre as medidas de similaridade mais usadas baseadas em distância estão a Euclidiana, Manhattan e Hamming.

O desempenho na busca é um fator muito importante para alguns domínios, principalmente em bases com dezenas de milhares de casos. Assim como em um banco de dados comum, a recuperação de casos pode ser vista como um problema de busca, mas com uma importante diferença: não se espera encontrar um caso exatamente igual ao caso procurado. O RBC se baseia em semelhanças, não necessariamente em exatidão. Desta maneira, algoritmos específicos devem ser utilizados considerando a representação dos casos, os tipos de atributos dos índices, o grau de precisão da solução e a demanda por buscas sequenciais ou paralelas (Kolodner 1993).

2.2 Reutilização

Como dificilmente os casos são idênticos ao caso candidato, as soluções encontradas a partir da recuperação podem demandar alguma adequação. A reutilização objetiva adequar os casos selecionados para que forneçam uma solução que atenda às premissas.

Existem diversos métodos e técnicas de reutilização propostos (Kolodner 1993) (Aamodt e Plaza 1994) (Bergmann 2002). Os métodos mais comuns são cópia, substituição, transformação e derivação.

2.3 Revisão

A revisão é o processo de verificação do funcionamento da solução obtida. Geralmente é verificada

através de uma simulação ou teste no mundo real. Basicamente este processo é constituído da:

- **Avaliação:** aplicar a solução em uma simulação ou no mundo real para constatar o resultado dos processos anteriores;
- **Reparação:** gerar uma explicação para o motivo da falha, e, com base nesta informação, fornecer uma adaptação que será novamente validada pelo mesmo processo de revisão.

Este processo é muitas vezes tratado em conjunto com o de reutilização, formando um processo único chamado de adaptação (Pal e Shiu 2004) (Bergmann 2002), pois em muitas aplicações estes dois processos apresentam sobreposições.

2.4 Retenção

Envolve a retenção da solução e outras informações úteis. Este processo também absorve uma possível readequação dos índices dos casos, medidas de similaridade e estrutura do armazenamento resultante de uma necessidade de melhoria na base de casos.

3 Sistema Imune Artificial

O sistema imune biológico contém características que tratam as complexas e constantes situações de ameaças a que um indivíduo está sujeito. Dentre estas características estão a detecção de padrões, geração de memória, capacidade de aprendizado, diversidade de indivíduos, descentralização e resiliência. O sistema imune biológico opera sua defesa em camadas, sendo a mais simples a barreira física, que combate as ameaças através do impedimento físico da entrada dos organismos estranhos. Em contrapartida, a barreira mais sofisticada é mantida pelo sistema adaptativo, formado principalmente pelas células B e T. O sistema adaptativo interage de maneira única com os antígenos (moléculas reconhecidas pelo sistema imune e capazes de induzir uma resposta imune), reconhecendo-os e adaptando-se a eles, mesmo sem nenhuma exposição prévia. A eliminação dos antígenos inicia-se através da sua detecção pelos anticorpos (agentes excretados por células plasmáticas derivadas dos linfócitos B, os plasmócitos), seguida da sua remoção por outras células do organismo, como as células T citotóxicas.

O sistema imune artificial, ou SIA, representa basicamente a transposição de aspectos relevantes do modelo imunológico biológico, objetivando adaptá-los e utilizá-los na resolução de problemas tratáveis computacionalmente.

Este trabalho focará na utilização de um processo biológico denominado rede imunológica, ou rede imune, que se baseia na premissa de que os anticorpos reconhecem e são reconhecidos pelos seus pares, assim como estes reconhecem os antígenos. Esta

capacidade de reconhecimento mútuo dos anticorpos é explicada pela existência dos idiotopos (partes reconhecíveis do anticorpo) que podem ser reconhecidos por outros anticorpos, como na Figura 1. Através deste mecanismo estabelece-se um comportamento dinâmico, pois segundo esta teoria, o sistema imune é um componente dessa estimulação, não estando em estado latente à espera de um estímulo externo. A teoria da rede imune ainda não é completamente aceita pela comunidade de pesquisa imunológica, mas apresenta características computacionais muito interessantes, motivo pelo qual terá atenção especial neste trabalho.

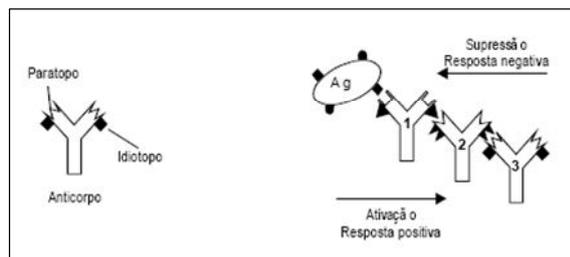


Figura 1 – Respostas entre anticorpo-antígeno e anticorpo-anticorpo da rede imunológica (de Castro 2001).

Dentre os modelos de rede imunes artificiais existentes, será utilizado o de de Castro & Von Zuben (2000), a Rede Imune Artificial (*Artificial Immune Network* - aiNet). A escolha se deve à relevância de suas características, como a “capacidade de descrever a estrutura interna dos antígenos (dados de treinamento), seu perfil de distribuição de probabilidade, relações de vizinhança (grupos)” (de Castro 2001) e compressão de dados, atributos com grande potencial de aplicação no raciocínio baseado em casos, pois podem contribuir para otimizar o processo de recuperação e facilitar a manutenção da base de casos.

A aiNet foi concebida para uso com valores reais no espaço de formas Euclidiano. A aiNet lida com a afinidade através da similaridade, avaliando o seu grau entre os anticorpos vizinhos e os antígenos do seu entorno.

Na aiNet, cada elemento é formado por uma molécula de anticorpo, ou seja, uma cadeia de atributos, gerados aleatoriamente. Em seguida, os anticorpos são apresentados a um antígeno de cada vez, onde a afinidade será calculada utilizando-se o inverso da distância euclidiana. Os anticorpos com maior afinidade gerarão mais clones, que por sua vez passarão por um processo de mutação, inversamente proporcional à afinidade. Os anticorpos com a maior afinidade são mantidos como células de memória e os de menor são descartados, sendo substituídos por outros gerados no processo de expansão clonal e mutação. Após esta consolidação, os anticorpos formam uma rede, onde a sua afinidade em relação a outros anticorpos é calculada e os anticorpos com a afinidade menor que um determinado limiar são eliminados, ou

seja, anticorpos muito semelhantes são removidos da rede, promovendo assim a diversidade entre eles.

4 Modelo híbrido, Aplicação e Resultados

Esta seção tratará o Raciocínio Baseado em Casos e o Sistema Imune Artificial de forma híbrida para aumentar a eficiência na recuperação de casos e otimizar o tamanho da base de casos. Em seguida esta abordagem será aplicada na detecção de falhas em máquinas corrente contínua (CC).

4.1 Modelo Híbrido

Como já exposto, a rede imunológica tem um ponto central neste trabalho junto ao RBC, pois estabelece relações de proximidade entre casos, o que possibilita a detecção de agrupamentos e também oferece uma abordagem alternativa para cada um dos processos do RBC. O processo de recuperação beneficia-se da busca baseada em índices (anticorpos da aiNet), evitando uma análise completa na base de casos. Os processos de reutilização e revisão podem ser contemplados através da edição somática ou da exploração da vizinhança de grupos e de casos. Por último, a retenção, ou armazenamento, se dará pela permanência do caso e de suas de relações, criando áreas de conhecimento especializado através de uma rede de índices e casos. A Figura 2a ilustra os casos no espaço e a Figura 2b os casos com os índices referenciando a sua distribuição. Como pode ser observado, a distribuição dos índices, ou anticorpos, é representativa em relação aos casos, ou antígenos.

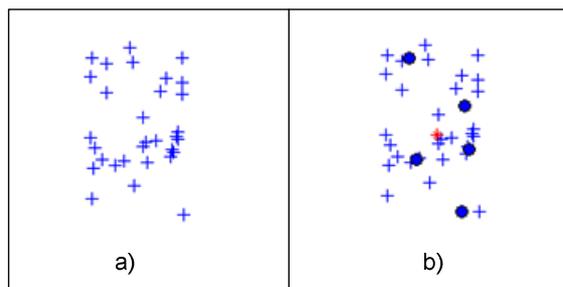


Figura 2 – (a) Antígenos (casos). (b) Os anticorpos (círculos), ou índices, se posicionam em distribuição muito semelhante aos antígenos. O asterisco é o centro dos anticorpos.

A Figura 3 representa uma região qualquer de uma base de casos onde os índices, ou anticorpos, estabelecem conexões entre si, criando uma malha primária. Por sua vez, os casos, ou antígenos, são indexados pelos índices, ou anticorpos, que criam áreas de influência na base de casos através de uma malha secundária, que liga os índices aos casos. Como resultado, a recuperação pode ser realizada em menos estágios, pois, em princípio, são realizadas buscas pelos índices mais similares aos casos que demandam uma solução, refinando a busca pelo caso mais próximo no entorno do índice mais próximo.

Além desta vantagem, a rede de casos permite identificar áreas de diferentes densidades que podem ser exploradas para descobrir novidades na base de casos.

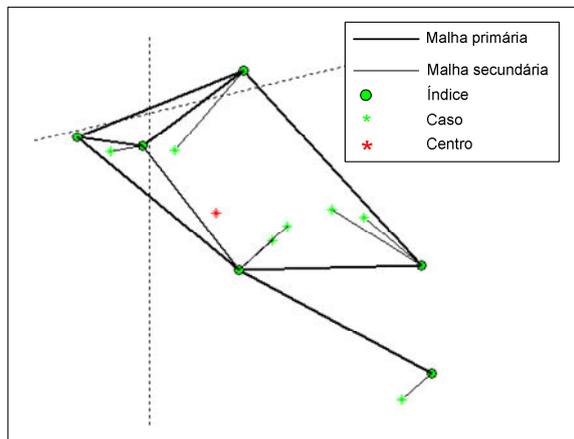


Figura 3 - Espaço em três dimensões onde os anticorpos são representados pelos círculos e os antígenos pelos pontos em forma de estrela. O ponto sem nenhuma conexão é o centro da distribuição dos anticorpos.

A execução da aiNet neste trabalho é parte de um processo maior, que envolve técnicas de agrupamento (de Castro 2001) que possibilitam o delineamento de regiões do espaço ocupada pelos casos, onde:

a aiNet pode ser vista como um sistema de pré-processamento para as técnicas de análise de grupos, tornando-se uma ferramenta poderosa para a filtragem e pré-processamento de dados de um conjunto amostral.

4.2 Aplicação na Detecção e Diagnóstico de Falhas em Máquinas de Corrente Contínua

Devido à grande adoção de motores elétricos em processos fabris, o modelo híbrido de RBC será avaliado no domínio de uma máquina de Corrente Contínua (CC). Os dados da máquina de CC serão gerados por um simulador que modela um sistema dinâmico de CC não linear de terceira ordem que considera pontos de operação normal e de falhas. O modelo do simulador foi proposto (Caminhas 1997) com o objetivo de criar uma ferramenta de projeto e um teste de sistemas de detecção e diagnóstico de falhas.

O experimento tem por objetivo utilizar alguns casos conhecidos, ou pontos de operação, como referência para resolução das próximas entradas do sistema, ou novos pontos de operação, constituindo um problema de classificação voltado para a detecção e diagnóstico. O componente problema do caso será constituído de três variáveis: a corrente de armadura (i_a), a corrente de campo (i_{fd}) e a velocidade da máquina (ω_r); todas obtidas diretamente na saída do simulador. A solução será dada por uma das se-

guintes opções: comportamento normal do sistema, falha no sensor de armadura, falha no sensor de corrente de armadura ou falha no sensor de velocidade.

Tabela 1. Massa de pontos de operação gerada pelo simulador.

Regime	Número de pontos
Normal	4100
Falha corrente de armadura	900
Falha corrente da fonte	1300
Falha sensor de velocidade	1200
TOTAL	7500

O experimento possui três variações, cada uma se diferenciará no número de casos utilizados da massa dos pontos de operação, sendo 50%, 25% e 12,5% da Tabela 1, o que correspondendo a 3750, 1875 e 938 casos, respectivamente. Por sua vez, os casos de cada variação são divididos da seguinte maneira: 10% para inicialização da base de casos, 60% para treinamento (resolução com acompanhamento – ajuste de parâmetros), 20% para validação (resolução sem acompanhamento) e 20% para testes na busca por casos similares.

A resolução do caso, ou classificação do ponto de operação, se dará pela inserção do caso apresentado no agrupamento pertinente da Tabela 1. Esta etapa de resolução do caso é consumada utilizando-se o posicionamento dos índices (anticorpos) resultantes da execução da aiNet no estágio inicial do experimento. Complementarmente, em tempo de execução, é realizada uma atualização incremental da aiNet para cada ponto apresentado ao sistema, reposicionando assim a rede de casos. É importante colocar que a aiNet provê a distribuição dos índices no espaço de casos, ao passo que o agrupamento propriamente dito é executado por um algoritmo de agrupamento ponto a ponto, o agrupamento participativo (da Silva 2003). A interação entre os dois é da seguinte maneira: quando um ponto é apresentado ao sistema, o algoritmo de agrupamento realiza a avaliação para detectar a necessidade de criação de um grupo, união de grupos ou inserção do ponto em um grupo existente. Em seguida, a aiNet é executada somente no grupo no qual o ponto foi inserido, adaptando a distribuição dos anticorpos para que estes sejam utilizados na resolução do próximo caso apresentado. O algoritmo de agrupamento foi modificado para utilizar como parâmetros os índices (anticorpos) e não os casos (antígenos), pois os índices são em número significativamente menor que os casos.

A recuperação de casos com o objetivo de encontrar pontos semelhantes será empreendida utilizando três técnicas: 1) baseada em índices (seleciona o grupo e em seguida explora a vizinhança do índice mais semelhante para encontrar casos similares); 2) baseada na varredura completa na base de casos, e, por último, 3) baseada somente no centro dos grupos (o grupo é selecionado baseado no posicionamento

do seu centro, para, em seguida, ter todos seus casos percorridos).

A adaptação neste problema se dará através da detecção da necessidade de analisar agrupamentos vizinhos caso a diferença na classificação entre grupos seja menor que 5%.

Por último, a retenção do caso é consumada com a inserção deste em um grupo e com a geração das conexões com os índices vizinhos, o que facilitará a resolução dos próximos casos e as atividades de manutenção na base de casos.

4.3 Resultados

Na etapa de recuperação (uso de 20% dos dados das variações do experimento para busca), a técnica 1 variou a exploração dos casos vizinhos começando com apenas um índice, incluindo gradativamente a exploração da vizinhança de dois, três, quatro e cinco índices. Na exploração da vizinhança com quatro índices, a técnica 1 apresentou precisão entre 99% e 100%, enquanto as demais apresentaram 100%, mas em contrapartida, a eficiência da técnica 1 foi acima de 90% e as demais sempre abaixo de 70%, o que ilustra a vantagem da busca em uma base de casos indexada desta maneira. Os resultados com números diferentes de índices foram caracterizados por um maior distanciamento do equilíbrio entre precisão e eficiência, mas ainda com resultados bastante satisfatórios. Junto a este comportamento, a taxa de compressão média dos índices em relação aos casos foi de 91%, ou seja, foi possível indexar uma base de casos com quantidade de índices igual a 9% da base de casos. É relevante colocar que os índices são representativos em relação à distribuição dos casos.

Na adaptação houve momentos onde foi detectada a possibilidade de classificação do caso em outros agrupamentos com características similares, mas todos foram corretamente classificados.

Na retenção, a conexão das malhas primárias e secundárias de um grupo se dá de diferentes maneiras. Na malha primária (índices com índices), a conexão é criada quando a distância entre cada um deles é menor que o valor médio das distâncias entre todos os índices de um mesmo grupo. Na malha secundária (índices com casos), a conexão é estabelecida entre o par que apresentar a menor a distância. Estas conexões são utilizadas para efetuar as buscas e explorar as áreas de conhecimento da base de casos.

Utilizando-se a rede de casos para detectar áreas de alta densidade na base de casos, foi possível remover, em média, 20% dos casos de cada grupo, melhorando assim a eficiência e também mantendo a mesma precisão, retirando somente os casos irrelevantes, chamados auxiliares.

5 Conclusão

Os resultados obtidos no protótipo híbrido do RBC e SIA indicam um caminho positivo a ser trilhado por esta abordagem, já que a busca, um dos processos mais usados e custosos do RBC, teve sua eficiência sensivelmente melhorada pela divisão dos casos em grupos com índices mapeando as suas distribuições, o que apresenta desdobramentos favoráveis na recuperação, inserção e manutenção de casos.

Dentre as melhorias e propostas identificadas até o momento estão o uso de mecanismos de defesa em camadas do sistema imune, a exploração direcionada do espaço, uso da adaptação conjugada de RBC com operadores genéticos e otimização do desempenho da geração de anticorpos da aiNet.

Referências Bibliográficas

- Aamodt, A., e E. Plaza. "Case-Based Reasoning: Foundational Issues, Methodological Variations, and System Approaches." *AI Communications*, Março de 1994: 39-59.
- Bergmann, Ralph. *Experience Management: Foundations, Development Methodology, and Internet-Based Applications*. 1a. Edição. Berlin: Springer, 2002.
- Caminhas, W. M. "Estratégias de Detecção e Diagnostico de Falhas em Sistemas Dinâmico." Tese de Doutorado, Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), 1997.
- da Silva, L. R.S. "Aprendizagem Participativa em Agrupamento Nebuloso de Dados." Dissertação de Mestrado, Engenharia Elétrica e Computação, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), 2003.
- de Castro, L. N. "Engenharia Imunológica: Desenvolvimento e Aplicação de Ferramentas Computacionais Inspiradas em Sistemas Imunológicos Artificiais." Tese de Doutorado, Engenharia Elétrica, UNICAMP, Campinas, 2001.
- de Castro, L. N., e F. J. Von Zuben. "An Evolutionary Immune Network for Data Clustering." *Brazilian Symposium on Artificial Neural Networks (IEEE SBRN-2000)*, 2000: 84-89.
- Hunt, John E., Denise E. Cooke, e Horst Holstein. "Case Memory and Retrieval Based on the Immune System." *1th International Conference on Case-Based Reasoning (ICCB-95)*. Sesimbra: Springer, 1995. 205-216.
- Kolodner, J. L. *Case-Based Reasoning*. 1a. Edição. San Mateo: Morgan Kaufmann, 1993.
- Pal, Sankar K., e Simon C. K. Shiu. *Foundations of Soft Case-Based Reasoning*. 1a. Edição. John Wiley & Sons, 2004.