

6 Conclusões e Trabalhos Futuros

Encerra-se esta tese com as conclusões gerais sobre o trabalho realizado e com sugestões para a continuação desta pesquisa.

6.1 Conclusões

Esta tese pesquisou a utilização de Sistemas Imunológicos Artificiais na detecção de falhas. Um dos objetivos principais foi o desenvolvimento de métodos de geração de detectores para aprimorar a função de detecção de falhas do Algoritmo de Seleção Negativa. Em função deste objetivo realizou-se um estudo sobre os fundamentos de detecção de falhas e dos Sistemas Imunológicos Artificiais.

Nesta etapa, verificou-se que a utilização de técnicas inteligentes para a detecção de falhas estava baseada na construção de modelos e no uso de classificadores. A construção de modelos envolve dificuldades conhecidas como obtenção de precisão e da modelagem propriamente dita. Tendo em vista que os classificadores procuram por padrões de falha específicos, eles apresentam vulnerabilidade para lidar com padrões diferentes dos previstos (Martins et al., 2000) e em situações onde poucos dados representam condições de falha (Taylor & Corne, 2003).

Considerando-se estas dificuldades e recordando que o Sistema Imunológico tem a capacidade de distinguir qualquer célula estranha (*não-própria*) das células do corpo (*própria*), verificou-se que esta propriedade pode ser utilizada para discriminar os padrões anormais de funcionamento (detecção de falhas). Sendo assim, o trabalho prosseguiu, pesquisando um novo paradigma em Inteligência Computacional, os Sistemas Imunológicos Artificiais (Castro & Timmis, 2002).

O Algoritmo de Seleção Negativa (NSA) é o de maior interesse para a área de detecção de falhas, pois é capaz de realizar a detecção utilizando apenas os

padrões normais (*próprios*). Outro aspecto importante é que ele pode ser usado para gerar amostras para treinamento de classificadores e com isso melhorar seu desempenho. Diversas variações deste algoritmo foram aplicadas na detecção de intrusos (Dasgupta, 1999d), de anomalias (Dasgupta, 1996) e de falhas (Dasgupta, 1999d).

Gonzalez (Gonzalez et al., 2002) propôs a utilização de representação real para o Algoritmo de Seleção Negativa (RNSA). No RNSA original os detectores são hiperesferas de raio fixo, sendo que o raio é determinado antes do procedimento de geração de detectores.

Neste trabalho a representação proposta viabiliza a definição de detectores diferentes. Cada detector é uma hiperesfera representada por um ponto no \mathcal{R}^n , que é o centro, e por um valor no \mathcal{R}^+ , que é o raio de ação. Esta representação apresenta uma flexibilidade maior do que aquela vista em (Gonzalez et al, 2002) e (Amaral et al., 2004a), onde o valor do raio para todos os detectores é fixo. A utilização de diferentes raios para os detectores permite que a cobertura do espaço *não-próprio* seja feita com uma quantidade menor de detectores, possibilitando que este algoritmo seja utilizado em uma escala maior. Foram desenvolvidos novos modelos capazes de gerar detectores para cobrir o espaço *não-próprio* de forma eficiente, determinando a quantidade e as características de cada detector. O primeiro modelo emprega algoritmos genéticos, o segundo modelo utiliza o particionamento Quadtree (Sousa, 1999) e o terceiro modelo é inspirado nas redes imunológicas.

Os estudos de casos foram divididos em duas partes principais. Na primeira parte, utilizam-se exemplos bidimensionais para avaliar com maior facilidade as características de cada modelo proposto. Na segunda parte, são utilizados diversos exemplos de diferentes áreas.

No primeiro estudo de casos foi utilizado um divisor resistivo. Os modelos propostos alcançaram uma excelente cobertura do espaço *não-próprio* com um número de detectores bem menor do que o estimado para o RNSA original. Eles viabilizaram o treinamento de classificadores que demonstraram um bom desempenho para o conjunto de teste apresentado. A importância da utilização dos detectores para gerar pontos de treinamento para os classificadores fica evidenciada no final deste estudo, quando se descreve o que aconteceria com um classificador quando é apresentado a falhas para os quais não foi treinado.

No segundo estudo de casos (as duas espirais), o número de detectores gerados foi maior do que no primeiro, mas ainda assim foi bem menor do que o estimado para o RNSA.

No terceiro e quarto estudo de casos, foram detectadas falhas em circuitos analógicos que são normalmente utilizados na literatura para testes de técnicas de detecção de falhas (Arminian & Arminian, 2002), (Spina & Upadhyaya, 1997). Os resultados apresentados foram muito bons quando comparados com outros relatados na literatura (Arminian & Arminian, 2002), (Spina & Upadhyaya, 1997), devendo-se enfatizar que os classificadores foram treinados utilizando-se somente informações obtidas a partir do comportamento normal do circuito.

O quinto e o sexto estudo de casos tratam de sistemas bastante utilizados na indústria (motores e rolamentos). No quinto, foram detectados diferentes tipos de falhas em motores de indução. Verificou-se o compromisso existente entre a taxa de detecção de falhas e a taxa de alarmes falsos. O sistema utilizado foi ajustado para que houvesse um aumento expressivo na detecção de pontos anormais sem, no entanto, apresentar um aumento significativo na taxa de alarmes falsos. No sexto estudo de casos, o sistema implementado para detecção de falhas em rolamentos, apresentou um desempenho superior ao relatado em em (Ji & Dasgupta, 2004).

Os estudos de casos apresentados foram retirados de diferentes áreas e os resultados obtidos pelos modelos concebidos, sobretudo o com geração de detectores por particionamento Quadtree e por Algoritmos Genéticos, tiveram um bom desempenho na detecção das falhas apresentadas nos conjuntos de testes, devendo-se enfatizar que os classificadores foram treinados utilizando-se somente informações obtidas a partir do comportamento normal do circuito.

A seção 6.2, a seguir, apresenta sugestões de trabalhos futuros para proporcionar uma continuidade na pesquisa, além de indicar possíveis soluções para alguns problemas e limitações encontrados.

6.2 Trabalhos Futuros

As propostas para trabalhos futuros para posterior desenvolvimento desta pesquisa estão enumeradas a seguir.

Aprofundar a pesquisa de técnicas para a obtenção de conjuntos *próprios* representativos, isto é, a determinação de centros e raios para os pontos do conjunto *próprio*. Neste trabalho, este problema foi tratado procurando estimar os raios dos pontos próprios através da distância ao vizinho mais próximo, ou através da escolha de pontos apropriados, nos quais a distância a seus vizinhos mais próximos é minimizada (Duin, et al., 2004). Uma sugestão neste aspecto seria aplicar o particionamento também no espaço *próprio*, podendo-se utilizar a técnica do Quadtree ou outros tipos de particionamento em hiperesferas (Kumar & Rocket, 1998).

A experimentação de novas técnicas de pré-processamento que favoreçam a detecção de falhas sempre foi um tópico de extrema importância. A eficácia de qualquer procedimento de detecção de falhas está intimamente relacionada com a capacidade das técnicas de pré-processamento de auxiliar a identificação de padrões anormais. No caso do Algoritmo de Seleção Negativa, é importante que estas técnicas de pré-processamento consigam fornecer uma representação significativa do conjunto *próprio*. Além das técnicas de pré-processamento que normalmente são utilizadas (transformadas Wavelet, Fourier, momentos estatísticos, etc), outras técnicas devem ser investigadas. Neste sentido, é oportuna uma maior experimentação da técnica de “modelagem do caminho” para a detecção de falhas. Em particular, seria muito importante verificar sua aplicação na detecção de falhas em circuitos lineares. Nesta aplicação, o sinal usado na modelagem poderia ser a resposta ao impulso. Além desta técnica, duas outras têm despertado interesse na comunidade científica. A primeira é baseada em algoritmos de compressão de dados. Ela tem sido utilizada em diversas áreas (Keogh et al., 2004) e se baseia na idéia de que a similaridade entre padrões pode ser determinada a partir de medidas feitas nos padrões comprimidos. A segunda é baseada na utilização dos *bitmaps* de séries temporais. Esta técnica foi inspirada no método de representação de seqüências de DNA usada para identificar diferentes espécies (Wei, 2005). A idéia básica é que cada espécie tem um conjunto de *bitmaps* que os representam.

Os classificadores foram obtidos usando os pontos do conjunto *próprio* e os detectores para gerar pontos de treinamento, o que viabilizou o uso de diversos tipos de classificadores. Entretanto, pode-se imaginar que, a partir das hiperesferas

que representem o conjunto *próprio* e aquelas que representam os detectores, possam ser extraídas regras para detectar falhas nos sistemas.

O método de geração de detectores inspirado nas redes imunológicas necessita de uma maior experimentação, sobretudo em relação à política de retirada e de colocação de elementos na rede.

Em relação ao particionamento Quadtree, é necessária uma investigação mais aprofundada da variação do método que usa a função de detecção. Esta variação possui a grande vantagem de particionar tanto o espaço *não-próprio* quanto o espaço *próprio*. Entretanto, para que ela possa ser utilizada, é necessário que seja desenvolvido um método computacionalmente mais eficiente para calcular esta função de detecção.

Em referência aos critérios de parada do Quadtree, uma investigação mais detalhada é necessária. Se o critério utilizado for o número de detectores, o algoritmo prossegue até obter o número desejado. Entretanto, nenhuma crítica é feita sobre quais os detectores de mesmo raio devem ser utilizados.

Uma vez que o particionamento é realizado, não se agrupam os detectores de menor raio em um detector de raio maior (veja Fig. 5.7), o que faria com que os detectores fizessem a cobertura do espaço *não-próprio* de forma mais eficiente porque se teria um menor número de detectores para se cobrir o mesmo espaço.

Para o método de geração de detectores por meio de Algoritmos Genéticos, a função decodificadora utiliza uma estratégia “gulosa”. Seria interessante avaliar se outros tipos de estratégias podem ser implementados.

Até o presente momento, estes três métodos foram considerados de forma separada. Seria oportuno investigar o desempenho que um dos métodos teria se utilizasse pontos de treinamento gerados por um outro método. Este procedimento poderia proporcionar uma compreensão mais profunda desses métodos de geração.

Acredita-se que a utilização de Sistemas Imunológicos Artificiais possa contribuir para uma nova classe de sistemas que sejam mais robustos e tolerantes a falhas, o que é bastante desejável em aplicações industriais. O trabalho de pesquisa realizado permite vislumbrar um modo inovador para projetar sistemas de detecção de falhas, o que sem dúvida trará mudanças e novas perspectivas, não somente na indústria, mas também em outras áreas de aplicação.