

PLATAFORMA DE DESENVOLVIMENTO DE CIRCUITOS ELETRÔNICOS ADAPTATIVOS

FERNANDO S. RIBEIRO, SENDER ROCHA DOS SANTOS, JOSÉ FRANCO M. AMARAL, JORGE L. M. AMARAL

*Programa de Pós-Graduação em Engenharia Eletrônica,
Departamento de Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações,
Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ
Rua São Francisco Xavier n°.524, 5°. Andar, Sala 5001-E, Rio de Janeiro, RJ, 20550-900
E-mails: fschlemm@gmail.com; senderrocha@yahoo.com.br;
franco@uerj.br; jamaral@uerj.br*

Abstract— This work presents a general architecture of an evolutionary system for electronic analog circuits based on genetic algorithms. The platform design enables interoperability of its main components including module substitution or functionality improvement. In the current version it implements the extrinsic model, that means, circuit simulation, aiming the flexibility and easy experimentation. It enables free interconnection on a number of nodes of a circuit to be synthesized or adapted. The evolutionary technique – Genetic Algorithms – is used to search for the best interconnection solution on the desired circuit or circuit function. In the current version it makes use of the MATLAB with a genetic algorithm toolbox and the Spice to simulate circuits. The case studies presented demonstrate the potential of the platform to adapt electronic circuits.

Keywords— Evolutionary Computation. Evolutionary Electronics. Adaptive Systems. Evolutionary Systems.

Resumo— Este trabalho apresenta uma arquitetura geral de um sistema evolucionário para circuitos eletrônicos analógicos baseada em algoritmos genéticos. A organização lógica privilegia a interoperabilidade de seus principais componentes, incluindo a possibilidade de substituição ou melhorias internas de suas funcionalidades. A plataforma implementada utiliza evolução extrínseca, isto é, baseada em simulação de circuitos, e visa facilidade e flexibilidade para experimentação. Ela viabiliza a interconexão de diversos componentes aos nós de um circuito eletrônico que será sintetizado ou adaptado. A técnica de Algoritmos Genéticos é usada para buscar a melhor forma de interconectar os componentes para implementar a função desejada. Esta versão da plataforma utiliza o ambiente MATLAB com um “toolbox” de Algoritmos Genéticos e o Spice como simulador de circuitos. Os estudos de caso realizados apresentaram resultados que demonstram a potencialidade da plataforma no desenvolvimento de circuitos eletrônicos adaptativos.

Palavras-chave— Computação Evolucionária. Eletrônica evolucionária. Sistemas adaptativos. Sistemas evolutivos.

1 Introdução

Os sistemas eletrônicos podem ser concebidos e dotados de recursos que permitam adaptação a novas condições operacionais, por conta de falhas, variação de parâmetros internos ou condições externas (Lovay *et al*, 2010).

Os sistemas adaptativos podem procurar em seus próprios recursos – hardware ou software – possíveis soluções para manter suas funções originais dentro de padrões operacionais mínimos.

Estes mesmos sistemas podem ser projetados com módulos redundantes ou com circuitos tolerantes a falha, de forma a maximizar as possibilidades de manutenção da especificação mesmo depois da ocorrência de falhas que poderiam ser classificadas como catastróficas ou inviabilizantes para os padrões funcionais esperados (Szász & Chindris, 2010).

Adaptabilidade e sustentabilidade funcionais são dois conceitos que podem ser usados em conjunto na elaboração de sistemas que estejam submetidos a regimes de trabalho sem possibilidade de manutenção, recalibragem periódica, condições hostis de operação, submetidos a grandes variações de condições externas ou a grandes distâncias, como por exemplo: sistemas em órbita ou lançados ao espaço em missões (Keymeulen, 2010) e sistemas que atuam em grandes profundidades (minas, poços de petróleo e outros) (Ribeiro, 2012).

É também de grande interesse o prolongamento do tempo de vida, a tolerância a falhas e a possibilidade de atualização de produtos comerciais, de forma que estes não se percam por falhas simples ou possam ser reutilizados.

A redundância de circuitos tem sido utilizada em casos críticos quando é possível e viável sua aplicação em função de importantes restrições que normalmente estão relacionadas com o volume ocupado pelo circuito, o peso, a potência envolvida e o custo.

A utilização de algoritmos evolutivos na área de circuitos eletrônicos deu origem a uma nova área de pesquisa denominada de Eletrônica Evolucionária (Zebulun *et al*, 2001), que vem sendo intensamente investigada nos últimos anos (Greenwood & Tyrrel, 2007).

Adaptação é um fundamento no campo de estudo da eletrônica evolucionária e pode ser definida como “a capacidade de modificar a si mesmo para manter ou melhorar seu desempenho em função de objetivos internos e/ou em resposta a mudanças no ambiente (interno ou externo)” (Stoica & Andrei, 2007).

A Eletrônica Evolucionária viabiliza o desenvolvimento de práticas, métodos, algoritmos e estruturas de software e/ou hardware que permitem evolução na concepção de circuitos mais robustos e reutilizáveis. Este trabalho apresenta uma plataforma evolutiva para o desenvolvimento de circuitos para viabilizar estudos relativos à adaptabilidade.

2 Propósito

O objetivo principal deste trabalho é implementar uma plataforma de evolução extrínseca (implementação em software) que forneça um ambiente adequado para síntese, adaptação e pesquisa de circuitos eletrônicos utilizando algoritmos evolucionários. Nesta plataforma poderão ser estudados aspectos relativos à adaptabilidade em situação de falha, imunidade em relação a interferências internas e externas ou variação de parâmetros. Ela também deve permitir a síntese de circuitos a partir de especificações de entrada e saída definidas.

A arquitetura geral da plataforma concebida permite os seguintes tipos de evolução: extrínseca, intrínseca, ou ambas (híbrida); entretanto focamos na implementação da abordagem extrínseca. Os circuitos devem ser principalmente baseados em componentes discretos de forma que seja possível projetar, simular e verificar a capacidade de adaptação dos mesmos.

O algoritmo genético (AG) que serviu de base para este trabalho (Houck *et al*, 1996) foi estudado de forma a garantir que pudessem ser feitas alterações em suas estruturas internas com o objetivo de permitir principalmente a implementação de outras estratégias de mutação, cruzamento, geração da população inicial e distribuição de demanda na avaliação de indivíduos.

O algoritmo genético usado neste trabalho tem seus fontes disponíveis na internet e pode ser baixado pelo endereço:

<http://www.ise.ncsu.edu/kay/gaotv5.zip>

Trata-se de um AG que pode trabalhar com codificação binária ou “float”, com elitismo e diversas outras opções configuráveis.

3 Métodos

3.1 Descrição da Plataforma

A plataforma extrínseca implementada contempla o uso de três componentes principais: o software de simulação de circuitos, o MATLAB e um pacote de algoritmos genéticos que é executado no ambiente do MATLAB.

A Figura 1 mostra o diagrama de funcionamento da plataforma, onde o MATLAB e o Spice se destacam.

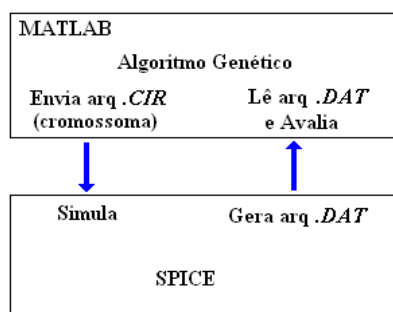


Figura 1. Diagrama Geral da Plataforma Extrínseca

O programa desenvolvido no ambiente MATLAB, que coordena todo o processo, gera o arquivo “.CIR” que contém as ligações elétricas de cada componente do circuito que será simulado pelo Spice.

O arquivo com extensão “.CIR” também contém a descrição dos circuitos compatível com o Spice. Após a simulação o Spice gera um arquivo de saída com extensão “.DAT” que contém os dados referentes a tensões e correntes nos nós do circuito simulado.

A partir da leitura dos dados contidos no arquivo “.DAT” as curvas do circuito simulado e do circuito padrão são comparadas e então uma avaliação de aptidão é atribuída ao circuito simulado.

3.2 Codificação Genética de Circuitos

A principal vantagem no uso de algoritmos genéticos é seu desempenho em problemas com espaços de busca muito complexos ou grandes, o que inviabiliza o uso de técnicas convencionais.

Os algoritmos genéticos, com uma população de soluções candidatas, usam regras probabilísticas para promover a evolução de outras gerações de soluções. Os mecanismos usados tentam imitar os processos de evolução biológica Darwiniana.

Estruturalmente os algoritmos genéticos são compostos por:

- Uma representação do problema através de um cromossoma (conjunto de genes que caracterizam o que se deseja investigar);
- Um processo de seleção dos cromossomas que farão parte da população a ser testada;
- O uso de operadores genéticos: cruzamento e mutação;
- Uma função de avaliação da aptidão de cada indivíduo.

A representação do problema corresponde ao mapeamento das possíveis soluções em uma estrutura de dados que possa ser manipulada computacionalmente (uma matriz ou vetor), que em algoritmos Genéticos chamamos de estrutura dos cromossomas.

Os cromossomas contem “genes” que representam a parte estrutural da solução que se busca. No caso deste trabalho, buscamos a relação de ligação dos terminais de componentes (pinos) com os nós do circuito candidato, portanto, cada gene representa um pino ou terminal de componente e o conteúdo do gene receberá o valor de um dos possíveis nós disponíveis do circuito.

A Figura 2 mostra um exemplo da representação estrutural de um cromossoma contendo três resistores e um transistor, cada terminal corresponde a um gene que poderá conter um valor de nó.

O cromossoma da figura é representado em um vetor cuja forma geral é [Gene1 ... Gene 9], que permite fácil tratamento computacional.

Os cromossomas A e B mostram as ligações dos nós em duas representações possíveis do circuito.

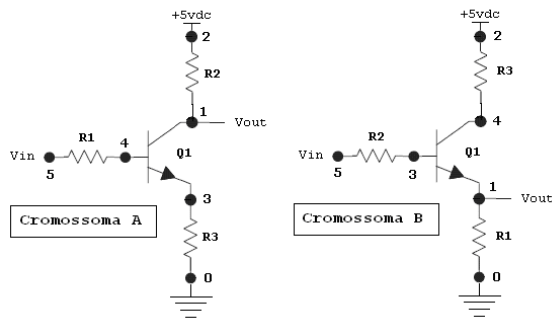
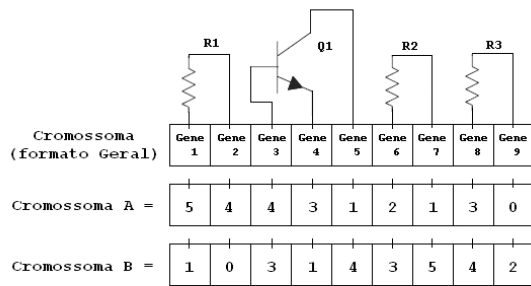


Figura 2. Representação cromossomial e os respectivos circuitos.

O cromossoma tem a forma de um vetor $[1 \times T]$ onde T seria o número de pinos a serem conectados na plataforma. Cada gene pode conter valores de nó variando de zero (“ground”) até um valor limite determinado pelo usuário. A Figura 3 mostra um circuito-exemplo e propõe uma distribuição de nós arbitrária.

A atribuição do número de nós tem consequências no desempenho da síntese de circuitos uma vez que uma quantidade grande de nós pode levar a muitos circuitos não-simuláveis (por excesso de componentes sem nenhuma conexão); por outro lado, uma quantidade pequena de nós pode restringir demais as opções de ligação dos componentes, dificultando a busca por uma solução viável.

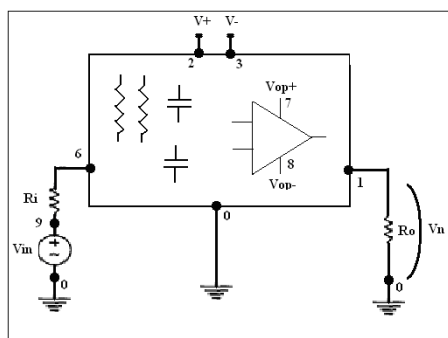


Figura 3. Circuito-exemplo

Para o circuito da Figura 3, teríamos os seguintes parâmetros:

- Quantidade de Pinos = 11 (2 resistores, 2 capacitores, 1 amplificador operacional)
- Quantidade arbitrada de nós: 6.

O cromossoma teria a forma final apresentada na Figura 4.

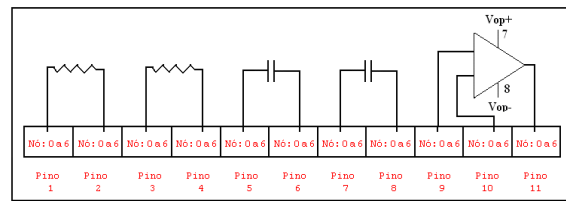


Figura 4. Circuito-exemplo

No curso do desenvolvimento foi verificada a incidência de 70% de circuitos não simuláveis. Outros pesquisadores também relatam incidências de circuitos não-simuláveis na faixa entre 50% e 80% na população inicial, levando-os a encontrar diferentes formas de minimizar ou evitar este problema, tais como a matriz de adjacência (Mesquita *et al*, 2002).

Para tentar minimizar estes problemas fizemos uma alteração no desenho básico do circuito a ser representado, fixando entrada e saída em nós pré-determinados que podem ser endereçados como nós válidos dentro dos genes do cromossoma.

Os nós de alimentação (tipicamente: V+ e V-) também têm seus valores fixados de maneira que caiam dentro do limite de possibilidades de conexão do cromossoma, neste caso os nós 2 e 3, assim qualquer componente do cromossoma pode ser ligado diretamente a fontes de referência interna de tensão.

Os nós de alimentação de componentes complexos como amplificadores operacionais devem ficar fora dos limites de nós do cromossoma, neste caso nós 7 e 8 (“n+1” e “n+2”, considerando que neste exemplo “n” é igual a 6). A princípio eles poderiam estar ligados a “V+” e “V-“, porém é mais indicado que estejam ligados de forma independente.

3.3 Função de avaliação dos indivíduos

A função de avaliação compara a curva de saída de um circuito simulado em Spice com uma curva pré-estabelecida (padrão) e fornece uma avaliação de aptidão conforme sua similaridade.

O objetivo é minimizar o erro médio em relação à curva de saída desejada. Quando o erro médio está próximo de zero significa que a aptidão será alta e, portanto, temos um bom candidato a solução final.

A avaliação da aptidão do indivíduo é calculada pela equação apresentada na equação 1. A evolução é realizada com o objetivo de maximizar a aptidão.

Os valores de aptidão estarão sempre entre 0 e 1, sendo 1 o mais apto dentro dos critérios de aptidão adotados na função de avaliação.

$$erro = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |v_{esperado}(i) - v_{obtido}(i)|$$

$$aptidão = \frac{1}{1 + erro} \quad (1)$$

Onde n é o número de pontos medidos.

4 Resultados

Diversos circuitos foram desenvolvidos na plataforma, sendo que, por questões de espaço, apenas dois deles foram selecionados para serem apresentados neste trabalho.

Os objetivos foram: determinar a funcionalidade da etapa de concepção da plataforma, verificar a técnica de implementação de circuitos eletrônicos através de algoritmos genéticos e, principalmente, verificar a adaptabilidade de circuitos.

No primeiro estudo de caso selecionado, o foco é a validação da plataforma. Foi verificada a estrutura da plataforma e validadas as formas de uso e chamada de seus respectivos componentes. Utilizou-se a síntese evolucionária de um filtro analógico passa-faixa.

A capacidade de adaptação sob a presença de falha é o foco do segundo estudo de caso selecionado que trata de um circuito analógico de controlador PID.

4.1 Circuito de Validação da Plataforma

Neste primeiro experimento usamos um filtro passa-faixa para o qual procuramos sintetizar uma topologia que fornecesse a resposta de um certo ganho de tensão de saída na faixa entre 3 KHz e 20 KHz.

A Figura 5 mostra o circuito do filtro passa-faixa usado para gerar a curva de resposta-padrão para o teste da plataforma.

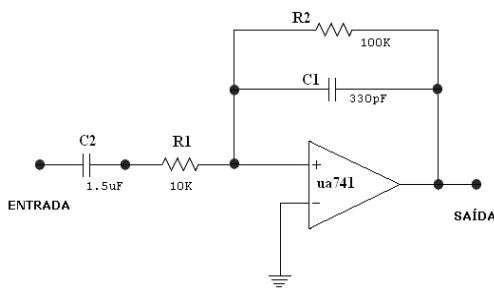


Figura 5. Circuito usado para gerar a curva-padrão usada nos testes iniciais da plataforma.

A Figura 6 mostra os componentes disponibilizados na estrutura cromossomial.

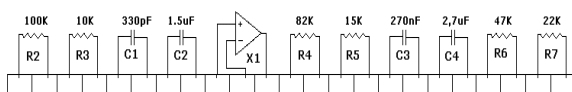


Figura 6. Estrutura cromossomial usada nos testes iniciais.

Com esta configuração, que incluía uma certa quantidade de componentes adicionais, o que aumen-

ta muito o espaço de busca, foi possível obter um circuito depois de apenas 50 gerações de 100 indivíduos.

A Figura 7 mostra um destes circuitos “evoluidos” que apresentou resposta similar (Figura 8), com uma topologia muito diferente da esperada (ver Figura 5), mas que, em determinadas situações não críticas de ganho e banda, poderia servir como circuito alternativo capaz de manter o sistema operando, mesmo com desempenho inferior ao original.

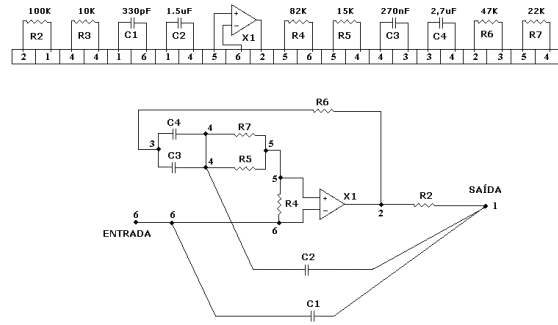


Figura 7. Circuito evoluído com respectivo cromossoma

A Figura 8 apresenta as curvas de saída esperada (padrão) e saída obtida com o circuito evoluído, de topologia não-convencional, apresentado na Figura 7.

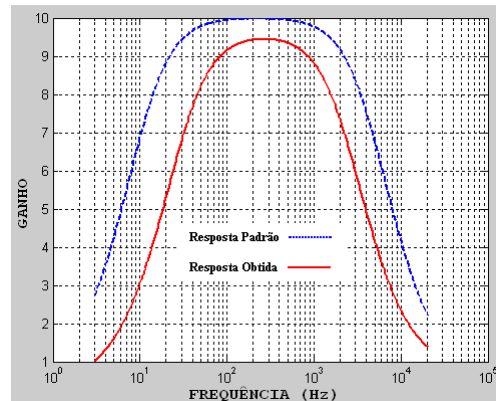


Figura 8. Respostas para os filtros passa-faixa

4.2 Adaptação a falha em circuito PID

O circuito da Figura 9 apresenta o diagrama de uma planta controlada por um PID.

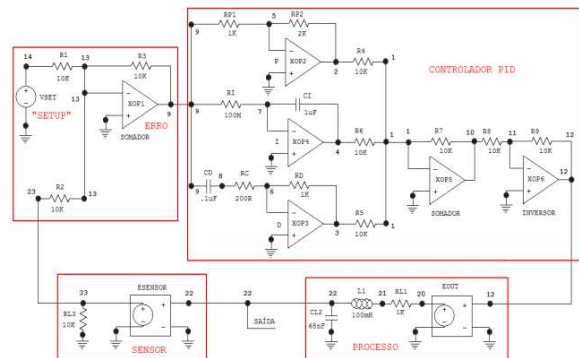


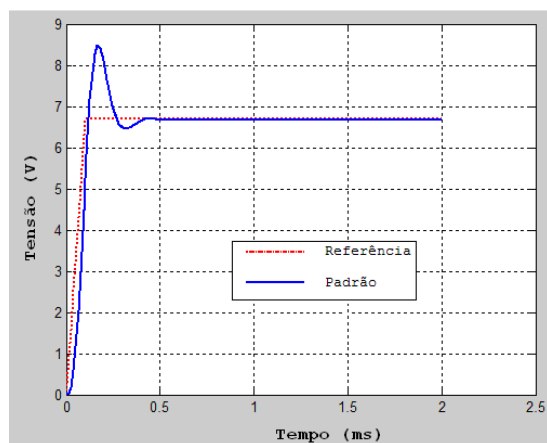
Figura 9. Circuito com controlador PID

Neste experimento será provocada uma falha na malha interna do PID de forma que a saída do processo (nó 22 - Saída) fique fora de especificação.

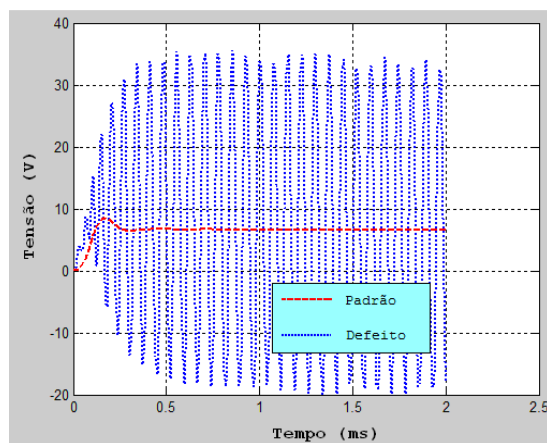
A plataforma será usada para adaptar o circuito e tentar corrigir a falha de maneira satisfatória.

O defeito foi introduzido no resistor da parte derivativa do controlador, resistor RD, que tem sua resistência nominal igual a 1 K Ω . O defeito corresponde a um aumento desta resistência para o valor de 50 K Ω .

A resposta esperada a uma variação na carga pode ser vista na Figura 10(a). Ao ocorrer a falha, o circuito passa a se comportar de forma totalmente descontrolada (Figura 10 (b)). Ambos gráficos foram obtidos pela simulação no Spice.



(a)



(b)

Figura 10. (a) Resposta normal com resistor RD de 1K (resistor da parte Derivativa do PID) e (b) Resposta alterada com a variação do mesmo resistor para 50K.

Neste experimento, componentes extras estariam disponíveis para serem conectados a quaisquer pontos do PID, como mostrado na Figura 11. Os nós de 0 a 9 podem ser atribuídos a qualquer um dos 10 pinos de componentes.

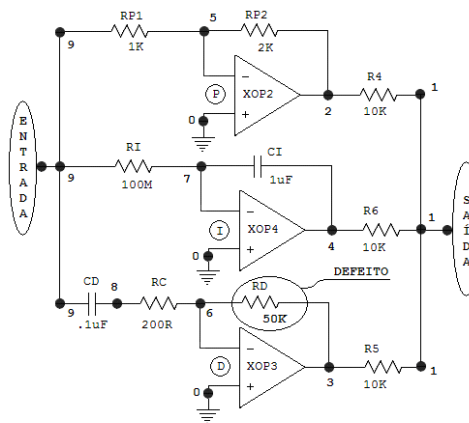


Figura 11. Circuito do controlador PID com o resistor RD com defeito (resistência alterada para 50K Ω)

A Figura 12 mostra os componentes adicionais em sua forma de cromossoma. Cada terminal de componente pode ser ligado a quaisquer nós disponíveis do circuito da Figura 11 (nó 0 (zero) até nó 9).

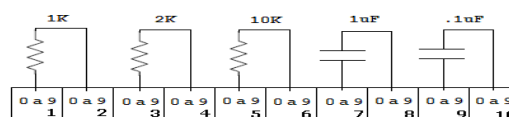


Figura 12. Componentes disponibilizados para correção do PID e detalhes da estrutura do cromossoma.

O resultado da evolução do circuito foi conseguido na trigésima geração. Vale observar que uma resposta bem mais próxima da ideal poderia ser conseguida, uma vez que havia no cromossoma um resistor de 1 K Ω que se fosse aplicado em paralelo com o resistor defeituoso de 50 K Ω conseguiria aproximar-se do valor original de 1 K Ω . Ainda que esta possibilidade exista, cabe ressaltar que o número de gerações teria que ser aumentado, o que comprometeria o tempo de simulação, retardando a reparação do circuito. O tempo de simulação se torna crítico em uma situação real de campo, onde o reparo (adaptação) deve ser o mais rápido possível e com uma solução adequada.

A Tabela 1 mostra os parâmetros de execução do algoritmo genético.

Número de Gerações	30
Número de Indivíduos	30
Taxa de Crossover	0,8
Taxa de Mutação	0,2

Tabela 1. Parâmetros de execução do algoritmo genético

O circuito reparado pelo algoritmo genético pode ser visto na Figura 13. A topologia da solução demonstra o caráter abrangente proporcionado pela técnica de algoritmos genéticos, permitindo a exploração de soluções incomuns com aplicação prática.

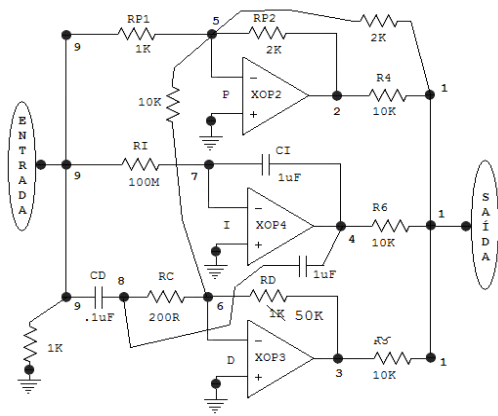


Figura 13. Componentes disponibilizados para correção

A resposta do circuito reparado (Figura 14) pode ser considerada satisfatória quando comparada a resposta esperada e ao estado catastrófico em que o circuito se encontrava quando em situação de falha.

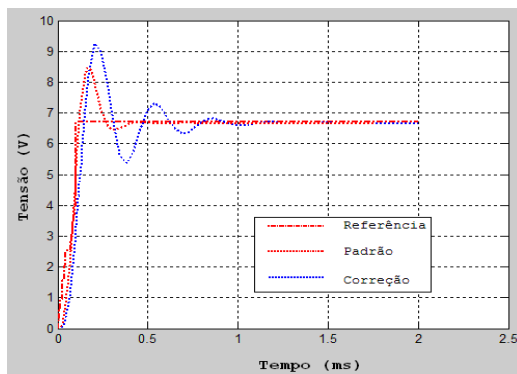


Figura 14. Respostas do controlador PID.

5 Conclusão

Este trabalho apresentou uma plataforma de desenvolvimento para evolução de circuitos analógicos adaptativos cujo objetivo é favorecer o estudo de algoritmos genéticos e circuitos eletrônicos evolucionários (síntese e adaptabilidade).

Com esta plataforma é possível estudar alternativas de circuitos e subsistemas e testá-los em software (através de uma interface do MATLAB com o Spice) de maneira prática e estruturada. Foi dada ênfase à modularidade e capacidade de expansão. Verificou-se a utilização da plataforma no desenvolvimento de soluções e na síntese de circuitos segundo especificações de entrada e saída. Foram testados circuitos com defeitos incapacitantes e a plataforma foi capaz de adaptar soluções que restabeleceram a operação dos circuitos.

A plataforma implementada neste trabalho é constituída de elementos (ou módulos) que permitem fácil integração (por meio de troca de arquivos) e até substituição integral por outras soluções.

Como trabalhos futuros temos diversas possibilidades, tais como: novos estudos de caso, desenvolvimento de programas especiais para contemplar as funcionalidades do Algoritmo Genético e desta for-

ma ampliar as estratégias de adaptação; o desenvolvimento de hardware configurável, do tipo FPAA (*Field Programmable Analog Arrays*) com programação *"In Circuit"*, e a implementação, em microprocessador, do algoritmo evolutivo e da interface responsável pela configuração dos circuitos. Neste ponto, teríamos um sistema adaptativo autônomo que poderia ser embutido em diversos outros sistemas.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) pelo auxílio financeiro recebido e às equipes do Laboratório de Redes Industriais e Sistemas de Automação – LARISA-UERJ e do Laboratório de Sistemas Evolucionários – LSE-UERJ por todo apoio recebido.

Referências Bibliográficas

- Greenwood, G. W., Tyrrel, A. M. (2007) *Introduction to Evolvable Hardware: A Practical Guide for Designing Self-Adaptive Systems*. John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, USA.
- Houck, C. R., Joines, A. J., Kay, M. G. (1996) *A Genetic Algorithm for Function Optimization: A Matlab Implementation*. Tech Report, NCSU-IE.
- Keymeulen, D. (2010) *Self-Repairing and Tuning Reconfigurable Electronics for Space*. IEEE 13th International Symposium on Design and Diagnostics of Electronic Circuits and Systems (DDECS), Vienna, pp. 1.
- Lovay, M., Arregui, A., Gonella, J., Peretti, G., Lubaszewski, M. (2010) *Fault Tolerant Amplifier Systems Using Evolvable Hardware*. Proceedings of the Argentine School of Micro-Nanoelectronics, Technology and Applications (EAMTA), Montevideo, pp. 50 – 55.
- Mesquita, A., Salazar, F.A., Canazio, P.P. (2002) *Chromosome representation through Adjacency Matrix in Evolutionary Circuits Synthesis*. Proc. 2002 NASA/DoD Conf. on Evolvable Hardware, Alexandria, Virginia, USA, pp. 102-109.
- Ribeiro, F. S. (2012) *Plataforma de Desenvolvimento de Circuitos Eletrônicos Adaptativos*. Dissertação de Mestrado, UERJ, Rio de Janeiro, RJ.
- Stoica, A., Andrei, R. (2007) *Adaptive and Evolvable Hardware – A Multifaceted Analysis*. NASA/ESA Conf. on Adaptive Hardware and Systems, Edinburgh, UK, pp. 486-498.
- Szász, Cs.; Chindris, V.; (2010). *Self-healing and Artificial Immune Properties Implementation upon FPGA-Based Embryonic Network*. IEEE International Conf. on Automation Quality and Testing Robotics (AQTR), Cluj-Napoca, Romania, Vol. 2, p. 1 – 6.
- Zebulum, R., Pacheco, M. A., Vellasco, M. (2001) *Evolutionary Electronics: Automatic Design of Electronic Circuits and Systems by Genetic Algorithms*. CRC Press, Boca Raton, FL, USA.