

## Diagnóstico de Falhas em Circuitos Analógicos Usando Otimização por Enxame de Partículas

Jalber D. L. Galindo \* Nadia Nedjah \* Luiza de M. Mourelle \*\*

\* *Departamento de Engenharia Eletrônica e Telecomunicações,  
Universidade do Estado do Rio de Janeiro, RJ (e-mail:  
galindo.jalber@posgraduacao.uerj.br, nadia@eng.uerj.br).*

\*\* *Departamento de Engenharia de Sistemas e Computação,  
Universidade do Estado do Rio de Janeiro, RJ, (e-mail:  
ldmm@eng.uerj.br)*

---

**Abstract:** Open-circuit or short-circuit faults, as well as faults in discrete parameters are the most used models in the simulation method before testing. As the response of an analog circuit to an input signal is continuous, failures in any specific circuit element may not characterize all possible component failures. There are three important features in diagnosing analog circuit faults: faulty component identification, faulty element value determination, and circuit tolerance restrictions. To solve this problem, a fault diagnosis method is proposed in this work using a Particle Swarm Optimization (PSO), where the nonlinear equations of the circuit under test are used to calculate the circuit parameters. The objective is to identify which circuit component has the potential to present the failure by comparing the responses obtained in the real circuit and the response obtained by the optimization process. The Tow-Thomas Biquad Filter was used to evaluate the proposed implementation. The proposed methodology was able to identify the defective components in 5 out of 8 cases with 100% accuracy. However, for the remaining 3 cases, a lower accuracy rate of 75% was possible.

**Resumo:** Falhas de circuito aberto ou curto-circuito, bem como em parâmetros discretos são os modelos mais utilizados no método de simulação antes do teste. Como a resposta de um circuito analógico a um sinal de entrada é contínua, falhas em qualquer elemento específico do circuito podem não caracterizar todas as possíveis falhas de componentes. Existem três recursos importantes no diagnóstico de falhas em circuitos analógicos: identificação de componentes defeituosos, determinação de valores de elementos defeituosos e restrições de tolerância do circuito. Para resolver este problema, um método de diagnóstico de falhas é proposto neste trabalho usando uma Otimização por Enxame de Partículas (PSO), onde as equações não lineares do circuito em teste são usadas para calcular seus parâmetros. O objetivo é identificar qual componente do circuito tem potencial para apresentar a falha comparando as respostas obtidas no circuito real e a resposta obtida pelo processo de otimização. O Filtro Biquad de Tow-Thomas foi utilizado para comprovar a implementação proposta. A metodologia proposta foi capaz de identificar os componentes defeituosos em 5 dos 8 casos com acurácia de 100%. No entanto, para os 3 casos restantes, foi possível uma taxa de precisão menor de 75%.

*Keywords:* Fault Diagnosis, Analog Circuit, Algorithm, PSO, Optimization.

*Palavras-chaves:* Diagnóstico de Falhas, Circuito Analógico, Algoritmo, PSO, Otimização.

---

### 1. INTRODUÇÃO

Os equipamentos que abrangem os circuitos eletrônicos são categorizados em analógicos e digitais. De acordo com uma estatística, quase 80% dos circuitos eletrônicos nos equipamentos são digitais, mas cerca de 80% das falhas ocorrem principalmente nas partes analógicas [Binu and Kariyappa (2017)]. O diagnóstico de falhas em circuitos analógico tem maior dificuldade devido a suas características básicas, como não linearidade e tolerância nos componentes, modelos de falha ineficientes, nós acessíveis inadequados e incerteza nas medições. O objetivo deste trabalho é desenvolver uma metodologia capaz de diagnosticar falhas em circuitos analógicos.

O desenvolvimento de estratégias para diagnosticar falhas em circuitos analógicos é uma tarefa desafiadora que tem encorajado uma boa quantidade de pesquisa, devido ao aumento do número de aplicações destes circuitos e ao alto custo dos testes. Áreas como telecomunicações e biomédicas precisam de bom desempenho em aplicações de alta frequência, baixo ruído e baixa potência, que somente pode ser alcançado usando circuitos integrados analógicos. No passado, um circuito integrado era apenas um componente em um sistema, mas hoje o circuito integrado em si é o sistema inteiro (SoC - *System on Chip*). Esse nível de integração gerou problemas difíceis de teste e projeto. A falta de bons modelos de falhas, falta de um padrão de projeto com vistas à testabilidade e o

aumento das falhas relacionadas ao tempo são fatores que aumentam a dificuldade no diagnóstico [Claasen (2003)]. A detecção de falhas é um processo iterativo e que consome tempo, pois a estratégia para diagnóstico de falhas é dependente da perícia e da experiência que os engenheiros têm sobre o circuito. Nas últimas décadas, uma boa quantidade de pesquisas em diagnósticos de falha foi concentrada em desenvolver ferramentas que facilitassem as tarefas [Binu and Kariyappa (2017)]. Embora tenha havido progressos importantes, essas novas tecnologias não tem sido largamente aceitas.

Na Seção 2 são apresentados trabalhos sobre diagnósticos de falhas em circuitos analógicos. Na Seção 3 são apresentados conceitos de Função Transferência e Análise de Circuitos que serão utilizados para a transformação do problemas de falhas em circuitos analógicos em problemas de otimização. Na Seção 4 são apresentados o algoritmo utilizado, a função objetivo e as restrições do problema proposto. Na Seção 5 é apresentado o circuito utilizado para comprovação da eficácia da solução proposta. Na Seção 6 é apresentado a aplicação dos testes com o circuito escolhido. Na Seção 7 são apresentados os resultados obtidos através das simulações obtidas em *software*, onde serão analisadas na Seção 8.

## 2. TRABALHOS RELACIONADOS

A abordagem de inteligência também é chamada de diagnóstico de falhas baseado em dados. É baseada em técnicas de transformação, otimização, aprendizado de máquina, híbridas e regras [Binu and Kariyappa (2017)]. Em [Zhou and Shi (2009)], é proposto um método de diagnóstico de falha simples para circuito analógico com tolerância baseado em *Particle Swarm Optimization* (PSO). O desvio do parâmetro dos elementos do circuito é definido como o elemento da partícula. As equações incrementais de voltagem do nó, baseadas na análise de sensibilidade, são construídas como restrições de uma equação de programação linear (*Linear Programming* - LP). Em [Yang (2020)], a identificação de parâmetros com falha é vital para a previsão da vida útil restante do circuito em teste. Com base na função de transferência, utiliza-se a resposta com falha medida para deduzir inversamente os possíveis parâmetros com falha. O Algoritmo Genético reduz a faixa de parâmetros com falhas dentro da qual todas as falhas podem gerar a mesma resposta medida. Com base nos parâmetros dos componentes e na função de transferência, cada indivíduo tem uma resposta simulada.

## 3. DIAGNÓSTICO VIA OTIMIZAÇÃO

O diagnóstico de falhas em circuitos analógicos pode ser transformado em problema de otimização [Yang (2020)]. As equações não lineares do circuito em teste podem ser utilizadas no cálculo dos parâmetros dos componentes do circuito. A identificação de falhas é dada pela comparação entre os parâmetros dos componentes estimados e os valores normais.

A função transferência é definida como a razão entre a transformada de Laplace da saída e da entrada [Hayt et al. (2008)] de um dado sistema quando as condições iniciais são nulas. Em análise de circuitos eletrônicos analógicos

de entrada e saída única, pode ser empregada pela relação entre as tensões de um sinal de saída com o sinal aplicado na entrada do circuito, conforme Equação 1:

$$H(s) = \frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)}, \quad (1)$$

onde  $V_{out}(s)$  é a função que define o nó de saída em análise do circuito e  $V_{in}(s)$  é a função de entrada, ambas no domínio de Laplace.

A análise de circuito estuda o comportamento da passagem de corrente por um circuito elétrico, possibilitando verificar a influência de cada componente eletrônico sobre a resposta do circuito a um sinal de entrada. A função transferência de um circuito é descrita em função do nó ao qual o circuito está sendo analisado [Yang (2020)], conforme a Equação 2:

$$h^{(t)}(s, p) = \frac{\dot{U}_{out}}{\dot{U}_{in}}, \quad (2)$$

onde  $t$  representa o nó acessível do circuito,  $p$  representa os parâmetros do circuito,  $\dot{U}_{out}$  é a função que define o nó de saída em análise do circuito e  $\dot{U}_{in}$  é a função de entrada, ambas no domínio de Laplace. A função transferência da Equação 2 também pode ser representada pela Equação 3:

$$h^{(t)}(s, p) = \frac{a_n(p)s^n + a_{n-1}(p)s^{n-1} + \dots + a_0(p)}{b_m(p)s^m + b_{m-1}(p)s^{m-1} + \dots + b_0(p)}, \quad (3)$$

onde  $p = [p_1; p_2; \dots; p_K]^T$  corresponde a admitância dos componentes ( $K$  é o número de componentes do circuito) e  $m \geq n$ . No domínio da frequência, onde faz-se  $s = j\omega$ , observa-se que a resposta em frequência do circuito é expressa na forma complexa, conforme Equação 4:

$$h^{(t)} = h_{Re}^{(t)} + jh_{Im}^{(t)}, \quad (4)$$

onde  $h_{Re}^{(t)}$  e  $h_{Im}^{(t)}$  representam, respectivamente, as partes real e imaginária de  $h^{(t)}$ . Portanto, sendo  $t$  o número de nós do circuito a ser analisado, a resposta em frequência é dada pelo conjunto de dados, conforme Equação 5:

$$h(p) = [h_{Re}^{(1)}(p), h_{Im}^{(1)}(p), \dots, h_{Re}^{(t)}(p), h_{Im}^{(t)}(p)], \quad (5)$$

onde o vetor de  $h(p)$  refere-se as funções transferências de cada nó do circuito, onde cada nó possui uma componente real e uma componente imaginária. De forma análoga, a resposta ao circuito em análise medida também é expressa por componentes real e imaginária, conforme Equação 6:

$$M = [\dot{U}_{Re}^{(1)}, \dot{U}_{Im}^{(1)}, \dot{U}_{Re}^{(2)}, \dot{U}_{Im}^{(2)}, \dots, \dot{U}_{Re}^{(t)}, \dot{U}_{Im}^{(t)}], \quad (6)$$

onde  $M$  são os dados obtidos a partir de medições no circuito. Os dados  $h(p)$  e  $M$  têm a mesma dimensão e igualmente separáveis.

Em análise de circuitos utilizando equação transferência, é comum se analisar a resposta ao impulso do circuito, uma vez que no domínio de Laplace a tensão de entrada tem valor unitário [Hayt et al. (2008)]. Sendo  $\dot{U}_{in} = 1$ , a Equação 2 passa a ser definida por  $H(s, p) = \dot{U}_{out}(s, p)$ .

## 4. OTIMIZAÇÃO

Nesta seção é apresentado o algoritmo utilizado para otimização, a função objetivo do problema e as restrições que o sistema impõe. O PSO foi escolhido como técnica neste projeto pois é de fácil implementação e sem grande custo computacional, uma vez que só utiliza operações matemáticas e estruturas primitivas de implementação.

#### 4.1 Algoritmo PSO

O PSO é inspirado no voo dos pássaros e permite a otimização global de uma função objetivo [Kennedy and Eberhart (1995)]. O PSO é formado por um conjunto de partículas, sendo cada uma delas solução potencial do problema, possuindo coordenadas de posição em um espaço de busca multidimensional. As partículas fluem através do espaço de busca onde as suas posições são ajustadas de acordo com a sua própria experiência e das partículas vizinhas. O Algoritmo 1 implementado foi baseado na técnica do *Global Best PSO*. Para o problema proposto, a variação de qualquer componente do circuito influencia no circuito como um todo.

#### Algorithm 1 PSO

---

Crie e inicialize um enxame com  $n$  partículas  
**repita**  
  **para**  $i := 1 \rightarrow n$  **faça**  
    Calcule o *fitness* da partícula $_i$  da Equação 4  
    **se**  $fitness_i \leq Pbest_i$  **então**  
      Atualize *Pbest* com nova posição  
    **fim se**  
    **se**  $Pbest_i \leq Gbest$  **então**  
      Atualize *Gbest* com nova posição  
    **fim se**  
    Atualize a posição e a velocidade da partícula  
  **fim para**  
**até** Condição de parada  
**retorna** Melhor resultado

---

A posição de cada partícula do enxame é calculada através de  $x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1)$ , onde o termo  $x_i(t+1)$  significa a próxima posição da partícula, o  $x_i(t)$  significa a posição atual e  $v_i(t+1)$  representa a velocidade.

A velocidade de deslocamento é dividida em três termos: inercial, cognitivo e social. O termo inercial representa a memória do movimento prévio da partícula e impede que ocorra mudanças drásticas de direção. A componente cognitiva modela a memória individual da partícula e a tendência de retornar a situações e lugares que melhor os satisfizeram no passado. E, por fim, a componente social quantifica o desempenho de uma partícula em relação a um grupo de partículas. O modelo de cálculo da velocidade de cada partícula é dada pela Equação 7:

$$v_{ij}(t+1) = \varphi_0 v_{ij}(t) + \varphi_1 r_{1j} (y_{ij} - x_{ij}(t)) + \varphi_2 r_{2j} (g_j - x_{ij}(t)), \quad (7)$$

onde  $\varphi_0$  refere-se ao coeficiente de inércia,  $r_{1j}$  e  $r_{2j}$  são valores aleatórios no intervalo entre zero e 1,  $\varphi_1$  e  $\varphi_2$  referem-se as componentes cognitiva e social, respectivamente,  $y_{ij}$  é a melhor posição visitada pela partícula  $i$  na dimensão  $j$  no passado e  $g_j$  é a melhor posição na dimensão  $j$  atingida no passado, dentre todas as partículas, que representa o melhor global definido como *Gbest*.

#### 4.2 Função objetivo

O modelo de cálculo da função objetivo é dado pela Equação 8. Tratando-se de um problema de otimização, o objetivo desta é encontrar valores de  $p$  tal que a diferença absoluta entre  $\dot{U}_{out}(p)$  e  $M$  seja mínimo, ou seja:

$$\min_p E = \|\dot{U}_{out}(p) - M\|, \quad (8)$$

onde  $\dot{U}_{out}(p)$  é a componente da função objetivo que é calculado pelo algoritmo proposto, e  $M$  é a componente obtida através do software de análise de circuito.

#### 4.3 Restrições

O método proposto é a implementação do PSO a fim de otimizar os valores de  $p$  (para  $p \geq 0$ ) de modo a satisfazer a função objetivo. Nesta metodologia, a busca pela falha no componente será verificada através do valor obtido da otimização ( $p$ ) comparando com a faixa de operação informada pelo fabricante do componente. Para este experimento, foi utilizada a faixa de operação de  $\pm 5\%$  do valor nominal, conforme Equação 9:

$$f_i = \begin{cases} 0, & 0,95 * p_i \leq p_i^* \leq 1,05 * p_i \\ 1, & p_i^* < 0,95 * p_i \text{ ou } p_i^* > 1,05 * p_i, \end{cases} \quad (9)$$

onde  $f_i$  identifica se o componente  $i$  apresenta falha ( $f_i = 1$ ) ou se não está defeituoso ( $f_i = 0$ ) e  $p_i$  refere-se ao valor ideal do componente analisado.

### 5. CIRCUITO BIQUAD DE TOW-THOMAS

A Figura 1 mostra o circuito usado neste estudo de caso. O *Biquad de Tow-Thomas* é um filtro ativo de segunda ordem baseado na topologia de dois integradores [Yu et al. (2002)]. Os parâmetros do circuito consiste dos valores atribuídos aos componentes do circuito em teste. Neste filtro, a depender dos parâmetros, o circuito pode funcionar como um filtro passa-baixa, passa-faixa, passa-alta ou passa-tudo, em diferentes tipos de corte. O circuito é do tipo *RC* e Amplificadores Operacionais (*AmpOp*).

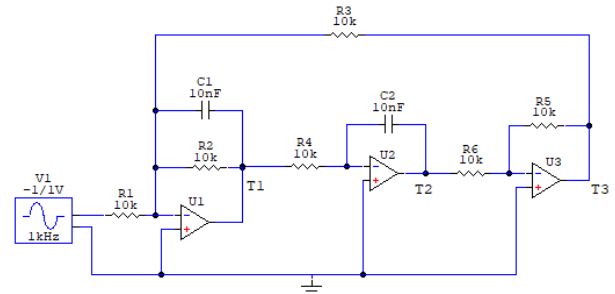


Figura 1. Filtro Biquad Tow-Thomas.

Pela configuração do circuito, é possível adotar três nós acessíveis, destacados na Figura 1 como  $T_1$ ,  $T_2$  e  $T_3$ , cujas funções transferências são:

$$h^{T_1}(jw) = \frac{-jw * R_2 * R_3 * R_4 * R_6 * C_2}{Den_{Re} + Den_{Im}}, \quad (10)$$

$$h^{T_2}(jw) = \frac{R_2 * R_3 * R_6}{Den_{Re} + Den_{Im}}, \quad (11)$$

$$h^{T_3}(jw) = \frac{R_2 * R_3 * R_5}{Den_{Re} + Den_{Im}}, \quad (12)$$

onde  $Den_{Re}$  e  $Den_{Im}$  são, respectivamente, as componentes real e imaginária do denominador das funções transferências, e são dadas pelas Equações 13 e 14:

$$Den_{Re} = R_1 * R_2 * (R_5 - R_3 * R_4 * R_6 * C_1 * C_2 * w^2), \quad (13)$$

$$Den_{Im} = jw * R_1 * R_3 * R_4 * R_6 * C_2. \quad (14)$$

## 6. ESTUDO DE CASO

Neste estudo de caso, foram utilizados os *softwares SapWin4<sup>TM</sup>* e *Circuit Maker<sup>TM</sup>*. O *SapWin4<sup>TM</sup>* é utilizado para obtenção da função transferência dos nós acessíveis do circuito, minimizando a possibilidade de erro para o cálculo manual das funções. As equações 10, 11 e 12 foram obtidas através deste *software*. Com o *Circuit Maker<sup>TM</sup>* foi possível realizar simulação do comportamento do circuito em teste de acordo com a alteração nos parâmetros dos componentes  $p_i = [R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6, C_1, C_2]^T$ , onde  $i$  representa o componente de  $p_i$ , sendo possível testá-lo sob diferentes circunstâncias.

Para o circuito da Figura 1, foram realizadas 9 casos diferentes, conforme a seguir:

- Caso 1** – Sem falhas: parâmetros ideais;
- Caso 2** – Falha em  $R_1$ :  $R_1$  com valor de 4, 32k $\Omega$ ;
- Caso 3** – Falha em  $R_2$ :  $R_2$  com valor de 6, 5k $\Omega$ ;
- Caso 4** – Falha em  $R_3$ :  $R_3$  com valor de 4, 3k $\Omega$ ;
- Caso 5** – Falha em  $R_4$ :  $R_4$  com valor de 5, 0k $\Omega$ ;
- Caso 6** – Falha em  $R_5$ :  $R_5$  com valor de 6, 0k $\Omega$ ;
- Caso 7** – Falha em  $R_6$ :  $R_6$  com valor de 4, 0k $\Omega$ ;
- Caso 8** – Falha em  $C_1$ :  $C_1$  com valor de 5nF;
- Caso 9** – Falha em  $C_2$ :  $C_2$  com valor de 4nF.

No Caso 1, foram utilizados os parâmetros ideais, conforme Figura 1. Nos demais casos, foram escolhidos valores aleatórios, desde que fora da faixa de operação ideal, conforme Equação 9.

O PSO foi implementado em *Python*, sem a utilização de bibliotecas específicas. As implementações realizadas tiveram parâmetros fixos a título de comparação dos resultados, conforme Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros do PSO.

Núm. de Dimensões	8	Comp. Cognitiva	1,49
Núm. de Iterações	2000	Comp. Social	1,49
Núm. de Partículas	50	Alvo	0,0
Comp. Inercial	0,5	Erro do Alvo	10 <sup>-17</sup>

A Componente Inercial sendo 0,5 é favorável para a convergência do algoritmo. As componentes Cognitivas e Social foram definidas pelo *Clerc's constriction factor* [Eberhart and Shi (2001)]. O espaço de busca da implementação é definido com o valor mínimo de zero e valor máximo sendo até 20% maior que o valor ideal do componente, conforme Equação 15:

$$p_{i, inicial} = 0, 0 \leq p_i \leq 1, 2 * p_{i, ideal}, \quad (15)$$

onde  $p_i$  corresponde ao componente do circuito em análise. Os componentes tiveram como valores ideais padronizados em 10k $\Omega$  para os Resistores e 10nF para os Capacitores. Nesta configuração, o circuito se comporta como um filtro passa-baixa. Na Tabela 2 são apresentados os valores de tensão medidos para cada caso definido nesse trabalho.

Tabela 2. Tensão medida nos nós  $T_1$ ,  $T_2$  e  $T_3$ .

	$T_1$ (V)	$T_2$ (V)	$T_3$ (V)
Caso 1	-0,283-j0,451	0,717-j0,451	0,717-j0,451
Caso 2	-0,655-j1,043	1,659-j1,043	1,659-j1,043
Caso 3	-0,314-j0,325	0,517-j0,499	0,517-j0,499
Caso 4	-0,068-j0,252	0,401-j0,108	0,401-j0,108
Caso 5	-0,088-j0,286	0,910-j0,286	0,910-j0,286
Caso 6	-0,523-j0,499	0,795-j0,832	0,477-j0,499
Caso 7	-0,059-j0,236	0,376-j0,095	0,941-j0,236
Caso 8	-0,283-j0,450	0,717-j0,450	0,717-j0,450
Caso 9	-0,059-j0,236	0,941-j0,236	0,941-j0,236

## 7. RESULTADOS DE DESEMPENHO

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos através da execução do método proposto. Como o circuito utilizado possui três nós acessíveis para aferição de tensão, componente utilizada como resultado ideal para otimização dos parâmetros do circuito, serão apresentados tabelas contendo dados com os nós individuais ( $T_1$ ,  $T_2$  e  $T_3$ ) e com nós combinados ( $T_1$  e  $T_2$ ,  $T_1$  e  $T_3$ ,  $T_2$  e  $T_3$ , e  $T_1$ ,  $T_2$  e  $T_3$ ).

Para cada caso descrito na Seção 6, foram realizadas 8 simulações ( $S_i$ ), onde  $i$  representa os componentes do circuito. Em cada  $S_i$ , foi utilizado um nó ou uma combinação de nós do circuito, restringindo a análise a um componente. Cada  $S_i$  executou 100 vezes a implementação, totalizando 50.400 execuções para os 9 casos.

### 7.1 Caso 1: Sem Falha

Conforme descrito na Seção 6, o Caso 1 tem os parâmetros dos componentes dentro da faixa de operação. A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos utilizando os nós  $T_1$ ,  $T_2$  e  $T_3$  individualmente. Observa-se que, utilizando o nó  $T_1$ , 34% das execuções apresentaram o resultado sem falha quando o componente  $C_1$  foi analisado ( $S_{C_1}$ ), enquanto que usando  $T_2$  e  $T_3$  tiveram 47% e 66% de resultados sem falha, respectivamente. Portanto, utilizando o nó  $T_3$  teve um melhor desempenho. Quando os demais componentes foram analisados, o desempenho foi superior a 75% usando o nó  $T_1$ , a 87% usando o nó  $T_2$  e a 82% usando o nó  $T_3$ .

Tabela 3. Resultados do Caso 1 referente aos nós individualmente ( $T_1/T_2/T_3$ ).

	$S_{R_1}$	$S_{R_2}$	$S_{R_3}$	$S_{R_4}$	$S_{R_5}$	$S_{R_6}$	$S_{C_1}$	$S_{C_2}$
SF	100/94/100	100/87/84	75/91/100	77/95/90	81/92/90	80/91/82	34/47/66	82/89/88
$R_1$	0/6/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0
$R_2$	0/0/0	0/13/16	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0
$R_3$	0/0/0	0/0/0	25/9/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0
$R_4$	0/0/0	0/0/0	0/0/0	23/5/10	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0
$R_5$	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	19/8/10	0/0/0	0/0/0	0/0/0
$R_6$	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	20/9/18	0/0/0	0/0/0
$C_1$	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	66/53/34	0/0/0
$C_2$	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	18/11/12

A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos da otimização com os nós combinados  $T_1$  e  $T_2$ ,  $T_1$  e  $T_3$ , e  $T_2$  e  $T_3$ . Observa-se que usando a combinação dos nós  $T_2$  e  $T_3$ , analisando o capacitor  $C_1$ , houve o mesmo desempenho da análise quando usado o nó  $T_3$  individualmente. Entretanto, quando analisado os demais componentes, houve um melhor desempenho no método com taxa de acertos acima de 92% para a combinação dos nós  $T_1$  e  $T_2$ , de 88% de acerto para a combinação dos nós  $T_1$  e  $T_3$ , e 93% para a combinação dos nós  $T_2$  e  $T_3$ .

Tabela 4. Resultados do Caso 1 referente aos nós combinados 2x2 ( $T_1$  e  $T_2/T_1$  e  $T_3/T_2$  e  $T_3$ ).

	$S_{R_1}$	$S_{R_2}$	$S_{R_3}$	$S_{R_4}$	$S_{R_5}$	$S_{R_6}$	$S_{C_1}$	$S_{C_2}$
SF	100/100/100	100/100/93	95/100/99	98/95/93	92/88/100	89/88/100	49/61/66	100/95/95
$R_1$	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0
$R_2$	0/0/0	0/0/7	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0
$R_3$	0/0/0	0/0/0	5/0/1	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0
$R_4$	0/0/0	0/0/0	0/0/0	2/5/7	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0
$R_5$	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	8/12/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0
$R_6$	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	11/12/0	0/0/0	0/0/0
$C_1$	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	51/39/34	0/0/0
$C_2$	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/5/5

Na Tabela 5, os resultados obtidos quanto à utilização dos três nós. Usando os três nós combinados, há um melhor desempenho do modelo, pois a taxa de acerto aumentou

Tabela 5. Resultados do Caso 1 referente aos três nós combinados.

	$S_{R_1}$	$S_{R_2}$	$S_{R_3}$	$S_{R_4}$	$S_{R_5}$	$S_{R_6}$	$S_{C_1}$	$S_{C_2}$
SF	99	98	100	99	100	99	71	94
R1	1	0	0	0	0	0	0	0
R2	0	2	0	0	0	0	0	0
R3	0	0	0	0	0	0	0	0
R4	0	0	0	1	0	0	0	0
R5	0	0	0	0	0	0	0	0
R6	0	0	0	0	0	1	0	0
C1	0	0	0	0	0	0	29	0
C2	0	0	0	0	0	0	0	6

de 66% para 71% quando o Capacitor  $C_1$  é analisado, e é superior a 94% nos demais.

No caso sem falhas, observa-se que quanto maior a quantidade de nós utilizados melhor o desempenho do método. Portanto, usando os nós  $T_1$ ,  $T_2$  e  $T_3$  combinados houve o melhor desempenho do método, conforme Tabela 5.

### 7.2 Caso 2: falha em $R_1$

Conforme descrito na Seção 6, o Caso 2 tem o valor de  $R_1$  igual a  $4,32k\Omega$  e demais componentes dentro da faixa de operação. Para o caso com falha, quando analisado um componente que não corresponde ao defeituoso, o método apresenta falhas em mais de um componente. Na Tabela 6, quaisquer que seja o nó usado individualmente, apenas o componente  $R_1$  apresenta falha isolada neste resistor. Nos demais componentes analisados, há mais de um componente com falha simultânea.

Tabela 6. Resultados do Caso 2 referente aos nós individualmente ( $T_1/T_2/T_3$ ).

	$S_{R_1}$	$S_{R_2}$	$S_{R_3}$	$S_{R_4}$	$S_{R_5}$	$S_{R_6}$	$S_{C_1}$	$S_{C_2}$
SF	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0
R1	100/100/100	73/90/93	89/87/84	82/91/91	84/90/93	83/82/94	84/92/91	83/93/95
R2	0/0/0	94/94/90	82/86/79	72/89/86	74/87/86	73/90/85	75/90/89	73/92/87
R3	0/0/0	61/82/70	83/86/82	73/87/72	74/84/80	76/80/74	74/87/73	73/85/84
R4	0/0/0	59/83/85	79/84/80	88/88/91	74/80/77	72/88/79	72/82/84	71/90/85
R5	0/0/0	73/89/88	87/92/75	80/92/87	95/91/94	80/94/87	81/92/83	82/93/88
R6	0/0/0	61/81/87	78/80/75	78/84/83	71/78/87	85/85/93	78/78/86	76/85/84
C1	0/0/0	68/86/86	79/84/75	74/90/83	79/82/86	76/85/88	89/89/93	73/86/87
C2	0/0/0	63/81/81	76/84/70	73/93/85	76/84/83	76/81/82	75/82/83	85/87/88

A Tabela 7 apresenta os resultados obtidos da otimização com os nós combinados  $T_1$  e  $T_2$ ,  $T_1$  e  $T_3$ , e  $T_2$  e  $T_3$ . Analogamente a análise usando os nós individualmente, pode-se observar que, quaisquer combinação dos nós 2x2, o Resistor  $R_1$  teve 100% de falha quando analisado.

Tabela 7. Resultados do Caso 2 referente aos nós combinados 2x2 ( $T_1$  e  $T_2/T_1$  e  $T_3/T_2$  e  $T_3$ ).

	$S_{R_1}$	$S_{R_2}$	$S_{R_3}$	$S_{R_4}$	$S_{R_5}$	$S_{R_6}$	$S_{C_1}$	$S_{C_2}$
SF	0/0/0	0/0/0	0/0/0	8/16/0	0/11/0	0/11/0	0/0/0	4/11/0
R1	100/100/100	75/79/77	80/68/78	78/77/75	72/83/81	72/84/82	77/86/78	85/82/84
R2	0/0/0	85/92/96	68/62/76	75/65/69	64/74/77	68/74/78	75/79/76	71/75/78
R3	0/0/0	69/72/63	87/92/88	75/64/61	65/70/68	61/71/69	68/75/61	79/68/68
R4	0/0/0	64/67/66	72/58/68	76/73/87	64/73/74	59/74/71	71/74/64	74/72/72
R5	0/0/0	75/72/69	78/63/71	74/71/73	99/71/96	69/81/79	78/83/73	82/78/80
R6	0/0/0	65/65/67	75/57/70	76/72/69	64/72/76	87/82/91	74/75/72	80/73/75
C1	0/0/0	70/72/71	80/62/72	79/71/73	66/71/78	67/76/76	88/91/92	83/68/78
C2	0/0/0	61/71/63	67/61/72	70/59/69	61/59/70	59/72/71	66/75/73	80/78/91

A Tabela 8 apresenta os resultados obtidos quanto à utilização dos três nós na otimização. Pode-se observar que, utilizando os três nós combinados, o Resistor  $R_1$  teve 100% de falha quando analisado.

Pelos resultados obtidos é possível observar que em quaisquer dos nós utilizados, individualmente ou suas combinações, obtivemos que 100% das execuções apresentaram a falha no componente  $R_1$  isolado.

Tabela 8. Resultados do Caso 2 referente aos três nós combinados.

	$S_{R_1}$	$S_{R_2}$	$S_{R_3}$	$S_{R_4}$	$S_{R_5}$	$S_{R_6}$	$S_{C_1}$	$S_{C_2}$
SF	0	0	0	7	0	1	0	3
R1	100	63	71	74	77	74	77	83
R2	0	97	68	68	72	68	69	75
R3	0	56	79	60	65	60	62	68
R4	0	58	61	81	63	63	65	70
R5	0	57	63	69	94	68	74	79
R6	0	54	58	63	70	93	67	77
C1	0	57	65	66	71	66	94	80
C2	0	54	64	62	67	61	64	80

### 7.3 Caso 3: Falha em $R_2$

Conforme descrito na Seção 6, o Caso 3 tem o valor de  $R_2$  igual a  $6,5k\Omega$  e demais componentes dentro da faixa de operação. Na Tabela 9, quaisquer que seja o nó usado individualmente, apenas o componente  $R_2$  que apresenta falha isolada neste resistor. Nos demais componentes analisados, há mais de um componente com falha simultânea.

Tabela 9. Resultados do Caso 3 referente aos nós individualmente ( $T_1/T_2/T_3$ ).

	$S_{R_1}$	$S_{R_2}$	$S_{R_3}$	$S_{R_4}$	$S_{R_5}$	$S_{R_6}$	$S_{C_1}$	$S_{C_2}$
SF	0/0/0	0/0/0	22/32/28	24/0/0	31/39/0	22/34/0	5/9/0	22/0/0
R1	98/97/100	0/0/0	60/31/37	61/10/14	47/33/10	53/33/15	47/34/37	59/8/11
R2	25/13/8	100/100/100	66/36/37	64/11/15	53/38/10	56/40/15	50/40/41	67/10/11
R3	22/12/7	0/0/0	69/62/70	58/10/9	48/33/10	49/36/13	42/34/32	60/9/9
R4	21/12/8	0/0/0	59/32/38	72/99/96	51/36/10	52/36/12	48/38/32	57/10/8
R5	25/13/9	0/0/0	63/33/37	62/10/14	66/58/100	56/40/15	52/36/39	65/10/11
R6	23/11/7	0/0/0	57/31/35	57/9/13	44/33/9	74/62/100	47/35/36	61/8/9
C1	24/12/9	0/0/0	58/33/36	60/11/14	52/37/8	52/39/15	92/87/93	62/10/10
C2	20/11/9	0/0/0	61/29/34	56/11/11	44/33/10	54/34/11	47/30/39	68/99/99

A Tabela 10 apresenta os resultados obtidos da otimização com os nós combinados  $T_1$  e  $T_2$ ,  $T_1$  e  $T_3$ , e  $T_2$  e  $T_3$ . Pode-se observar que, quaisquer combinação dos nós 2x2, o Resistor  $R_2$  teve 100% de falha quando analisado.

Tabela 10. Resultados do Caso 3 referente aos nós combinados 2x2 ( $T_1$  e  $T_2/T_1$  e  $T_3/T_2$  e  $T_3$ ).

	$S_{R_1}$	$S_{R_2}$	$S_{R_3}$	$S_{R_4}$	$S_{R_5}$	$S_{R_6}$	$S_{C_1}$	$S_{C_2}$
SF	0/0/0	0/0/0	53/16/34	0/0/0	45/0/20	39/0/8	12/5/6	0/0/0
R1	100/100/100	0/0/0	12/16/5	8/9/2	13/5/8	13/20/4	16/9/9	11/12/2
R2	5/1/2	100/100/100	13/16/7	9/8/2	14/7/8	14/21/4	18/9/9	11/12/2
R3	5/1/2	0/0/0	43/83/65	8/6/1	10/6/5	13/16/3	15/5/6	11/11/3
R4	3/1/2	0/0/0	11/15/7	98/99/100	11/6/8	10/18/4	13/6/6	8/8/2
R5	5/1/2	0/0/0	13/16/6	9/9/2	54/100/78	13/21/3	16/8/8	9/11/3
R6	4/1/2	0/0/0	11/15/7	8/7/2	13/5/7	60/98/90	17/7/8	11/10/3
C1	5/1/2	0/0/0	12/15/7	9/9/2	14/6/7	13/19/4	87/95/91	11/11/3
C2	4/1/2	0/0/0	9/15/6	4/7/2	10/6/6	12/17/4	16/8/8	99/99/100

Na Tabela 11, os resultados obtidos quanto à utilização dos três nós. Os Resistores  $R_1$  e  $R_2$  tiveram 100% de falha quando analisados. Portanto, o método aplicado indica que a falha está no Resistor  $R_1$  ou no Resistor  $R_2$ .

Tabela 11. Resultados do Caso 3 referente aos três nós combinados.

	$S_{R_1}$	$S_{R_2}$	$S_{R_3}$	$S_{R_4}$	$S_{R_5}$	$S_{R_6}$	$S_{C_1}$	$S_{C_2}$
SF	0	0	35	0	39	32	6	0
R1	100	0	1	3	6	9	5	1
R2	0	100	1	3	8	9	6	2
R3	0	0	64	3	6	8	5	2
R4	0	0	0	99	7	8	6	1
R5	0	0	1	3	59	9	4	2
R6	0	0	1	2	5	68	4	2
C1	0	0	1	3	7	10	94	2
C2	0	0	1	1	6	9	5	100

Apesar de o método não identificar o componente com falha quando combinados os três nós, o algoritmo foi capaz de identificar o componente defeituoso quando utilizando os nós individuais ou combinação de nós 2x2.

### 7.4 Caso 4: Falha em $R_3$

Conforme descrito na Seção 6, o Caso 4 tem o valor de  $R_3$  igual a  $4,3k\Omega$  e demais componentes dentro da faixa de operação.

de operação. Na Tabela 12, os resultados obtidos usando os nós individualmente. Para o nó  $T_1$ , os componentes  $R_3$ ,  $R_4$ ,  $R_6$  e  $C_2$  tiveram 100% de falha quando analisados. No nó  $T_2$ , os componentes  $R_3$  e  $R_6$  tiveram 100% de falha quando analisados. Usando o nó  $T_3$ , apenas o componente  $R_3$  apresenta falha isolada neste resistor.

Tabela 12. Resultados do Caso 4 referente aos nós individualmente ( $T_1/T_2/T_3$ ).

	$S_{R_1}$	$S_{R_2}$	$S_{R_3}$	$S_{R_4}$	$S_{R_5}$	$S_{R_6}$	$S_{C_1}$	$S_{C_2}$
SF	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0
R <sub>1</sub>	84/79/88	91/86/86	0/0/0	0/92/76	94/91/80	0/0/81	87/85/89	0/83/86
R <sub>2</sub>	93/95/90	92/90/90	0/0/0	0/96/89	90/94/94	0/0/91	85/90/92	0/94/88
R <sub>3</sub>	91/94/100	91/93/100	100/100/100	0/92/100	92/90/100	0/0/100	92/99/100	0/95/100
R <sub>4</sub>	85/89/93	87/90/90	0/0/0	100/89/91	92/94/92	0/0/92	89/89/93	0/88/90
R <sub>5</sub>	95/92/94	93/89/87	0/0/0	0/85/93	88/86/93	0/0/92	92/88/95	0/90/90
R <sub>6</sub>	88/92/86	94/95/90	0/0/0	0/96/90	91/98/88	100/100/87	90/94/88	0/94/88
C <sub>1</sub>	93/92/96	95/93/93	0/0/0	0/96/94	90/93/92	0/0/93	87/90/94	0/90/90
C <sub>2</sub>	86/82/90	89/91/93	0/0/0	0/92/94	91/88/89	0/0/92	87/92/91	100/89/96

A Tabela 13 apresenta os resultados obtidos da otimização com os nós combinados  $T_1$  e  $T_2$ ,  $T_1$  e  $T_3$ , e  $T_2$  e  $T_3$ . Observa-se que usando combinação dos nós  $T_1$  e  $T_2$ , os componentes  $R_3$  e  $R_6$  tiveram 100% de falha quando analisados. Usando as combinações dos nós  $T_1$  e  $T_3$ , e  $T_2$  e  $T_3$ , apenas o componente  $R_3$  e  $C_1$  teve 100% de falha quando analisado.

Tabela 13. Resultados do Caso 4 referente aos nós combinados 2x2 ( $T_1$  e  $T_2/T_1$  e  $T_3/T_2$  e  $T_3$ ).

	$S_{R_1}$	$S_{R_2}$	$S_{R_3}$	$S_{R_4}$	$S_{R_5}$	$S_{R_6}$	$S_{C_1}$	$S_{C_2}$
SF	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0
R <sub>1</sub>	87/86/87	87/87/82	0/0/0	84/83/88	88/92/82	0/80/84	17/85/85	81/85/80
R <sub>2</sub>	94/93/98	96/93/94	0/0/0	84/96/96	96/99/96	0/97/96	16/94/97	87/94/94
R <sub>3</sub>	90/99/100	90/96/100	100/100/100	84/100/100	91/97/100	0/95/100	18/98/100	84/100/100
R <sub>4</sub>	83/77/89	80/93/92	0/0/0	83/93/90	85/89/90	0/82/90	16/83/91	78/82/90
R <sub>5</sub>	90/95/97	87/94/99	0/0/0	83/98/96	88/99/96	0/99/99	15/99/99	86/99/99
R <sub>6</sub>	87/87/87	89/85/92	0/0/0	89/87/84	90/83/85	100/89/92	18/85/82	89/85/87
C <sub>1</sub>	92/98/96	93/94/97	0/0/0	91/94/98	94/93/93	0/97/92	99/96/93	90/96/89
C <sub>2</sub>	86/89/87	84/89/90	0/0/0	84/83/93	81/83/91	0/80/87	16/89/93	90/90/91

A Tabela 14 apresenta os resultados obtidos quanto à utilização dos três nós. Utilizando os três nós combinados, o Resistor  $R_3$  teve 100% de falha quando analisado.

Tabela 14. Resultados do Caso 4 referente aos três nós combinados.

	$S_{R_1}$	$S_{R_2}$	$S_{R_3}$	$S_{R_4}$	$S_{R_5}$	$S_{R_6}$	$S_{C_1}$	$S_{C_2}$
SF	0	0	0	0	0	0	0	0
R <sub>1</sub>	90	84	0	86	83	70	13	80
R <sub>2</sub>	93	95	0	88	93	77	13	92
R <sub>3</sub>	98	96	100	99	99	81	14	96
R <sub>4</sub>	89	84	0	79	83	70	10	85
R <sub>5</sub>	91	92	0	89	94	78	13	94
R <sub>6</sub>	88	90	0	88	91	92	10	92
C <sub>1</sub>	88	96	0	91	92	79	98	90
C <sub>2</sub>	81	90	0	80	85	76	13	84

Apesar de o método não identificar o componente específico com falha em todas as configurações, o algoritmo foi capaz de identificar o componente defeituoso ou reduzir a quantidade de componentes possíveis de ter falha.

### 7.5 Caso 5: Falha em R<sub>4</sub>

Conforme descrito na Seção 6, o Caso 5 tem o valor de  $R_4$  igual a  $5,0k\Omega$  e demais componentes dentro da faixa de operação. Na Tabela 15, os resultados obtidos utilizando os nós individualmente. Usando os nós  $T_1$  e  $T_3$ , os componentes  $R_4$ ,  $R_6$  e  $C_2$  tiveram 100% de falha quando analisados. No nó  $T_2$ , os componentes  $R_4$  e  $C_2$  tiveram 100% de falha quando analisados.

Na Tabela 16, os resultados obtidos com os nós combinados  $T_1$  e  $T_2$ ,  $T_1$  e  $T_3$ , e  $T_2$  e  $T_3$ . A combinação dos nós  $T_1$  e  $T_2$ , e  $T_2$  e  $T_3$ , os componentes  $R_4$  e  $C_2$  tiveram 100% de falha

Tabela 15. Resultados do Caso 5 referente aos nós individualmente ( $T_1/T_2/T_3$ ).

	$S_{R_1}$	$S_{R_2}$	$S_{R_3}$	$S_{R_4}$	$S_{R_5}$	$S_{R_6}$	$S_{C_1}$	$S_{C_2}$
SF	0/10/3	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0
R <sub>1</sub>	94/78/79	91/58/68	0/70/76	0/0/0	89/67/59	0/63/0	87/77/71	0/0/0
R <sub>2</sub>	89/75/85	84/95/92	0/73/76	0/0/0	90/67/63	0/71/0	84/86/78	0/0/0
R <sub>3</sub>	88/72/82	88/60/70	100/88/85	0/0/0	90/68/57	0/62/0	84/74/69	0/0/0
R <sub>4</sub>	87/68/84	90/56/69	0/69/75	100/100/100	91/68/63	0/61/0	82/82/79	0/0/0
R <sub>5</sub>	94/74/88	94/56/70	0/72/77	0/0/0	93/94/98	0/68/0	83/81/77	0/0/0
R <sub>6</sub>	89/74/90	89/57/68	0/70/70	0/0/0	94/67/62	100/91/100	86/80/75	0/0/0
C <sub>1</sub>	87/70/90	95/62/72	0/72/76	0/0/0	94/72/67	0/67/0	91/93/97	0/0/0
C <sub>2</sub>	92/75/87	89/54/75	0/72/73	0/0/0	94/63/63	0/66/0	83/81/74	100/100/100

quando analisados. Combinando  $T_1$  e  $T_3$ , os componentes  $R_4$ ,  $R_6$  e  $C_1$  tiveram 100% de falha quando analisados.

Tabela 16. Resultados do Caso 5 referente aos nós combinados 2x2 ( $T_1$  e  $T_2/T_1$  e  $T_3/T_2$  e  $T_3$ ).

	$S_{R_1}$	$S_{R_2}$	$S_{R_3}$	$S_{R_4}$	$S_{R_5}$	$S_{R_6}$	$S_{C_1}$	$S_{C_2}$
SF	2/1/30	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0
R <sub>1</sub>	88/90/61	74/91/26	70/62/36	0/0/0	72/65/34	77/0/45	65/62/38	0/0/0
R <sub>2</sub>	92/84/60	85/88/100	62/58/51	0/0/0	78/61/41	74/0/47	71/60/40	0/0/0
R <sub>3</sub>	79/88/54	77/80/32	87/93/91	0/0/0	73/56/39	74/0/43	71/64/39	0/0/0
R <sub>4</sub>	93/88/56	78/84/34	69/64/40	100/100/100	78/65/37	76/0/48	72/60/40	0/0/0
R <sub>5</sub>	84/93/59	82/89/27	71/66/41	0/0/0	90/94/93	73/0/42	70/67/39	0/0/0
R <sub>6</sub>	86/92/58	72/86/33	66/60/39	0/0/0	78/63/37	92/100/95	70/64/41	0/0/0
C <sub>1</sub>	89/90/61	79/88/31	71/65/41	0/0/0	80/63/35	77/0/45	95/95/98	0/0/0
C <sub>2</sub>	86/90/61	84/88/34	73/62/40	0/0/0	78/61/41	74/0/46	67/68/42	100/100/100

Na Tabela 17, os resultados obtidos quanto à utilização dos três nós na otimização. Observa-se que as análises dos componentes  $R_4$  e  $C_2$  obtiveram 100% de falha.

Tabela 17. Resultados do Caso 5 referente aos três nós combinados.

	$S_{R_1}$	$S_{R_2}$	$S_{R_3}$	$S_{R_4}$	$S_{R_5}$	$S_{R_6}$	$S_{C_1}$	$S_{C_2}$
SF	16	0	0	0	0	0	0	0
R <sub>1</sub>	77	39	47	0	38	0	47	0
R <sub>2</sub>	69	96	45	0	38	30	50	0
R <sub>3</sub>	59	47	99	0	33	29	46	0
R <sub>4</sub>	65	44	48	100	39	34	51	0
R <sub>5</sub>	64	48	43	0	96	31	48	0
R <sub>6</sub>	65	45	42	0	38	95	45	0
C <sub>1</sub>	72	45	44	0	39	30	95	0
C <sub>2</sub>	67	49	43	0	37	29	50	100

Apesar de o método proposto não identificar o componente específico com falha, o algoritmo foi capaz de reduzir de oito para dois componentes possíveis de ter falha .

### 7.6 Caso 6: Falha em R<sub>5</sub>

Conforme descrito na Seção 6, o Caso 6 tem o valor de  $R_5$  igual a  $6,0k\Omega$  e demais componentes dentro da faixa de operação. Na Tabela 18, quaisquer que seja o nó usado individualmente, apenas o componente  $R_5$  apresenta falha isolada neste resistor. Nas demais análises, há mais de um componente com falha simultânea.

Tabela 18. Resultados do Caso 6 referente aos nós individualmente ( $T_1/T_2/T_3$ ).

	$S_{R_1}$	$S_{R_2}$	$S_{R_3}$	$S_{R_4}$	$S_{R_5}$	$S_{R_6}$	$S_{C_1}$	$S_{C_2}$
SF	1/0/0	3/6/0	0/0/4	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/10	0/0/0
R <sub>1</sub>	89/97/99	43/59/15	22/15/61	17/37/31	0/0/0	15/30/32	34/32/66	23/30/37
R <sub>2</sub>	52/13/56	95/92/97	22/16/63	15/38/32	0/0/0	14/31/31	34/35/66	24/32/36
R <sub>3</sub>	55/12/48	43/57/13	97/97/90	13/38/31	0/0/0	13/25/26	33/28/65	21/26/36
R <sub>4</sub>	50/12/51	41/52/15	16/15/57	97/92/95	0/0/0	13/25/26	34/31/63	25/26/34
R <sub>5</sub>	59/13/55	46/62/15	22/17/62	17/41/34	100/100/100	15/31/31	35/36/71	24/31/36
R <sub>6</sub>	50/11/52	39/55/13	18/14/59	16/35/27	0/0/0	99/99/93	28/31/65	26/28/32
C <sub>1</sub>	52/12/52	44/55/13	21/16/59	16/39/31	0/0/0	13/31/31	95/98/86	25/29/33
C <sub>2</sub>	55/11/47	43/52/12	21/16/58	13/37/30	0/0/0	11/28/29	31/33/66	99/97/94

A Tabela 19 apresenta os resultados obtidos da otimização com os nós combinados  $T_1$  e  $T_2$ ,  $T_1$  e  $T_3$ , e  $T_2$  e  $T_3$ . Analogamente a análise usando os nós individualmente, pode-se observar que, quaisquer combinação dos nós 2x2, o Resistor  $R_5$  teve 100% de falha quando analisado.

A Tabela 20 apresenta os resultados obtidos quanto à utilização dos três nós na otimização. Pode-se observar

Tabela 19. Resultados do Caso 6 referente aos nós combinados 2x2 ( $T_1$  e  $T_2/T_1$  e  $T_3/T_2$  e  $T_3$ ).

	$S_{R_1}$	$S_{R_2}$	$S_{R_3}$	$S_{R_4}$	$S_{R_5}$	$S_{R_6}$	$S_{C_1}$	$S_{C_2}$
SF	0/10/55	10/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/2/0	0/0/0
R1	99/86/44	31/23/25	9/23/14	17/12/15	0/0/0	8/6/5	22/28/29	8/7/22
R2	21/27/36	89/99/100	8/21/16	16/11/15	0/0/0	8/6/5	22/26/29	8/7/22
R3	18/23/31	32/16/22	98/96/95	15/12/15	0/0/0	9/5/5	19/23/25	7/6/16
R4	17/24/27	28/20/17	6/22/14	95/99/97	0/0/0	8/6/5	18/25/28	6/7/18
R5	21/28/35	35/23/27	8/23/15	18/12/16	100/100/100	10/6/5	21/28/30	8/7/22
R6	18/20/32	29/22/21	9/19/14	14/10/14	0/0/0	99/100/100	21/26/24	7/7/17
C1	22/25/32	34/22/26	7/20/14	17/10/14	0/0/0	10/5/4	98/93/98	8/6/19
C2	20/26/28	28/18/22	6/21/15	16/12/13	0/0/0	9/6/5	16/25/25	98/99/96

que, utilizando os três nós combinados, o Resistor  $R_5$  teve 100% de falha quando analisado.

Tabela 20. Resultados do Caso 6 referente aos três nós combinados.

	$S_{R_1}$	$S_{R_2}$	$S_{R_3}$	$S_{R_4}$	$S_{R_5}$	$S_{R_6}$	$S_{C_1}$	$S_{C_2}$
SF	59	0	0	0	0	0	0	0
R1	38	20	10	11	0	6	19	5
R2	21	100	9	11	0	6	20	5
R3	17	17	99	10	0	5	16	4
R4	22	18	6	97	0	4	17	3
R5	23	21	10	11	100	5	20	5
R6	19	19	10	7	0	100	17	5
C1	22	19	10	11	0	6	100	5
C2	21	12	9	8	0	6	17	98

Pelos resultados obtidos é possível observar que em quaisquer dos nós utilizados, individualmente ou suas combinações, obtivemos que 100% das execuções apresentaram a falha no componente  $R_5$  isolado.

7.7 Caso 7: Falha em  $R_6$

Conforme descrito na Seção 6, o Caso 7 tem o valor de  $R_6$  igual a  $4,0k\Omega$  e demais componentes na faixa de operação. A Tabela 21 apresenta os resultados obtidos utilizando os nós individualmente. Para o nó  $T_1$ , os componentes  $R_3$ ,  $R_4$ ,  $R_6$  e  $C_2$  tiveram 100% de falha quando analisados. No nó  $T_2$ , os componentes  $R_3$  e  $R_6$  tiveram 100% de falha quando analisados. Usando o nó  $T_3$ , os componentes  $R_4$ ,  $R_6$  e  $C_2$  tiveram 100% de falha quando analisados.

Tabela 21. Resultados do Caso 7 referente aos nós individualmente ( $T_1/T_2/T_3$ ).

	$S_{R_1}$	$S_{R_2}$	$S_{R_3}$	$S_{R_4}$	$S_{R_5}$	$S_{R_6}$	$S_{C_1}$	$S_{C_2}$
SF	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0
R1	92/89/89	93/83/85	0/0/82	0/82/0	91/90/83	0/0/0	95/84/82	0/85/0
R2	86/97/94	89/98/86	0/0/89	0/92/0	89/91/90	0/0/0	92/95/95	0/95/0
R3	90/94/83	90/97/90	100/100/88	0/96/0	85/91/83	0/0/0	89/92/85	0/95/0
R4	81/90/92	91/90/90	0/0/87	100/87/100	89/87/86	0/0/0	90/87/89	0/90/0
R5	89/91/91	94/87/94	0/0/87	0/84/0	93/90/91	0/0/0	92/93/89	0/83/0
R6	87/98/89	88/93/90	0/0/87	0/94/0	86/95/92	100/100/100	87/97/80	0/94/0
C1	96/87/88	87/94/91	0/0/86	0/92/0	92/93/88	0/0/0	92/94/96	0/95/0
C2	91/88/91	93/86/94	0/0/91	0/87/0	90/85/93	0/0/0	94/88/93	100/87/100

Na Tabela 22, os resultados obtidos da otimização com os nós combinados  $T_1$  e  $T_2$ ,  $T_1$  e  $T_3$ , e  $T_2$  e  $T_3$ . Usando combinação dos nós  $T_1$  e  $T_2$ , os componentes  $R_3$  e  $R_6$  tiveram 100% de falha quando analisados. Na combinação dos nós  $T_1$  e  $T_3$ , os componentes  $R_4$ ,  $R_6$  e  $C_2$  tiveram 100% de falha quando analisados. Combinando os nós  $T_2$  e  $T_3$ , o Resistor  $R_6$  teve 100% de falha quando analisado.

Tabela 22. Resultados do Caso 7 referente aos nós combinados 2x2 ( $T_1$  e  $T_2/T_1$  e  $T_3/T_2$  e  $T_3$ ).

	$S_{R_1}$	$S_{R_2}$	$S_{R_3}$	$S_{R_4}$	$S_{R_5}$	$S_{R_6}$	$S_{C_1}$	$S_{C_2}$
SF	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0
R1	87/89/92	95/93/86	0/90/82	88/0/81	87/83/83	0/0/0	94/90/82	89/0/88
R2	88/91/94	90/91/92	0/87/88	89/0/94	92/98/92	0/0/0	90/82/89	92/0/88
R3	97/89/89	93/89/84	100/84/88	96/0/87	95/81/86	0/0/0	90/84/82	95/0/84
R4	81/91/86	83/87/90	0/90/88	85/100/91	79/87/91	0/0/0	83/90/92	89/0/84
R5	85/91/87	89/94/86	0/92/86	94/0/90	90/89/88	0/0/0	89/83/86	89/0/87
R6	95/87/99	95/94/100	0/91/97	95/0/100	96/90/99	100/100/100	97/83/99	93/0/100
C1	87/93/91	92/96/90	0/88/91	86/0/91	94/90/93	0/0/0	84/89/91	91/0/94
C2	90/88/88	80/91/94	0/91/88	87/0/94	80/93/88	0/0/0	85/92/88	85/100/92

A Tabela 23 apresenta os resultados obtidos quanto à utilização dos três nós na otimização. Pode-se observar que, utilizando os três nós combinados, o Resistor  $R_6$  teve 100% de falha quando analisado.

Tabela 23. Resultados do Caso 7 referente aos três nós combinados.

	$S_{R_1}$	$S_{R_2}$	$S_{R_3}$	$S_{R_4}$	$S_{R_5}$	$S_{R_6}$	$S_{C_1}$	$S_{C_2}$
SF	0	0	0	0	0	0	0	0
R1	83	87	81	88	86	0	85	89
R2	88	89	90	94	91	0	92	94
R3	83	88	91	82	87	0	82	82
R4	89	86	84	90	91	0	79	90
R5	85	90	89	87	91	0	79	90
R6	100	100	96	99	99	100	97	99
C1	94	97	92	92	94	0	94	89
C2	88	88	90	91	91	0	90	90

Apesar de o método proposto não identificar o componente específico com falha em todas as configurações, o algoritmo foi capaz de identificar o componente defeituoso ou reduzir a quantidade de componentes possíveis de ter falha.

7.8 Caso 8: Falha em  $C_1$

Conforme descrito na Seção 6, o Caso 8 tem o valor de  $C_1$  igual a  $5nF$  e demais componentes dentro da faixa de operação. Na Tabela 24, os resultados obtidos utilizando os nós individualmente. Usando o nó  $T_1$ , os componentes  $R_3$ ,  $R_4$ ,  $R_6$ ,  $C_1$  e  $C_2$  tiveram 100% de falha quando analisados. No nó  $T_2$ , os componentes  $R_3$ ,  $R_5$ ,  $R_6$  e  $C_1$  tiveram 100% de falha quando analisados. Para o nó  $T_3$ , os componentes  $R_3$  e  $C_1$  tiveram 100% de falha quando analisados.

Tabela 24. Resultados do Caso 8 referente aos nós individualmente ( $T_1/T_2/T_3$ ).

	$S_{R_1}$	$S_{R_2}$	$S_{R_3}$	$S_{R_4}$	$S_{R_5}$	$S_{R_6}$	$S_{C_1}$	$S_{C_2}$
SF	86/0/0	66/46/7	0/0/0	0/1/0	83/0/2	0/0/0	0/0/0	0/4/2
R1	12/100/100	9/9/34	0/0/0	0/8/36	16/0/34	0/0/34	0/0/0	0/8/28
R2	9/1/6	34/54/91	0/0/0	0/8/36	15/0/36	0/0/38	0/0/0	0/8/32
R3	10/1/6	7/10/37	100/100/100	0/6/35	14/0/36	0/0/33	0/0/0	0/7/32
R4	7/1/6	9/10/39	0/0/0	100/95/94	12/0/34	0/0/35	0/0/0	0/8/30
R5	9/1/7	9/10/40	0/0/0	0/7/37	17/100/94	0/0/36	0/0/0	0/8/30
R6	10/0/7	7/9/35	0/0/0	0/8/33	15/0/32	100/100/95	0/0/0	0/7/29
C1	11/1/6	9/10/39	0/0/0	0/8/35	15/0/33	0/0/38	100/100/100	0/7/29
C2	9/1/7	7/11/38	0/0/0	0/7/34	15/0/36	0/0/36	0/0/0	100/95/94

Na Tabela 25, os resultados obtidos da otimização com os nós combinados  $T_1$  e  $T_2$ ,  $T_1$  e  $T_3$ , e  $T_2$  e  $T_3$ . Usando combinação dos nós  $T_1$  e  $T_2$ , os componentes  $R_3$ ,  $R_5$ ,  $R_6$  e  $C_1$  tiveram 100% de falha quando analisados. Combinando os nós  $T_1$  e  $T_3$  e os nós  $T_2$  e  $T_3$ , os componentes  $R_1$ ,  $R_3$  e  $C_1$  tiveram 100% de falha quando analisados.

Tabela 25. Resultados do Caso 8 referente aos nós combinados 2x2 ( $T_1$  e  $T_2/T_1$  e  $T_3/T_2$  e  $T_3$ ).

	$S_{R_1}$	$S_{R_2}$	$S_{R_3}$	$S_{R_4}$	$S_{R_5}$	$S_{R_6}$	$S_{C_1}$	$S_{C_2}$
SF	6/0/0	92/72/51	0/0/0	40/6/9	0/4/13	0/3/3	0/0/0	41/5/14
R1	94/100/100	0/0/1	0/0/0	0/1/0	0/1/0	0/0/0	0/0/0	0/2/0
R2	0/0/0	8/28/49	0/0/0	0/1/0	0/1/0	0/0/0	0/0/0	0/2/0
R3	0/0/0	0/0/1	100/100/100	0/1/0	0/1/0	0/0/0	0/0/0	0/2/0
R4	0/0/0	0/0/1	0/0/0	60/94/91	0/1/0	0/0/0	0/0/0	0/3/0
R5	0/0/0	0/0/1	0/0/0	0/1/0	100/96/87	0/0/0	0/0/0	0/3/0
R6	0/0/0	0/0/1	0/0/0	0/1/0	0/1/0	100/97/97	0/0/0	0/3/0
C1	0/0/0	0/0/1	0/0/0	0/1/0	0/1/0	0/0/0	100/100/100	0/2/0
C2	0/0/0	0/0/1	0/0/0	0/1/0	0/1/0	0/0/0	0/0/0	59/95/86

A Tabela 26 apresenta os resultados obtidos quanto à utilização dos três nós. Observa-se que as análises dos componentes  $R_1$ ,  $R_3$ ,  $C_1$  e  $C_1$  obtiveram 100% de falha.

Apesar de o método proposto não identificar o componente específico com falha, o algoritmo foi capaz de reduzir de oito para três componentes possíveis de ter falha.

Tabela 26. Resultados do Caso 8 referente aos três nós combinados.

	$S_{R_1}$	$S_{R_2}$	$S_{R_3}$	$S_{R_4}$	$S_{R_5}$	$S_{R_6}$	$S_{C_1}$	$S_{C_2}$
SF	0	76	0	16	9	2	0	20
$R_1$	100	0	0	0	0	0	0	0
$R_2$	0	20	0	0	0	0	0	0
$R_3$	0	0	100	0	0	0	0	0
$R_4$	0	0	0	84	0	0	0	0
$R_5$	0	0	0	0	91	0	0	0
$R_6$	0	0	0	0	0	98	0	0
$C_1$	0	0	0	0	0	0	100	0
$C_2$	0	0	0	0	0	0	0	80

7.9 Caso 9: Falha em  $C_2$

Conforme descrito na Seção 6, o Caso 9 tem o valor de  $C_2$  igual a  $4nF$  e demais componentes dentro da faixa de operação. Na Tabela 27, os resultados obtidos utilizando os nós individualmente. Usando o nó  $T_1$ , os componentes  $R_4$ ,  $R_6$  e  $C_2$  tiveram 100% de falha quando analisados. No nó  $T_2$ , os componentes  $R_4$  e  $R_6$  tiveram 100% de falha quando analisados. Para o nó  $T_3$ , os componentes  $R_4$ ,  $R_6$  e  $C_2$  tiveram 100% de falha quando analisados.

Tabela 27. Resultados do Caso 9 referente aos nós individualmente ( $T_1/T_2/T_3$ ).

	$S_{R_1}$	$S_{R_2}$	$S_{R_3}$	$S_{R_4}$	$S_{R_5}$	$S_{R_6}$	$S_{C_1}$	$S_{C_2}$
SF	0/1/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0
$R_1$	94/83/89	94/87/85	0/88/82	0/0/0	94/84/83	0/89/0	88/86/82	0/0/0
$R_2$	84/86/94	90/91/86	0/86/89	0/0/0	92/89/90	0/91/0	87/88/95	0/0/0
$R_3$	90/92/83	89/91/90	100/89/88	0/0/0	85/86/83	0/87/0	90/87/85	0/0/0
$R_4$	88/87/92	90/91/90	0/89/87	100/100/100	90/95/86	0/89/0	87/90/89	0/0/0
$R_5$	88/88/91	92/86/94	0/92/87	0/0/0	94/93/91	0/87/0	98/87/89	0/0/0
$R_6$	88/87/89	97/86/90	0/88/87	0/0/0	82/90/92	100/91/100	92/86/80	0/0/0
$C_1$	90/93/88	94/88/91	0/88/86	0/0/0	92/89/88	0/90/0	90/95/96	0/0/0
$C_2$	93/89/91	91/82/94	0/87/91	0/0/0	90/87/93	0/90/0	92/87/93	100/100/100

A Tabela 28 apresenta os resultados obtidos da otimização com os nós combinados  $T_1$  e  $T_2$ ,  $T_1$  e  $T_3$ , e  $T_2$  e  $T_3$ . Observa-se que usando combinação dos nós  $T_1$  e  $T_2$ , os componentes  $R_4$  e  $C_2$  tiveram 100% de falha quando analisados. Usando a combinação dos nós  $T_1$  e  $T_3$ , os componentes  $R_4$ ,  $R_6$  e  $C_2$  tiveram 100% de falha quando analisados. Usando a combinação dos nós  $T_2$  e  $T_3$ , os componentes  $R_4$  e  $C_2$  tiveram 100% de falha quando analisados.

Tabela 28. Resultados do Caso 9 referente aos nós combinados 2x2 ( $T_1$  e  $T_2/T_1$  e  $T_3/T_2$  e  $T_3$ ).

	$S_{R_1}$	$S_{R_2}$	$S_{R_3}$	$S_{R_4}$	$S_{R_5}$	$S_{R_6}$	$S_{C_1}$	$S_{C_2}$
SF	0/0/2	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0
$R_1$	92/89/89	90/93/80	89/91/71	0/0/0	90/83/73	88/0/61	90/84/64	0/0/0
$R_2$	93/91/84	88/91/90	91/83/75	0/0/0	94/87/70	93/0/58	95/92/71	0/0/0
$R_3$	89/89/87	87/89/79	94/89/91	0/0/0	86/81/70	91/0/57	91/84/74	0/0/0
$R_4$	90/91/90	92/87/74	92/89/76	100/100/100	95/87/73	91/0/65	95/87/76	0/0/0
$R_5$	92/91/86	88/94/77	91/91/70	0/0/0	95/89/94	88/0/59	89/94/72	0/0/0
$R_6$	92/87/91	83/94/79	85/85/74	0/0/0	92/90/67	90/100/95	93/86/71	0/0/0
$C_1$	91/93/92	91/96/81	90/92/80	0/0/0	97/90/72	92/0/64	89/87/91	0/0/0
$C_2$	89/88/90	93/91/80	92/92/75	0/0/0	95/93/69	96/0/61	96/91/72	100/100/100

A Tabela 29 apresenta os resultados obtidos quanto à utilização dos três nós. Observa-se que as análises dos componentes  $R_4$  e  $C_2$  obtiveram 100% de falha.

Tabela 29. Resultados do Caso 9 referente aos três nós combinados.

	$S_{R_1}$	$S_{R_2}$	$S_{R_3}$	$S_{R_4}$	$S_{R_5}$	$S_{R_6}$	$S_{C_1}$	$S_{C_2}$
SF	1	0	0	0	0	0	0	0
$R_1$	92	84	76	0	81	76	74	0
$R_2$	93	89	80	0	82	73	78	0
$R_3$	80	83	83	0	81	71	78	0
$R_4$	92	90	83	100	84	71	81	0
$R_5$	83	86	82	0	88	74	85	0
$R_6$	89	82	77	0	83	87	83	0
$C_1$	89	90	85	0	90	77	95	0
$C_2$	90	89	84	0	88	74	82	100

Apesar de o método não identificar o componente específico com falha, o algoritmo foi capaz de reduzir de oito para dois componentes possíveis de ter falha.

8. CONCLUSÃO

Neste artigo, foi utilizada o PSO como técnica de otimização para encontrar a melhor solução dos componentes do circuito para as funções transferências obtidas nos nós acessíveis do circuito e comparados com os valores medidos por simulação. Quando comparados, há a verificação se o componente está na faixa de tolerância e determinação se o mesmo possui falha ou não. Apesar de alguns casos estudados neste trabalho não ter o resultado específico de identificação do componente, há a redução da quantidade de possíveis componentes com falhas, o que mostra que o método proposto tem capacidade de ajudar na identificação do componente com falha. Os resultados obtidos mostram a viabilidade do método proposto. Para o estudo de caso realizado, a metodologia reduziu o número de componentes possíveis de ter falha em até 75% do quantitativo total ou identificou o componente que esteja com falha no circuito. Para o estudo de caso trabalhado, observou-se que as otimizações que utilizaram o nó  $T_3$ , utilizando individualmente ou combinado, tiveram um melhor desempenho em relação aos outros nós acessíveis do circuito. A tensão no nó  $T_3$  sofre uma maior influência em relação aos outros nós acessíveis em virtude de o sinal recebido neste nó sofrer alteração nos três amplificadores operacionais apresentados no circuito da Figura 1.

Diante dos resultados, novos estudos devem ser realizados na busca de um melhor desempenho e na verificação de falhas em mais de um componente do circuito.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, e da Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro - FAPERJ - (Proc. E-26/210.200/2020). Os autores agradecem o apoio financeiro prestado.

REFERÊNCIAS

Binu, D. and Kariyappa, B. (2017). A survey on fault diagnosis of analog circuits: Taxonomy and state of the art. *AEU - Int. J. Elect. Comm.*, 73:68-83.

Claasen, T. (2003). System on a chip: changing ic design today and in the future. *IEEE Micro*, 23:20-26.

Eberhart, R. and Shi, Y. (2001). Tracking and optimizing dynamic systems with particle swarms. In *Proc. IEEE CEC*, volume 1:94-100.

Hayt, W., Kermmerly, J., and Durbin, S. (2008). *Análise de Circuitos em Engenharia*. Mc Graw Hill.

Kennedy, J. and Eberhart, R. (1995). Particle swarm optimization. In *Proc. ICNN'95*, volume 4:1942-1948.

Yang, C. (2020). Genetic algorithm based faulty parameter identification for linear analog circuit. *IEEE Access*, 8:213357-213369.

Yu, W.E., Yu, S., and Paluga, F. (2002). Practical treatise on the tow-thomas biquad active filter. *CE170 Communications Systems Laboratory*.

Zhou, L. and Shi, Y. (2009). Soft fault diagnosis of analog circuit based on particle swarm optimization. In *Proc. IEEE ICTD*, 1-4.