



Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Centro de Tecnologia e Ciências
Faculdade de Engenharia

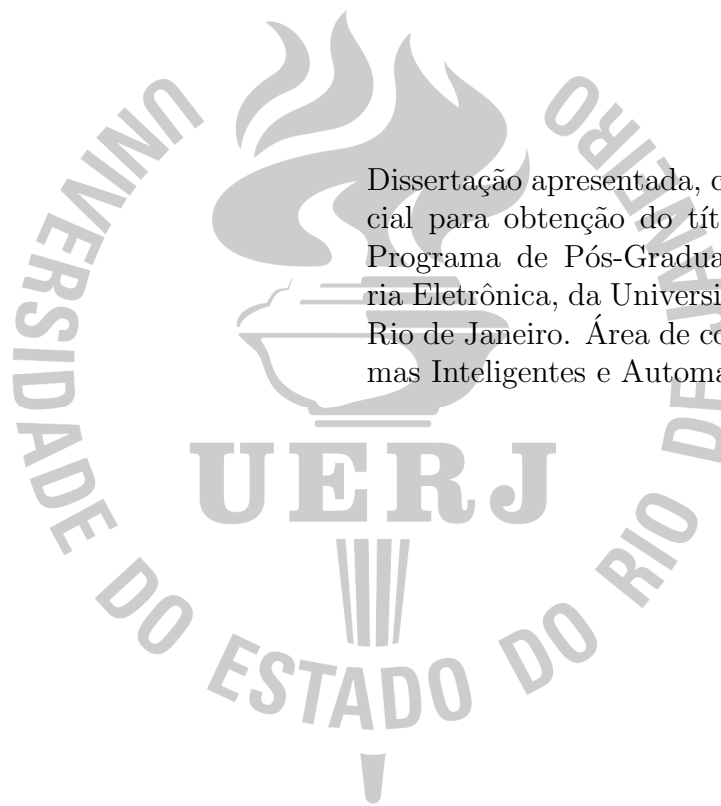
Jalber Dinelli Luna Galindo

**Diagnóstico de Falhas em Circuitos
Analógicos Utilizando Inteligência de Enxame**

Rio de Janeiro
2022

Jalber Dinelli Luna Galindo

**Diagnóstico de Falhas em Circuitos
Analogicos Utilizando Inteligência de Enxame**



Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Eletrônica, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Sistemas Inteligentes e Automação.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Nadia Nedjah

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Luiza de Macedo Mourelle

Rio de Janeiro
2022

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

G158 Galindo, Jalber Dinelli Luna.
Diagnóstico de falhas em circuitos analógicos utilizando
inteligência de enxame / Jalber Dinelli Luna Galindo. – 2022.
251f.

Orientadora: Nadia Nedjah.
Coorientadora: Luiza de Macedo Mourelle.
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de
Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia eletrônica - Teses. 2. Falhas de sistemas de
computação - Teses. 3. Sistemas especialistas (Computação) -
Teses. 4. Circuitos integrados lineares - Teses. 5. Inteligência
coletiva - Teses. I. Nedjah, Nadia. II. Mourelle, Luiza de Macedo.
III. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de
Engenharia. IV. Título.

CDU 621.38:004.89

Bibliotecária: Júlia Vieira – CRB7/6022

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou
parcial desta tese, desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

Jalber Dinelli Luna Galindo

**Diagnóstico de Falhas em Circuitos
Analogicos Utilizando Inteligência de Enxame**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Eletrônica, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Sistemas Inteligentes e Automação.

Aprovado em: 15 de dezembro de 2022

Banca Examinadora:

Prof.^a Dr.^a Nadia Nedjah (Orientadora)
Faculdade de Engenharia, UERJ

Prof.^a Dr.^a Luiza de Macedo Mourelle (Orientadora)
Faculdade de Engenharia, UERJ

Prof.^a Dr.^a Fernanda Duarte Vilela Reis de Oliveira
Escola Politécnica, UFRJ

Prof. Dr. Paulo Victor Rodrigues de Carvalho
Instituto de Engenharia Nuclear, IEN

Rio de Janeiro
2022

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela vida, pela saúde e por todas as oportunidades concedidas ao longo de minha vida.

Agradeço ao apoio incondicional da minha filha Maria Letícia e da minha esposa Emanuela, que me alimentaram de amor e esperança todos os dias.

Agradeço as minhas orientadoras, as professoras Nadia Nedjah e Luiza de Macedo Mourelle, pelos ensinamentos, pela disponibilidade de infraestrutura e tempo, e pela convivência ao longo do curso.

Agradeço aos colegas de mestrado Gustavo Bueno e Alexandre Nietupski pela troca de conhecimentos, companheirismo e vivências durante o curso de mestrado, em especial durante as disciplinas cursadas em conjunto.

Agradeço ao professor Jorge Luís Machado do Amaral pelos ensinamentos recebidos durante o curso.

Agradeço à Marinha do Brasil por ter permitido que eu realizasse o curso. Em especial, ao Capitão de Corveta (EN) Alexandre de Vasconcelos Cardoso pelo incentivo e pela orientação durante o curso.

Agradeço ao PEL-UERJ, a CNPq, a CAPES e a FAPERJ pelos recursos investidos nesta pesquisa.

Não é sobre perfeição. É sobre esforço. E quando você traz aquele esforço todo dia, é aí que a transformação acontece. É assim que ocorre a mudança.

Jillian Michaels

RESUMO

GALINDO, Jalber D. L. *Diagnóstico de Falhas em Circuitos Analógicos Utilizando Inteligência de Enxame*. 2022. 251f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrônica) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.

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, foram propostas e implementadas duas metodologias, que são baseadas em otimização utilizando inteligência de enxame para o diagnóstico de falhas: otimização por enxame de partículas (*Particle Swarm Optimization* – PSO); e otimização inspirada no comportamento dos morcegos (*Bat Algorithm* – BA). As equações não lineares do circuito em teste são usadas para calcular seus parâmetros. O objetivo é identificar o componente do circuito que tem potencial para apresentar a falha, comparando as respostas obtidas do circuito real e a resposta obtida pelo processo de otimização. Foram utilizados dois circuitos como estudos de caso para avaliar o desempenho das metodologias propostas: o filtro Biquad de Tow-Thomas (circuito 1) e o filtro de ButterWorth (circuito 2). As metodologias propostas foram capazes de identificar ou, pelo menos, reduzir a quantidade de possíveis componentes com falhas. Foram extraídas as quatro principais métricas de desempenho: a acurácia, a precisão, a sensibilidade e a especificidade. A técnica do BA teve um melhor desempenho, utilizando a combinação máxima dos nós acessíveis do circuito em teste, com valor das métricas consideradas 95,84%, 81,45%, 82,16% e 97,66%, respectivamente para o circuito 1. Para o circuito 2, obteve métricas de 95,13%, 74,87%, 73,30% e 97,42%, respectivamente. A técnica do BA também foi melhor em relação ao tempo de execução. Para o circuito 1, houve uma redução média de 7,95% do tempo em relação ao tempo médio do PSO para o circuito sem falhas e de 8,12% para os casos com falha. Para o circuito 2, houve uma redução média de 12,2% do tempo em relação ao tempo médio do PSO para o circuito sem falhas e de 11,2% para os casos com falha.

Palavras-chave: Diagnóstico de Falhas em Circuitos Analógicos. Inteligência de Enxame. Otimização por Enxame de Partículas. Otimização Inspirada no Comportamento dos Morcegos.

ABSTRACT

GALINDO, Jalber D. L. *Fault Diagnosis in Analogic Circuits using Swarm Intelligence*. 2022. 251f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrônica) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.

Open-circuit or short-circuit faults, as well as in discrete parameters are the most used models in simulation methods before testing. Since the response of an analog circuit to an input signal is continuous, failures in any particular circuit component may not characterize all possible component failures. There are three important features in failure diagnostic of analog circuits: identifying faulty components, determining faulty element values, and circuit tolerance constraints. To solve this problem, two methodologies are proposed and implemented, which are based on optimization using swarm intelligence, for the diagnosis of failures: Particle Swarm Optimization (PSO); and bat behavior inspired optimization, termed Bat Algorithm (BA). The non-linear equations of the circuit under test are used to calculate its parameters. The objective is to identify the circuit component that has the potential to present a failure by comparing the responses measured the real circuit and that obtained by the optimization process. Two circuits are used as case studies to evaluate the performance of the proposed implementations: the Tow-Thomas Biquad filter (circuit 1) and the ButterWorth filter (circuit 2). The proposed methodologies are able to identify or, at least, reduce the number of possibly failing components. The four main performance metrics used are extracted: accuracy, precision, sensitivity and specificity. The BA technique offers a better performance, using the combination of the maximum accessible nodes of the circuit under test, with the considered metric values 95.84%, 81.45%, 82.16% and 97.66%, respectively for circuit 1. For circuit 2, the obtained metric values are 95.13%, 74.87%, 73.30% and 97.42%, respectively. The BA technique is more efficient regarding the execution time. For circuit 1, there was an average reduction of 7.95% of the time when compared to the average time of the PSO for the circuit without failures, and of 8.12% for the cases with failure. For circuit 2, there was an average reduction of 12.2% of the time when compared to the average time of the PSO for the circuit without failures, and of 11.2% for the cases with failure.

Keywords: Fault Diagnosis in Analog Circuits. Swarm Intelligence. Particle Swarm Optimization. Bat Algorithm.

LISTA DE FIGURAS

1	Filtro Biquad Tow-Thomas.....	28
2	Filtro Butterworth.....	30
3	Topologias.....	50
4	Filtro Biquad Tow-Thomas sem falhas.....	59
5	Forma de onda do Filtro Biquad Tow-Thomas sem falhas.....	60
6	Forma de onda do Filtro Biquad Tow-Thomas com falha em R_3	61
7	Forma de onda do Filtro Biquad Tow-Thomas com falhas R_2 e C_2	62
8	Filtro Butterworth sem falhas.....	63
9	Forma de onda do Filtro Butterworth sem falhas.....	64
10	Forma de onda do Filtro Biquad Tow-Thomas com falha em R_3	65
11	Forma de onda do Filtro Biquad Tow-Thomas com falhas em R_1 e C_3	66
12	Comparação das métricas de avaliação para o circuito Biquad de Tow-Thomas usando o PSO.....	80
13	Métricas de avaliação do Circuito Butterworth usando o PSO analisando os nós individualmente.....	106
14	Métricas de avaliação do Circuito Butterworth usando o PSO analisando 2 nós combinados.....	107
15	Métricas de avaliação do Circuito Butterworth usando o PSO analisando 3 nós combinados.....	107
16	Métricas de avaliação do Circuito Butterworth usando o PSO analisando 4 nós combinados.....	108
17	Métricas de avaliação do Circuito Butterworth usando o PSO analisando os 5 nós combinados.....	108
18	Métricas de avaliação do Circuito Butterworth usando o PSO analisando os nós individualmente.....	109
19	Comparação das métricas de avaliação dos circuitos usando o PSO.....	110
20	Comparação das métricas de avaliação para o Circuito Biquad de Tow-Thomas usando BA.....	117
21	Métricas de avaliação do Circuito Butterworth usando o BA analisando os nós individualmente.....	143
22	Métricas de avaliação do Circuito Butterworth usando o BA analisando 2 nós combinados.....	144
23	Métricas de avaliação do Circuito Butterworth usando o BA analisando 3 nós combinados.....	144
24	Métricas de avaliação do Circuito Butterworth usando o BA analisando 4 e 5 nós combinados.....	145

LISTA DE FIGURAS

25	Métricas de avaliação do Circuito Butterworth usando o BA analisando os nós individualmente.	145
26	Comparação das métricas de avaliação dos circuitos usando BA variando a quantidade de nós.	146
27	Comparação das métricas do circuito 1 utilizando os nós individuais.	147
28	Comparação das métricas do circuito 1 utilizando a combinação de dois nós.	148
29	Comparação das métricas do circuito 1 utilizando a combinação dos três nós.	148
30	Comparação das métricas de avaliação do circuito 1 usando o BA.	149
31	Comparação das métricas do circuito 2 utilizando os nós individuais.	149
32	Comparação das métricas do circuito 2 utilizando a combinação de dois nós.	151
33	Comparação das métricas do circuito 2 utilizando a combinação de três nós.	152
34	Comparação das métricas do circuito 2 utilizando a combinação de quatro nós.	153
35	Comparação das métricas do circuito 2 utilizando a combinação dos cinco nós.	153
36	Comparação das métricas de avaliação do circuito 2 usando o BA.	153
37	Comparação das métricas de avaliação do circuito 1 entre o PSO e o BA.	154
38	Comparação das métricas de avaliação do circuito 2 entre o PSO e o BA.	155
39	Comparação dos tempos de execução dos circuitos para os casos sem falha (SF) e com falha (CF).	156

LISTA DE TABELAS

1	Parâmetros ideais dos componentes do Circuito Biquad de Tow-Thomas..	59
2	Parâmetros obtidos pela otimização do experimento 2..	61
3	Parâmetros obtidos pela otimização do experimento 3..	63
4	Parâmetros ideais dos componentes do Circuito Butterworth.	63
5	Parâmetros obtidos pela otimização do experimento 1..	64
6	Parâmetros obtidos pela otimização do experimento 2..	66
7	Parâmetros obtidos pela otimização do experimento 3..	67
8	Exemplo de resultado para caso de circuito sem falhas ..	69
9	Exemplo de resultado para um circuito com falhas.	70
10	Matriz de confusão para um circuito com 4 componentes no nó T	72
11	Métricas para o exemplo do caso sem falhas.	72
12	Parâmetros do PSO.	73
13	Tensão medida nos nós $T_1 - T_3$ no circuito Biquad de Tow-Thomas.	73
14	Incremento dos nós utilizados no circuito Biquad de Tow-Thomas.	74
15	Matriz de confusão dos resultados do nó T_1 no circuito Biquad de Tow-Thomas usando o PSO.....	74
16	Resultados para as métricas consideradas para o nó T_1 no circuito Biquad de Tow-Thomas usando o PSO.....	74
17	Matriz de confusão dos resultados do nó T_2 no circuito Biquad de Tow-Thomas usando o PSO.....	75
18	Resultados para as métricas consideradas para o nó T_2 no circuito Biquad de Tow-Thomas usando o PSO.....	75
19	Matriz de confusão dos resultados do nó T_3 no circuito Biquad de Tow-Thomas usando o PSO.....	76
20	Resultados para as métricas consideradas para o nó T_3 no circuito Biquad de Tow-Thomas usando o PSO.....	76
21	Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós T_1 e T_2 no circuito Biquad de Tow-Thomas usando o PSO.....	77
22	Resultados para as métricas consideradas para a combinação dos nós T_1 e T_2 no circuito Biquad de Tow-Thomas usando o PSO.....	77
23	Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós T_1 e T_3 no circuito Biquad de Tow-Thomas usando o PSO.....	77
24	Resultados para as métricas consideradas para a combinação dos nós T_1 e T_3 no circuito Biquad de Tow-Thomas usando o PSO.....	78
25	Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós T_2 e T_3 no circuito Biquad de Tow-Thomas usando o PSO.....	78
26	Resultados para as métricas consideradas para a combinação dos nós T_2 e T_3 no circuito Biquad de Tow-Thomas usando o PSO.....	78

LISTA DE TABELAS

27	Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós $T_1 - T_3$ no circuito Biquad de Tow-Thomas usando o PSO.	79
28	Resultados para as métricas consideradas para a combinação dos nós $T_1 - T_3$ no circuito Biquad de Tow-Thomas usando o PSO.	79
29	Tensão medida nos nós $T_1 - T_5$ no Circuito Butterworth.	80
30	Incremento dos nós utilizados no Circuito Butterworth.	81
31	Matriz de confusão dos resultados do nó T_1 no Circuito Butterworth usando o PSO.	81
32	Resultados referentes às métricas consideradas para o nó T_1 no Circuito Butterworth usando o PSO.	81
33	Matriz de confusão dos resultados do nó T_2 no Circuito Butterworth usando o PSO.	82
34	Resultados referentes às métricas consideradas para o nó T_2 no Circuito Butterworth usando o PSO.	82
35	Matriz de confusão dos resultados do nó T_3 no Circuito Butterworth usando o PSO.	83
36	Resultados referentes às métricas consideradas para o nó T_3 no Circuito Butterworth usando o PSO.	83
37	Matriz de confusão dos resultados do nó T_4 no Circuito Butterworth usando o PSO.	84
38	Resultados referentes às métricas consideradas para o nó T_4 no Circuito Butterworth usando o PSO.	84
39	Matriz de confusão dos resultados do nó T_5 no Circuito Butterworth usando o PSO.	85
40	Resultados referentes às métricas consideradas para o nó T_5 no Circuito Butterworth usando o PSO.	85
41	Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós T_1 e T_2 no Circuito Butterworth usando o PSO.	85
42	Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós T_1 e T_2 no Circuito Butterworth usando o PSO.	86
43	Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós T_1 e T_3 no Circuito Butterworth usando o PSO.	86
44	Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós T_1 e T_3 no Circuito Butterworth usando o PSO.	86
45	Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós T_1 e T_4 no Circuito Butterworth usando o PSO.	87
46	Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós T_1 e T_4 no Circuito Butterworth usando o PSO.	87
47	Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós T_1 e T_5 no Circuito Butterworth usando o PSO.	88
48	Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós T_1 e T_5 no Circuito Butterworth usando o PSO.	88
49	Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós T_2 e T_3 no Circuito Butterworth usando o PSO.	89
50	Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós T_2 e T_3 no Circuito Butterworth usando o PSO.	89
51	Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós T_2 e T_4 no Circuito Butterworth usando o PSO.	89

LISTA DE TABELAS

52	Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós T_2 e T_4 no Circuito Butterworth usando o PSO.	90
53	Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós T_2 e T_5 no Circuito Butterworth usando o PSO.	90
54	Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós T_2 e T_5 no Circuito Butterworth usando o PSO.	90
55	Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós T_3 e T_4 no Circuito Butterworth usando o PSO.	91
56	Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós T_3 e T_4 no Circuito Butterworth usando o PSO.	91
57	Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós T_3 e T_5 no Circuito Butterworth usando o PSO.	92
58	Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós T_3 e T_5 no Circuito Butterworth usando o PSO.	92
59	Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós T_4 e T_5 no Circuito Butterworth usando o PSO.	93
60	Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós T_4 e T_5 no Circuito Butterworth usando o PSO.	93
61	Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós T_1 , T_2 e T_3 no Circuito Butterworth usando o PSO.	94
62	Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós T_1 , T_2 e T_3 no Circuito Butterworth usando o PSO.	94
63	Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós T_1 , T_2 e T_4 no Circuito Butterworth usando o PSO.	94
64	Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós T_1 , T_2 e T_4 no Circuito Butterworth usando o PSO.	95
65	Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós T_1 , T_2 e T_5 no Circuito Butterworth usando o PSO.	95
66	Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós T_1 , T_2 e T_5 no Circuito Butterworth usando o PSO.	95
67	Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós T_1 , T_3 e T_4 no Circuito Butterworth usando o PSO.	96
68	Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós T_1 , T_3 e T_4 no Circuito Butterworth usando o PSO.	96
69	Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós T_1 , T_3 e T_5 no Circuito Butterworth usando o PSO.	97
70	Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós T_1 , T_3 e T_5 no Circuito Butterworth usando o PSO.	97
71	Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós T_1 , T_4 e T_5 no Circuito Butterworth usando o PSO.	98
72	Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós T_1 , T_4 e T_5 no Circuito Butterworth usando o PSO.	98
73	Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós T_2 , T_3 e T_4 no Circuito Butterworth usando o PSO.	98
74	Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós T_2 , T_3 e T_4 no Circuito Butterworth usando o PSO.	99
75	Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós T_2 , T_3 e T_5 no Circuito Butterworth usando o PSO.	99

LISTA DE TABELAS

76	Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós T_2 , T_3 e T_5 no Circuito Butterworth usando o PSO.....	99
77	Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós T_2 , T_4 e T_5 no Circuito Butterworth usando o PSO.....	100
78	Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós T_2 , T_4 e T_5 no Circuito Butterworth usando o PSO.....	100
79	Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós $T_3 - T_5$ no Circuito Butterworth usando o PSO.	101
80	Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós $T_3 - T_5$ no Circuito Butterworth usando o PSO.	101
81	Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós $T_1 - T_4$ no Circuito Butterworth usando o PSO.	102
82	Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós $T_1 - T_4$ no Circuito Butterworth usando o PSO.	102
83	Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós $T_1 - T_3$ e T_5 no Circuito Butterworth usando o PSO.....	102
84	Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós $T_1 - T_3$ e T_5 no Circuito Butterworth usando o PSO.....	103
85	Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós T_1 , T_2 , T_4 e T_5 no Circuito Butterworth usando o PSO.	103
86	Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós T_1 , T_2 , T_4 e T_5 no Circuito Butterworth usando o PSO.....	103
87	Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós T_1 , $T_3 - T_5$ no Circuito Butterworth usando o PSO.....	104
88	Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós T_1 , $T_3 - T_5$ no Circuito Butterworth usando o PSO.....	104
89	Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós $T_2 - T_5$ no Circuito Butterworth usando o PSO.	105
90	Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós $T_2 - T_5$ no Circuito Butterworth usando o PSO.	105
91	Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós $T_1 - T_5$ no Circuito Butterworth usando o PSO.	106
92	Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós $T_1 - T_5$ no Circuito Butterworth usando o PSO.	106
93	Métricas de avaliação pela quantidade de nós acessíveis usando o PSO. . .	109
94	Parâmetros do BA.	111
95	Matriz de confusão dos resultados do nó T_1 no Circuito Biquad de Tow-Thomas usando BA.	111
96	Resultados para as métricas consideradas para o nó T_1 no Circuito Biquad de Tow-Thomas usando BA.	112
97	Matriz de confusão dos resultados do nó T_2 no Circuito Biquad de Tow-Thomas usando BA.	112
98	Resultados para as métricas consideradas para o nó T_2 no Circuito Biquad de Tow-Thomas usando BA.	112
99	Matriz de confusão dos resultados do nó T_3 no Circuito Biquad de Tow-Thomas usando BA.	113
100	Resultados para as métricas consideradas para o nó T_3 no Circuito Biquad de Tow-Thomas usando BA.	113

LISTA DE TABELAS

101	Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós T_1 e T_2 no Circuito Biquad de Tow-Thomas usando BA.	114
102	Resultados para as métricas consideradas para a combinação dos nós T_1 e T_2 no Circuito Biquad de Tow-Thomas usando BA.	114
103	Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós T_1 e T_3 no Circuito Biquad de Tow-Thomas usando BA.	115
104	Resultados para as métricas consideradas para a combinação dos nós T_1 e T_3 no Circuito Biquad de Tow-Thomas usando BA.	115
105	Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós T_2 e T_3 no Circuito Biquad de Tow-Thomas usando BA.	115
106	Resultados para as métricas consideradas para a combinação dos nós T_2 e T_3 no Circuito Biquad de Tow-Thomas usando BA.	116
107	Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós $T_1 - T_3$ no Circuito Biquad de Tow-Thomas usando BA.	116
108	Resultados para as métricas consideradas para a combinação dos nós $T_1 - T_3$ no Circuito Biquad de Tow-Thomas usando BA.	117
109	Matriz de confusão dos resultados do nó T_1 no Circuito Butterworth usando o BA.	118
110	Resultados referentes às métricas consideradas para o nó T_1 no Circuito Butterworth usando o BA.	118
111	Matriz de confusão dos resultados do nó T_2 no Circuito Butterworth usando o BA.	119
112	Resultados referentes às métricas consideradas para o nó T_2 no Circuito Butterworth usando o BA.	119
113	Matriz de confusão dos resultados do nó T_3 no Circuito Butterworth usando o BA.	120
114	Resultados referentes às métricas consideradas para o nó T_3 no Circuito Butterworth usando o BA.	120
115	Matriz de confusão dos resultados do nó T_4 no Circuito Butterworth usando o BA.	121
116	Resultados referentes às métricas consideradas para o nó T_4 no Circuito Butterworth usando o BA.	121
117	Matriz de confusão dos resultados do nó T_5 no Circuito Butterworth usando o BA.	121
118	Resultados referentes às métricas consideradas para o nó T_5 no Circuito Butterworth usando o BA.	122
119	Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós T_1 e T_2 no Circuito Butterworth usando o BA.	122
120	Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós T_1 e T_2 no Circuito Butterworth usando o BA.	122
121	Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós T_1 e T_3 no Circuito Butterworth usando o BA.	123
122	Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós T_1 e T_3 no Circuito Butterworth usando o BA.	123
123	Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós T_1 e T_4 no Circuito Butterworth usando o BA.	124
124	Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós T_1 e T_4 no Circuito Butterworth usando o BA.	124

LISTA DE TABELAS

125	Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós T_1 e T_5 no Circuito Butterworth usando o BA.	125
126	Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós T_1 e T_5 no Circuito Butterworth usando o BA.	125
127	Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós T_2 e T_3 no Circuito Butterworth usando o BA.	125
128	Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós T_2 e T_3 no Circuito Butterworth usando o BA.	126
129	Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós T_2 e T_4 no Circuito Butterworth usando o BA.	126
130	Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós T_2 e T_4 no Circuito Butterworth usando o BA.	126
131	Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós T_2 e T_5 no Circuito Butterworth usando o BA.	127
132	Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós T_2 e T_5 no Circuito Butterworth usando o BA.	127
133	Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós T_3 e T_4 no Circuito Butterworth usando o BA.	128
134	Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós T_3 e T_4 no Circuito Butterworth usando o BA.	128
135	Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós T_3 e T_5 no Circuito Butterworth usando o BA.	129
136	Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós T_3 e T_5 no Circuito Butterworth usando o BA.	129
137	Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós T_4 e T_5 no Circuito Butterworth usando o BA.	129
138	Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós T_4 e T_5 no Circuito Butterworth usando o BA.	130
139	Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós T_1 , T_2 e T_3 no Circuito Butterworth usando o BA.	130
140	Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós T_1 , T_2 e T_3 no Circuito Butterworth usando o BA.	131
141	Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós T_1 , T_2 e T_4 no Circuito Butterworth usando o BA.	131
142	Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós T_1 , T_2 e T_4 no Circuito Butterworth usando o BA.	131
143	Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós T_1 , T_2 e T_5 no Circuito Butterworth usando o BA.	132
144	Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós T_1 , T_2 e T_5 no Circuito Butterworth usando o BA.	132
145	Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós T_1 , T_3 e T_4 no Circuito Butterworth usando o BA.	133
146	Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós T_1 , T_3 e T_4 no Circuito Butterworth usando o BA.	133
147	Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós T_1 , T_3 e T_5 no Circuito Butterworth usando o BA.	134
148	Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós T_1 , T_3 e T_5 no Circuito Butterworth usando o BA.	134

LISTA DE TABELAS

149	Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós T_1 , T_4 e T_5 no Circuito Butterworth usando o BA.	134
150	Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós T_1 , T_4 e T_5 no Circuito Butterworth usando o BA.	135
151	Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós T_2 , T_3 e T_4 no Circuito Butterworth usando o BA.	135
152	Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós T_2 , T_3 e T_4 no Circuito Butterworth usando o BA.	135
153	Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós T_2 , T_3 e T_5 no Circuito Butterworth usando o BA.	136
154	Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós T_2 , T_3 e T_5 no Circuito Butterworth usando o BA.	136
155	Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós T_2 , T_4 e T_5 no Circuito Butterworth usando o BA.	137
156	Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós T_2 , T_4 e T_5 no Circuito Butterworth usando o BA.	137
157	Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós $T_3 - T_5$ no Circuito Butterworth usando o BA.	138
158	Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós $T_3 - T_5$ no Circuito Butterworth usando o BA.	138
159	Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós $T_1 - T_4$ no Circuito Butterworth usando o BA.	138
160	Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós $T_1 - T_4$ no Circuito Butterworth usando o BA.	139
161	Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós $T_1 - T_3$ e T_5 no Circuito Butterworth usando o BA.	139
162	Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós $T_1 - T_3$ e T_5 no Circuito Butterworth usando o BA.	139
163	Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós T_1 , T_2 , T_4 e T_5 no Circuito Butterworth usando o BA.	140
164	Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós T_1 , T_2 , T_4 e T_5 no Circuito Butterworth usando o BA.	140
165	Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós T_1 , $T_3 - T_5$ no Circuito Butterworth usando o BA.	141
166	Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós T_1 , $T_3 - T_5$ no Circuito Butterworth usando o BA.	141
167	Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós $T_2 - T_5$ no Circuito Butterworth usando o BA.	142
168	Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós $T_2 - T_5$ no Circuito Butterworth usando o BA.	142
169	Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós $T_1 - T_5$ no Circuito Butterworth usando o BA.	142
170	Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós $T_1 - T_5$ no Circuito Butterworth usando o BA.	143
171	Métricas de avaliação pela quantidade de nós acessíveis usando BA.	145
172	Comparação das métricas de avaliação do circuito 1.	152
173	Comparação das métricas de avaliação do circuito 2.	154
174	Tempo de execução da implementação pela quantidade de nós.	156

LISTA DE ALGORITMOS

1	Restrição	45
2	Algoritmo PSO	47
3	Controle de velocidade	52
4	Algoritmo BA	54

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	19
1 FUNDAMENTOS DE ANÁLISE DE CIRCUITOS	24
1.1 Análise de Circuito	24
1.1.1 <u>Análise Nodal</u>	25
1.1.2 <u>Análise de Malha</u>	25
1.1.3 <u>Resposta em Frequência</u>	26
1.2 Função Transferência dos Estudos de Caso	27
1.2.1 <u>Circuito Biquad de Tow-Thomas</u>	27
1.2.2 <u>Circuito Butterworth</u>	29
1.3 Considerações Finais	33
2 TRABALHOS RELACIONADOS	34
2.1 Abordagem com Técnicas de Análise de Circuitos	34
2.2 Abordagem com Técnicas de Classificação	36
2.3 Abordagem com Técnicas de Otimização	41
2.4 Considerações Finais	42
3 TÉCNICAS DE INTELIGÊNCIA DE ENXAME	44
3.1 Otimização	44
3.2 Otimização por Enxame de Partículas	46
3.2.1 <u>Algoritmo</u>	47
3.2.2 <u>Movimento das Partículas</u>	48
3.2.3 <u>Topologias</u>	49
3.2.4 <u>Parâmetros</u>	50
3.2.5 <u>Controle de Velocidade</u>	52
3.3 Otimização Inspirada no Comportamento de Morcego	52
3.3.1 <u>Algoritmo</u>	53
3.3.2 <u>Movimento dos Morcegos</u>	53
3.3.3 <u>Sonoridade e Emissão de Pulso</u>	55
3.3.4 <u>Parâmetros</u>	55
3.4 Considerações Finais	56
4 DIAGNÓSTICO DE FALHAS VIA OTIMIZAÇÃO	57
4.1 Definição do Problema de Otimização	57
4.2 Estudo de Caso 1 - Biquad de Tow-Thomas	58
4.2.1 <u>Experimento 1: Circuito sem falhas</u>	59
4.2.2 <u>Experimento 2: Circuito com uma falha</u>	60
4.2.3 <u>Experimento 3: Circuito com múltiplas falhas</u>	61

SUMÁRIO

4.3	Estudo de Caso 2 - Butterworth	63
4.3.1	<u>Experimento 1: Circuito sem falhas</u>	63
4.3.2	<u>Experimento 2: Circuito com uma falha</u>	64
4.3.3	<u>Experimento 3: Circuito com múltiplas falhas</u>	66
4.4	Considerações Finais	67
5	RESULTADOS DE DESEMPENHO	68
5.1	Metodologia	68
5.2	Métricas de Avaliação	70
5.3	Resultado Utilizando PSO	72
5.3.1	<u>Circuito Biquad de Tow-Thomas</u>	73
5.3.2	<u>Circuito de Butterworth</u>	80
5.3.3	<u>Desempenho do PSO</u>	107
5.4	Resultado Utilizando BA	110
5.4.1	<u>Circuito Biquad de Tow-Thomas</u>	111
5.4.2	<u>Circuito de Butterworth</u>	117
5.4.3	<u>Desempenho do BA</u>	143
5.5	Comparação de Desempenho: PSO vs. BA	147
5.5.1	<u>Por circuito</u>	147
5.5.2	<u>Pelo número de nós</u>	150
5.5.3	<u>Tempo de execução</u>	155
5.6	Considerações Finais	157
6	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	158
6.1	Conclusões	158
6.2	Trabalhos Futuros	160
	REFERÊNCIAS	161
	APÊNDICE A – RESULTADOS DO CIRCUITO BIQUAD DE TOW-THOMAS	168
	APÊNDICE B – RESULTADOS DO CIRCUITO BUTTERWORTH	181
	APÊNDICE C – TEMPO DE EXECUÇÃO DAS IMPLEMENTAÇÕES	250

INTRODUÇÃO

Os equipamentos eletrônicos que abrangem os circuitos eletrônicos são categorizados em circuitos analógicos e digitais. De acordo com uma estatística, quase 80% dos circuitos eletrônicos nos equipamentos eletrônicos são digitais, mas cerca de 80% das falhas ocorrem principalmente nas partes analógicas (BINU; KARIYAPPA, 2017). Os circuitos digitais geralmente consistem em componentes de uma biblioteca limitada de modelos muito simples. Ao comparar os circuitos digitais e circuitos analógicos, o diagnóstico de falhas em circuitos digitais é mais fácil do que analógico, uma vez que os procedimentos de teste para os circuitos digitais são bem definidos e apenas um número limitado de falhas como falhas de curto-circuito, falhas de circuito aberto e travamento em falhas estão presentes nos circuitos digitais. Enquanto, em circuitos analógicos, o diagnóstico de falha é muito difícil devido às características básicas dos circuitos analógicos, como não linearidade e tolerância nos componentes, modelos de falha ineficientes, nós acessíveis inadequados e incerteza nas medições. Devido a esses motivos, mais avanços são necessários para o diagnóstico de falhas de circuitos analógicos.

Uma falha de circuito é definida como um desvio não permitido de pelo menos uma propriedade característica ou parâmetro do sistema da condição aceitável, usual ou padrão (SCHRICK, 1997). No campo dos circuitos analógicos, a falha geralmente é definida como a mudança no valor nominal de algum parâmetro que afeta significativamente o desempenho do circuito, levando à falha do circuito (DING, 2008).

As principais fontes de falha nos circuitos analógicos são curtos-circuitos, circuitos abertos e erro de componente. As alterações relacionadas à conexão dos terminais dos componentes do circuito geram a falha de curto e também de circuito aberto. A falha de curto-circuito é devido a um curto entre os terminais dos componentes do circuito. Por exemplo, um resistor de resistência 1Ω como componente no circuito é capaz de simular falha de curto-circuito (BINU; KARIYAPPA, 2017).

Uma falha de circuito aberto ocorre no quando o terminal do componente não toca outras partes do circuito. O terminal fora de contato gera alta resistência na ocorrência da falha no circuito. Por exemplo, incluir um resistor de resistência de $1M\Omega$ em série com componentes no circuito pode simular a falha aberta (BINU; KARIYAPPA, 2017).

Os componentes presentes no circuito eletrônico também podem ser o motivo da falha nos circuitos. Se um dos componentes do circuito apresentar defeito, o circuito geral fica com defeito por causa da falha do componente. Esse componente produz um erro no funcionamento do circuito. O erro devido ao componente defeituoso é chamado de erro no componente (BINU; KARIYAPPA, 2017).

O desenvolvimento de estratégias de teste para detectar e diagnosticar falhas em circuitos analógicos e de sinais mistos 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. Muitas áreas, tais como, telecomunicações, multimídia e aplicações biomédicas, precisam de bom desempenho em aplicações de alta frequência, baixo ruído e baixa potência, que somente pode ser alcançado usando circuitos integrados analógicos e de sinais mistos. Assim, uma estratégia para detectar e diagnosticar falhas nesses circuitos é muito importante (ALBUSTANI, 2004). 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*). Com esse nível de integração, esse tipo de circuito gerou problemas difíceis de teste e projeto. Existem vários fatores que aumentam as dificuldades, tais como: a falta de bons modelos de falhas, falta de um padrão de projeto com vistas à testabilidade e o aumento da importância das falhas relacionadas ao tempo (CLAASEN, 2003). Portanto, a estratégia de testes para detecção e diagnóstico de falhas ainda é severamente dependente da perícia e da experiência que os engenheiros têm sobre as características do circuito. Sendo assim, a detecção e a identificação de falhas é ainda um processo interativo e que consome bastante tempo. Um estudo na área de detecção e diagnóstico (FENTON; MCGINNITY; MAGUIRE, 2001) mostrou que, nas últimas décadas, uma boa quantidade de pesquisa em diagnósticos de falhas foi concentrada em desenvolver ferramentas que facilitassem as tarefas de diagnóstico. Embora tenha havido progressos importantes, essas novas tecnologias não tem sido largamente aceitas. Isso deve motivar os pesquisadores para investigar outros paradigmas e desenvolver novas estratégias para diagnósticos de falhas.

O uso de técnicas de inteligência computacional para diagnóstico é normalmente baseado na construção de modelos ou no uso de classificadores. O sucesso das abordagens baseadas na construção de modelos depende da qualidade do modelo obtido que, no caso de um sistema complexo, pode ser difícil de obter.

A abordagem baseada em inteligência computacional, também chamada de diagnóstico de falhas baseado em dados, utiliza o conhecimento em que o diagnóstico de falhas é feito com base nos dados históricos disponíveis com o auxílio do classificador. As abordagens de inteligência baseada no conhecimento são categorizadas como baseadas em transformação, otimização, regras, aprendizado de máquina ou em técnicas híbridas (BINU; KARIYAPPA, 2017).

Na abordagem baseada em transformação, o modelo do circuito em teste é formulado e a transformada *wavelet* é aplicada aos sinais do circuito sem falha e também na condição de falha. Um dicionário de falhas é construído extraíndo o desvio padrão dos coeficientes. O conhecimento, assim como a mudança de parâmetro defeituoso, é comparado com base no dicionário de defeitos para detectar as falhas nos circuitos (DENG; SHI; ZHOU, 2010).

A abordagem baseada em otimização usa algoritmos para a identificação dos parâmetros do componente. A equação não linear do circuito em teste foi considerada como a função objetivo de otimização e muitos dos algoritmos de otimização adaptados para técnicas de diagnóstico de falhas foram desenvolvidos para detecção de falhas nos circuitos. A detecção de falhas é feita comparando o parâmetro estimado e os valores normais (KORZYBSKI; OSSOWSKI, 2015) e (LUO et al., 2012).

Na abordagem baseada em regras, o diagnóstico da falha no circuito é realizado com base na regra que tem a forma “se sintomas, então falha”. Além das informações do domínio do sinal, informações adicionais são geradas dependendo das regras, e a correspondência é realizada dependendo das informações geradas (CATELANI; FORT; ALIPPI, 2002) e (KAVITHAMANI; MANIKANDAN; DEVARAJAN, 2009).

A abordagem baseada em aprendizado de máquina supervisionado explora o conhecimento do diagnóstico anterior bem-sucedido ou malsucedido para melhorar o desempenho do sistema nos procedimentos de diagnóstico. Neste caso, a resposta do circuito sob teste, com o valor do parâmetro do componente no circuito sem qualquer excitação, é

registrada e treinada na rede. A variação do parâmetro no componente, após a excitação testada, revela as falhas presentes no circuito (BINU; KARIYAPPA, 2017).

As abordagens híbridas são aquelas que incorporam as técnicas baseadas no aprendizado de máquina e as baseadas em regras para o diagnóstico de falhas dos circuitos (QIN; HAN; CUI, 2011).

Neste trabalho é explorada a abordagem baseada em otimização, onde são usadas duas técnicas de otimização inspiradas na inteligência de enxame, permitindo a detecção de falhas em circuitos eletrônicos analógicos baseados na resposta ao impulso, com análise das funções transferências disponíveis. Os experimentos foram realizados em filtros eletrônicos de segunda e terceira ordem: Biquad de Tow-Thomas (YU; YU; PALUGA, 2002) e Butterworth (BUTTERWORTH, 1930), respectivamente. Estes filtros são flexíveis, podendo ser utilizados como filtros passa-baixa, passa-alta e passa-banda. Para cada circuito, foram realizados estudos de casos para avaliar se as técnicas de otimização classificam o circuito com falhas ou não, e se, em caso de falha, sugere os possíveis componentes defeituosos.

O restante desta dissertação está estruturado em seis capítulos. Primeiramente, o Capítulo 1 apresenta algumas definições de análises de circuito, ferramentas necessárias para a obtenção das funções transferências dos circuitos. Além disso, é dado ênfase aos circuitos Biquad de Tow-Thomas e filtro de Butterworth, utilizados como estudos de caso neste projeto.

Em seguida, o Capítulo 2 faz um levantamento bibliográfico sobre o diagnóstico de falhas em circuitos eletrônicos analógicos, apresentando técnicas que utilizam análise de circuitos, classificação e otimização.

O Capítulo 3 apresenta as técnicas de busca otimizada empregadas neste trabalho. Inicialmente, é mostrada uma definição geral sobre otimização e suas características. Além disso, apresenta os algoritmos de otimização que foram utilizados no desenvolvimento deste projeto.

Em seguida, o Capítulo 4 apresenta a transformação do diagnóstico de falhas em um circuito eletrônico analógico em um problema de otimização e apresenta os estudos de caso, apresentando metodologias para circuito sem falhas, circuitos com uma falha e circuitos com múltiplas falhas.

Em sequência, o Capítulo 5 apresenta a metodologia aplicada nos circuitos dos estudos de caso, define as métricas de avaliação e apresenta os resultados da implementação

das duas técnicas de otimização na linguagem *Python* aplicadas aos casos, apresentando um estudo comparativo entre os desempenhos das técnicas.

Por fim, o Capítulo 6 apresenta as conclusões sobre o comparativo de desempenho das técnicas utilizadas nesta dissertação. A dissertação termina com sugestão de trabalhos futuros.

Capítulo 1

FUNDAMENTOS DE ANÁLISE DE CIRCUITOS

EM análise de circuito, é possível encontrar tensões e correntes em um circuito aplicando a ele uma fonte de entrada de frequência constante. Se deixarmos a amplitude da fonte constante e variarmos a frequência, obtemos a resposta em frequência do circuito. A resposta em frequência pode ser considerada como uma descrição completa do comportamento em regime permanente de um circuito em função da frequência.

A Seção 1.1 revisa definições básicas a cerca da análises de circuito e resposta em frequência. A Seção 1.2 trata sobre o cálculo de sua função transferência nos filtros de segunda ordem Biquad de Tow-Thomas e de terceira ordem de Butterworth, circuitos utilizados como estudos de caso nesta dissertação. E, por fim, na Seção 1.3, são elencadas as considerações finais das teorias utilizadas no desenvolvimento desta dissertação.

1.1 Análise de Circuito

A lei de Ohm e As leis de Kirchhoff são as leis fundamentais da teoria de circuitos. A referência (ALEXANDER; SADIKU, 2008) detalha como a aplicação dessas leis pode ser utilizada para desenvolver técnicas de análise de circuito. As técnicas são a análise nodal e a análise de malhas.

Com estas técnicas, pode-se analisar qualquer circuito obtendo um conjunto de equações simultâneas que são então resolvidas para obter os valores necessários de corrente ou tensão. Em consequência desse conjunto de equações, é gerada a função transferência do circuito em questão.

1.1.1 Análise Nodal

A análise nodal é uma ferramenta utilizada para analisar circuitos usando tensões nos nós como variáveis do circuito. Escolher tensões nos nós é conveniente e minimiza a quantidade de equações que devem ser resolvidas simultaneamente. A análise nodal também é conhecida como o método da tensão do nó. A análise nodal de um circuito com n nós envolve as três etapas a seguir:

- Selecionar um nó como referência (nó terra, $0V$). Nos demais nós, atribuir variáveis v_1, v_2, \dots, v_{n-1} . As equações de tensões terão como referência o nó escolhido de referência.
- Aplicar as leis de Kirchhoff em cada um dos $n - 1$ nós de não referência. Usar a lei de Ohm para expressar as correntes de ramificação em termos de tensões de nó.
- Resolver as equações resultantes para obter a tensão no nó em relação ao nó de referência.

1.1.2 Análise de Malha

Uma malha é um laço que não contém nenhum outro laço interno. A análise de malha é uma ferramenta que utiliza as correntes de uma malha como variáveis do circuito. Usar a corrente da malha reduz o número de equações que devem ser resolvidas em relação à utilização de correntes do elemento. A análise nodal utiliza a lei de Kirchhoff de correntes nos nós para encontrar as tensões, na análise de malha é utilizada a lei de Kirchhoff para tensões para encontrar as correntes desconhecidas. A análise de malha tem a limitação de ser aplicável apenas a circuitos que não possuem ramificações cruzadas, também chamadas de circuitos planares. A análise de malha de um circuito com n malhas envolve as três etapas a seguir:

- Atribuir correntes de malha i_1, i_2, \dots, i_n nas n malhas.
- Aplicar as leis de Kirchhoff para tensões em cada uma das n malhas. Usar a lei de Ohm para expressar as tensões em termos de correntes de malha.
- Resolver as equações resultantes para obter as correntes de malha.

1.1.3 Resposta em Frequência

Segundo (ALEXANDER; SADIKU, 2008), a resposta em frequência de estado estacionário de circuitos é importante em muitas aplicações, especialmente em sistemas de comunicação e controle. Uma aplicação específica é em filtros elétricos que bloqueiam ou eliminam sinais com frequências indesejadas e permitem a passagem de sinais com frequências desejadas.

A função transferência é definida como a razão entre a transformada de Laplace da saída e da entrada de um dado sistema quando as condições iniciais são nulas (HAYT; KERMMERLY; DURBIN, 2008). Em análise de circuitos eletrônicos analógicos de entrada e saída únicas, a função transferência pode ser encontrada pela relação entre a tensão de um sinal de saída com a tensão do sinal aplicado na entrada, 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 medido ao qual o circuito está sendo analisado (YANG, 2020), conforme a Equação 2:

$$H^{(T_n)}(s, x) = \frac{\dot{U}_{out}}{\dot{U}_{in}}, \quad (2)$$

onde n refere-se a quantidade de nós acessíveis do circuito, T_n representa o nó acessível do circuito, x 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:

$$H^{(T_n)}(s, x) = \frac{a_p(x)s^p + a_{p-1}(x)s^{p-1} + \dots + a_0(x)}{b_q(x)s^q + b_{q-1}(x)s^{q-1} + \dots + b_0(x)}, \quad (3)$$

onde $\mathbf{X} = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_K]$ corresponde à admitância dos K componentes do circuito e $q \geq p$. No domínio da frequência, onde faz-se $s = jw$, observa-se que a resposta em frequência do circuito é expressa na forma complexa, conforme Equação 4:

$$H^{(T_n)}(jw, x) = h_{Re}^{(T_n)}(jw, x) + jh_{Im}^{(T_n)}(jw, x), \quad (4)$$

onde $h_{Re}^{(T_n)}(jw, x)$ e $h_{Im}^{(T_n)}(jw, x)$ representam, respectivamente, as partes real e imaginária de $H^{(T_n)}(jw, x)$. Sendo n o número de nós do circuito a ser analisado, a resposta em

frequência é dada pelo conjunto de dados, conforme Equação 5:

$$\mathbf{H}(x) = [h_{Re}^{(1)}(x), h_{Im}^{(1)}(x), \dots, h_{Re}^{(T_n)}(x), h_{Im}^{(T_n)}(x)], \quad (5)$$

onde o vetor de $\mathbf{H}(x)$ refere-se às funções transferências de cada nó do circuito, onde cada nó possui uma componente real e uma componente imaginária. De forma análoga, a resposta medida para o circuito em análise também é expressa por componentes real e imaginária, conforme Equação 6:

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

onde \mathbf{U} são os dados obtidos a partir de medições no circuito. Os dados $\mathbf{H}(x)$ e \mathbf{U} têm a mesma dimensão e são 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 função impulso usada na entrada tem valor unitário (HAYT; KERMMERLY; DURBIN, 2008). Sendo $\dot{U}_{in} = 1$, a Equação 2 passa a ser definida por $H(s, x) = \dot{U}_{out}(s, x)$.

1.2 Função Transferência dos Estudos de Caso

Nessa seção são apresentados os circuitos usados como estudos de caso, assim como o processo de obtenção das respectivas funções transferência.

1.2.1 Circuito Biquad de Tow-Thomas

A Figura 1 mostra o Filtro *Biquad de Tow-Thomas*. Este circuito é um filtro ativo de segunda ordem baseado na topologia de dois integradores (YU; YU; PALUGA, 2002). Os parâmetros do circuito consistem dos valores atribuídos aos componentes. 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. Portanto, possui alta flexibilidade de utilização por sua facilidade de manipulação. O circuito é do tipo *RC* e Amplificadores Operacionais (*AmpOp*).

Conforme Figura 1, o circuito possui $\mathbf{X} = [R_1 \ R_2 \ R_3 \ R_4 \ R_5 \ R_6 \ C_1 \ C_2]$ como componentes, $i_1 - i_8$ representam as correntes nos componentes, V_{in} a tensão de entrada e $V_0 - V_7$ as tensões nos nós dos circuitos.

A partir das análises nodal e em malha do circuito podemos obter a função transferência. Por convenção, os cálculos serão feitos considerando que os *AmpOp* são ideais,

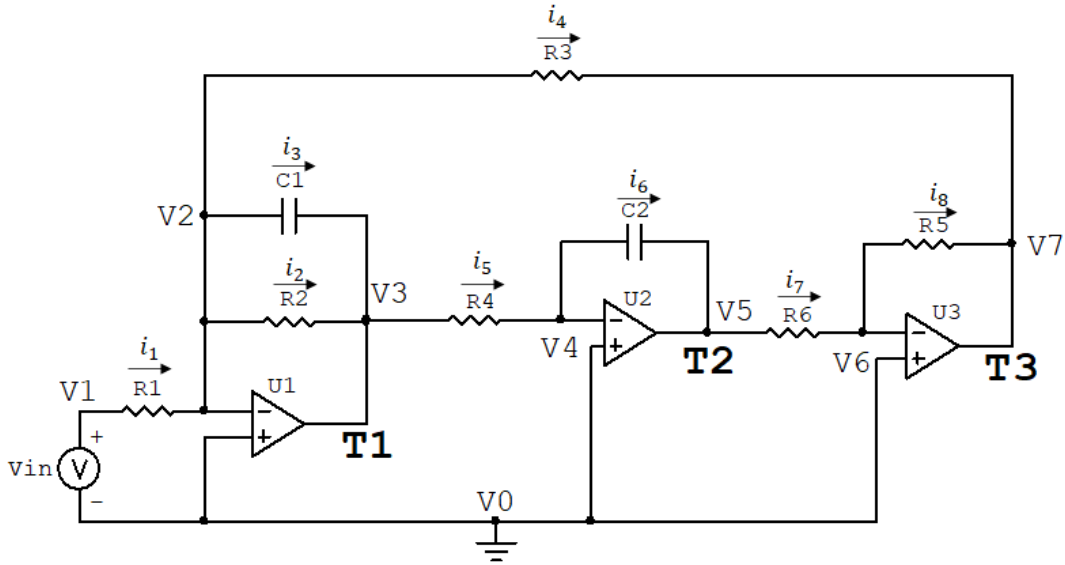


Figura 1: Filtro Biquad Tow-Thomas.

logo, não há corrente nos terminais de entrada e as tensões nos terminais de entrada são iguais nestes componentes. Pela Figura 1, obtemos as seguintes Equações, no domínio de Laplace:

$$V_0 = 0, \quad (7)$$

$$V_1 - V_0 = V_{in} \implies V_1 = V_{in}, \quad (8)$$

$$V_2 - V_1 = R_1 * i_1, \quad (9)$$

$$V_3 - V_2 = R_2 * i_2, \quad (10)$$

$$V_3 - V_2 = \frac{i_3}{sC_1}, \quad (11)$$

$$V_4 - V_3 = R_4 * i_5, \quad (12)$$

$$V_5 - V_4 = \frac{i_6}{sC_2}, \quad (13)$$

$$V_6 - V_5 = R_6 * i_7, \quad (14)$$

$$V_7 - V_6 = R_5 * i_8, \quad (15)$$

$$V_7 - V_2 = R_3 * i_4. \quad (16)$$

Pelas características dos *AmpOp*, observa-se que $i_5 = i_6 = i_7 = i_8$. Portanto, todas podem ser substituídas por i_5 no desenvolvimento dos cálculos. Baseando-se nas Equações 12 – 15 obtém-se a Equação 17:

$$V_7 - V_3 = \left(R_4 + \frac{1}{sC_2} + R_6 + R_5 \right) * i_5. \quad (17)$$

Nos nós V_2 e V_3 do circuito da Figura 1, têm-se as Equações 18 e ??, respectivamente:

$$i_1 = i_2 + i_3 + i_4, \quad (18)$$

Conforme explicado na Seção 1.1, a obtenção da função transferência se dá pela determinação inicial dos nós considerados de entrada e saída do circuito. Para a Figura 1, o gerador V_{in} é utilizado como entrada no nó V_1 . Neste circuito, foram considerados como nós acessíveis os terminais de saída dos AmpOp. Portanto, há três nós acessíveis para coleta de dados: o nó T_1 em V_3 , o nó T_2 em V_5 , e o nó T_3 em V_7 . As funções transferência se dão pela manipulação das equações apresentadas de forma encontrar uma relação entre V_3 , V_5 e V_7 , e V_{in} .

Utilizando as Equações 9 – 11 e 16 – ??, obtém-se a função transferência do circuito da Figura 1 em relação ao nó T_1 ($H^{(T_1)}(s)$), dada pela Equação 19:

$$H^{(T_1)}(s) = \frac{V_3}{V_{in}} = \frac{\frac{s}{R_1 * C_1}}{s^2 + \left(\frac{1}{R_2 * C_1}\right) * s + \left(\frac{R_5}{R_3 * R_4 * R_6 * C_1 * C_2}\right)}. \quad (19)$$

Utilizando a Equação 19, onde têm-se a relação de V_3 e V_{in} , e as Equações 12 e 13 obtém-se a função transferência do circuito 1 em relação ao nó T_2 ($H^{(T_2)}(s)$), dada pela Equação 20:

$$H^{(T_2)}(s) = \frac{V_5}{V_{in}} = \frac{\frac{1}{R_1 * R_4 * C_1 * C_2}}{s^2 + \left(\frac{1}{R_2 * C_1}\right) * s + \left(\frac{R_5}{R_3 * R_4 * R_6 * C_1 * C_2}\right)}. \quad (20)$$

Utilizando a Equação 20, onde têm-se a relação de V_5 e V_{in} , e as Equações 14 – 16 obtém-se a função transferência do circuito 1 em relação ao nó T_3 ($H^{(T_3)}(s)$), dada pela Equação 21:

$$H^{(T_3)}(s) = \frac{V_7}{V_{in}} = \frac{\frac{-R_5}{R_1 * R_4 * R_6 * C_1 * C_2}}{s^2 + \left(\frac{1}{R_2 * C_1}\right) * s + \left(\frac{R_5}{R_3 * R_4 * R_6 * C_1 * C_2}\right)}. \quad (21)$$

1.2.2 Circuito Butterworth

A Figura 2 mostra o Filtro de *Butterworth*. Este circuito é um filtro ativo de terceira ordem desenvolvido por (BUTTERWORTH, 1930). Neste filtro, a depender dos parâmetros, o circuito pode funcionar como um filtro passa-baixa, passa-faixa ou passa-alta, em diferentes tipos de corte. Portanto, possui alta flexibilidade de utilização por sua facilidade de manipulação. Este filtro é amplamente utilizado em aplicações biomédicas, uma vez que

os sinais devem primeiro ser amplificados e filtrados para posterior processamento (LEE; CHENG, 2009). O circuito é do tipo RC e Amplificadores Operacionais (*AmpOp*).

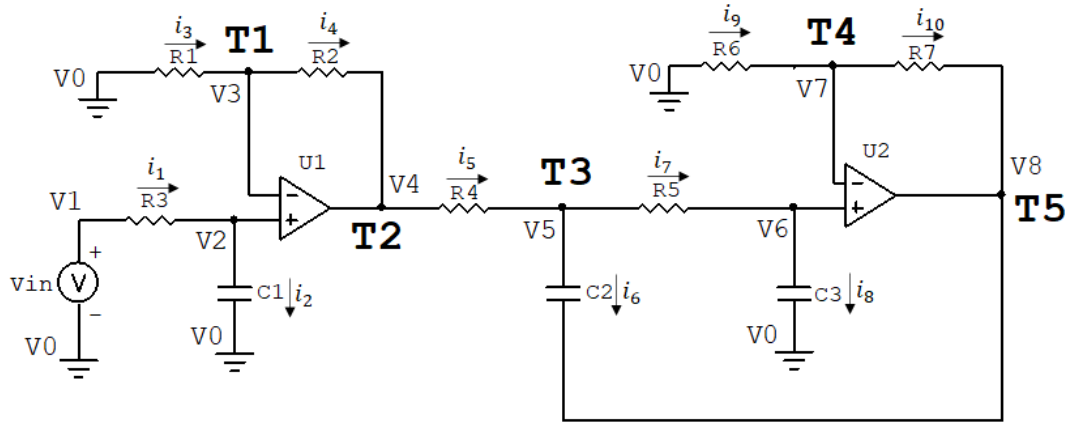


Figura 2: Filtro Butterworth.

Conforme Figura 2, o circuito possui $\mathbf{X} = [R_1 \ R_2 \ R_3 \ R_4 \ R_5 \ R_6 \ R_7 \ C_1 \ C_2 \ C_3]$ como componentes, $i_1 - i_{10}$ representam as correntes nos componentes, V_{in} a tensão de entrada e $V_0 - V_8$ as tensões nos nós dos circuitos.

A partir das análises nodal e em malha do circuito podemos obter a função transferência. Por convenção, os cálculos serão feitos de forma que os *AmpOp* são ideais, logo não há corrente nos terminais de entrada destes componentes. Pela Figura 2, obtemos as seguintes Equações, no domínio de Laplace:

$$V_0 = 0, \quad (22)$$

$$V_1 - V_0 = V_{in} \implies V_1 = V_{in}, \quad (23)$$

$$V_2 - V_0 = \frac{i_2}{sC_1} \implies V_2 = \frac{i_2}{sC_1}, \quad (24)$$

$$V_2 - V_1 = R_3 * i_1, \quad (25)$$

$$V_3 - V_0 = R_1 * i_3 \implies V_3 = R_1 * i_3, \quad (26)$$

$$V_4 - V_3 = R_2 * i_4, \quad (27)$$

$$V_5 - V_4 = R_4 * i_5, \quad (28)$$

$$V_6 - V_5 = R_5 * i_7, \quad (29)$$

$$V_6 - V_0 = \frac{i_8}{sC_3} \implies V_6 = \frac{i_8}{sC_3}, \quad (30)$$

$$V_7 - V_0 = R_6 * i_9 \implies V_7 = R_6 * i_9, \quad (31)$$

$$V_8 - V_5 = \frac{i_6}{sC_2}, \quad (32)$$

$$V_8 - V_7 = R_7 * i_{10}. \quad (33)$$

Pelas características dos *AmpOp*, observa-se que a corrente $i_1 = i_2$, as correntes $i_3 = i_4$, a corrente $i_7 = i_8$ e $i_9 = i_{10}$. Todas podem ser substituídas por i_1 , i_3 , i_7 e i_9 , respectivamente, no desenvolvimento dos cálculos. Baseando-se nas Equações 26, 27 e 28 obtém-se a Equação 34:

$$V_5 = (R_1 + R_2 + R_4) * i_3, \quad (34)$$

No nó V_5 do circuito da Figura 2, observa-se a Equação 35:

$$i_5 = i_6 + i_7. \quad (35)$$

Conforme explicado na Seção 1.1, a obtenção da função transferência se dá pela determinação inicial dos nós considerados de entrada e saída do circuito. Para o circuito da Figura 2, o gerador V_{in} é utilizado como entrada no nó V_1 . Neste circuito, há cinco nós acessíveis para coleta de dados: o nó T_1 em V_3 , o nó T_2 em V_4 , o nó T_3 em V_5 , o nó T_4 em V_7 e o nó T_5 em V_8 . As funções transferência se dão pela manipulação das equações apresentadas de forma encontrar uma relação entre V_3 , V_4 , V_5 , V_7 e V_8 , e V_{in} .

Utilizando as Equações 23 – 25, 29 – 35, obtém-se a função transferência do circuito da Figura 2 em relação ao nó T_1 ($H^{(T_1)}(s)$), dada pela Equação 36:

$$H^{(T_1)}(s) = \frac{V_3(s)}{V_{in}} = \frac{B_{(T_1,2)} * s^2 + B_{(T_1,1)} * s + B_{(T_1,0)}}{s^3 + B_2 * s^2 + B_1 * s + B_0}, \quad (36)$$

onde os fatores $B_{(T_1,0)} - B_{(T_1,2)}$ são definidos nas Equações 37 – 39, enquanto que os fatores $B_0 - B_2$ são definidos nas Equações 40 – 42.

$$B_{(T_1,0)} = \frac{1}{R_1 * R_4 * R_5 * C_1 * C_2 * C_3}, \quad (37)$$

$$B_{(T_1,1)} = -\frac{R_4 * R_7 * C_2 + (R_4 + R_5) * R_6 * C_3}{R_1 * R_5 * R_6 * C_1 * C_3}, \quad (38)$$

$$B_{(T_1,2)} = \frac{1}{R_1 * C_1}, \quad (39)$$

$$B_0 = \frac{1}{C_3 * C_2 * C_1 * R_1 * R_4 * R_5}, \quad (40)$$

$$B_1 = \frac{1}{R_4 * R_5 * C_2 * C_3} - \frac{R_7}{R_1 * R_5 * R_6 * C_1 * C_3} + \frac{R_4 + R_5}{R_1 * R_4 * R_5 * C_1 * C_2}, \quad (41)$$

$$B_2 = -\frac{R_7}{C_3 * R_5 * R_6} + \frac{R_4 + R_5}{R_4 * R_5 * C_2} + \frac{1}{C_1 * R_1}. \quad (42)$$

Utilizando a Equação 36, onde têm-se a relação de V_3 e V_{in} , e as Equações 26 e 27 obtém-se a função transferência do circuito 2 em relação ao nó T_2 ($H^{T_2}(s)$), dada pela Equação 43:

$$H^{T_2}(s) = \frac{V_4(s)}{V_{in}} = \frac{B_{(T_2,2)} * s^2 + B_{(T_2,1)} * s + B_{(T_2,0)}}{s^3 + B_2 * s^2 + B_1 * s + B_0}, \quad (43)$$

onde os fatores $B_{(T_2,0)} - B_{(T_2,2)}$ são definidos nas Equações 44 – 46, enquanto que os fatores $B_0 - B_2$ são definidos nas Equações 40 – 42.

$$B_{(T_2,0)} = \frac{(R_2 + R_3)}{R_1 * R_2 * R_4 * R_5 * C_1 * C_2 * C_3}, \quad (44)$$

$$B_{(T_2,1)} = \frac{1}{R_1 * R_2 * C_1} \left(-\frac{(R_2 + R_3) * R_7}{R_5 * R_6 * C_3} + \frac{R_2 + R_3 * R_5}{R_4 * C_2} + \frac{R_2 + R_3}{R_5 * C_2} \right), \quad (45)$$

$$B_{(T_2,2)} = \frac{1}{R_1 * C_1} \left(1 + \frac{R_3}{R_2} \right) .. \quad (46)$$

Utilizando a Equação 43, onde têm-se a relação de V_4 e V_{in} , e as Equações 27 e 28 obtém-se a função transferência do circuito 2 em relação ao nó T_3 ($H^{(T_3)}(s)$), dada pela Equação 47:

$$H^{(T_3)}(s) = \frac{V_5(s)}{V_{in}} = \frac{\left(\frac{(R_3+R_2)(1+R_5*C_3*s)}{R_1*R_2*R_4*R_5*C_1*C_2*C_3} \right)}{s^3 + B_2 * s^2 + B_1 * s + B_0}, \quad (47)$$

onde os fatores $B_0 - B_2$ são definidos nas Equações 40 – 42.

Utilizando a Equação 47, onde têm-se a relação de V_5 e V_{in} , e as Equações 29, 30 e 34 obtém-se a função transferência do circuito 2 em relação ao nó T_4 ($H^{(T_4)}(s)$), dada pela Equação 48:

$$H^{(T_4)}(s) = \frac{V_7(s)}{V_{in}} = \frac{\frac{R_3+R_2}{R_1*R_2*R_4*R_5*C_1*C_2*C_3}}{s^3 + B_2 * s^2 + B_1 * s + B_0}, \quad (48)$$

onde os fatores $B_0 - B_2$ são definidos nas Equações 40 – 42.

Utilizando a Equação 48, onde têm-se a relação de V_7 e V_{in} , e as Equações 31 – 33 obtém-se a função transferência do circuito 2 em relação ao nó T_5 ($H^{(T_5)}(s)$), dada pela Equação 49:

$$H^{(T_5)}(s) = \frac{V_8(s)}{V_i} = \frac{\frac{(R_2+R_3)*(R_6+R_7)}{R_1*R_2*R_4*R_5*R_6*C_1*C_2*C_3}}{s^3 + B_2 * s^2 + B_1 * s + B_0}, \quad (49)$$

onde os fatores $B_0 - B_2$ são definidos nas Equações 40 – 42.

1.3 Considerações Finais

Neste capítulo foram abordados conceitos básicos sobre análises de circuito a serem empregadas nesta dissertação, além do emprego destas técnicas nos cálculos das funções transferência nos Filtros de segunda ordem Biquad de Tow-Thomas e de terceira ordem de Butterworth. A técnica utilizada como referência neste projeto consiste da utilização das funções transferência dos nós acessíveis dos circuitos estudados nesse capítulo.

O objetivo desta dissertação é a aplicação da função transferência em conjunto com técnicas de otimização de inteligência de enxame para identificar melhor solução para os parâmetros dos componentes do circuito a partir dos valores das tensões medidas nos nós acessíveis. O próximo capítulo apresenta as técnicas de otimização que serão aplicadas para efeito de diagnóstico de falhas nos componentes do circuito.

Capítulo 2

TRABALHOS RELACIONADOS

ESTE capítulo apresenta alguns trabalhos relacionados ao problema de diagnóstico e detecção de falhas em circuitos eletrônicos analógicos. Entende-se como falha o desvio no valor de um componente do circuito de seu valor nominal, o que leva a uma falha de todo o circuito (VASAN; LONG; PECHT, 2013). As falhas podem ser catastróficas (quando o circuito apresenta comportamento aberto ou curto) ou paramétrico (quando ocorre degradação de algum componente, por exemplo).

A Seção 2.1 aborda alguns trabalhos que utilizaram técnicas de análise de circuito para o diagnóstico de falhas. A Seção 2.2 cita alguns trabalhos que utilizaram ferramentas de classificação como técnica para o diagnóstico de falhas. A Seção 2.3 apresenta alguns trabalhos que utilizaram ferramentas de otimização e cita exemplos das metodologias desenvolvidas para a detecção e identificação das falhas em circuitos eletrônicos analógicos. A Seção 2.4 contém as considerações finais sobre o capítulo apresentado.

2.1 Abordagem com Técnicas de Análise de Circuitos

O uso cada vez maior de equipamentos eletrônicos vem trazendo uma maior necessidade de desenvolver novas técnicas de diagnóstico eficazes para melhorar ainda mais a confiabilidade nos dispositivos (TADEUSIEWICZ; HALGAS, 2019). Embora muitas técnicas tenham sido criadas nos últimos anos, o problema permanece em aberto e novos métodos ainda se fazem necessários (HAN; LI, 2013). O objetivo desta dissertação é desenvolver uma técnica eficiente para o diagnóstico de falhas em componentes eletrônicos em circuitos analógicos.

Em (TADEUSIEWICZ; KORZYBSKI, 2000), foi desenvolvido um método para localização de falhas e identificação de parâmetros em circuitos lineares de Corrente Alternada (CA) e Corrente Contínua (CC). Este método requer análises de circuito com parâmetros

nominais e excitações distintas com o objetivo de medir as tensões em nós no circuito. Para identificar a falha, foi utilizada uma fórmula obtida a partir do artifício matemático conhecido como *Woodbury Matrix Identity*. A eficácia desta metodologia depende da quantidade de nós acessíveis para medição e das diferenças de tensões dos nós nos circuitos nominais e perturbados. Para esta última, pode ocorrer de a diferença de tensão ser tão pequena que não pode ser medida.

Em (TADEUSIEWICZ; HALGAS; KORZYBSKI, 2002), é proposto um método que permite realizar o diagnóstico de falhas em circuitos CA e CC lineares analógicos, bem como de circuitos CC não lineares com pontos de teste limitados. O diagnóstico inclui teste de falha suave dos circuitos e identificação dos elementos com falha. O método é baseado na aproximação linear de relações não lineares, portanto, funciona se as variações dos parâmetros forem pequenas o suficiente e requer a análise de dois circuitos que diferem em excitações um do outro. Não há garantia de que, em todos os casos, os componentes defeituosos serão identificados. Às vezes, o conjunto de elementos possivelmente defeituosos, obtido pelo método, é maior do que o conjunto de elementos realmente defeituosos.

Em (GUO; SAVIR, 2003), é proposto um *Coefficient-Based Test* (CBT) para detectar a existência de falhas paramétricas em circuitos analógicos. Foi utilizado método de estimativa (*Monte-Carlo Simulation*) para determinar se algum coeficiente da função transferência do circuito estaria ou não fora da faixa de operação. Se qualquer coeficiente for encontrado fora de sua faixa, o circuito é declarado com falha. Este método foi baseada no conceito de *Nearly Minimum-Size Detectable Fault* (NMSDF), que é o tamanho mínimo do parâmetro do componente, resultante de pelo menos um dos coeficientes da função transferência esteja fora dos limites da tolerância. Portanto, esta metodologia só identifica falhas se a quantidade for maior que a o valor NMSDF. Ou seja, um circuito que passar no teste como sem falhas poderá ter uma pequena porcentagem de falha que não foi identificada.

Em (BHATTACHARYA; RAGAMAI; KUMAR, 2017), é apresentada uma abordagem para o diagnóstico de falhas em circuitos analógicos que utiliza os recursos de modelagem em MATLAB/Simulink. Os circuitos são modelados em duas situações: sem e com falhas. Utilizando o gráfico de fluxo de sinal, aplica-se um estímulo teste de entrada e identifica-se a presença de falhas comparando a tensão máxima medida na saída em relação a um limite predefinido. A escolha da tensão limite para detectar falhas é um dos parâmetros-

chave nesta abordagem. Quanto menor o limite de tensão, maior é a chance de detecção de falha. Mas se for comparável com a tensão de ruído, um circuito sem falha pode ser interpretado como um com defeito.

Em (TADEUSIEWICZ; HALGAS, 2020), foi desenvolvido um método para diagnóstico de falhas leves de circuitos analógicos lineares e concentra-se nos circuitos que apresentam transportadores de corrente (*current conveyors*). Este método explora testes de medição em estado CA e utiliza programação não linear como ferramenta matemática. O método demonstrou-se eficaz para o diagnóstico de falha única, no entanto apresenta menor eficácia para o caso de múltiplas falhas.

2.2 Abordagem com Técnicas de Classificação

Nas abordagens tradicionais, para o diagnóstico de falhas é necessário o conhecimento prévio do modelo para o padrão de sinal. Já nas abordagens baseadas no conhecimento, o diagnóstico de falhas é feito com base nos dados históricos disponíveis e com o auxílio do classificadores (BINU; KARIYAPPA, 2017).

Em (BILSKI; WOJCIECHOWSKI, 2016), o objetivo é apresentar uma estratégia para encontrar um conjunto mínimo de nós para o diagnóstico de sistemas analógicos complexos com falhas paramétricas únicas utilizando classificador *Support Vector Machine* (SVM) como localizador de falhas. Nesta metodologia, também é utilizado o método de Busca Tabu em conjunto com Algoritmos Genéticos. Foi observado que a ferramenta de classificação mais eficiente em procedimentos de diagnóstico de sistemas analógicos complexos é o classificador SVM equipado com Kernels Gaussianos.

Em (AIZENBERG et al., 2021), é apresentada uma técnica de abordagem constituída em três etapas: cálculo de testabilidade, localização e identificação da classe de falha, e estimativa do valor com componente defeituoso. A utilização do *MultiLayer Neural Network with Multi-Valued Neurons* (MLMVN) como classificador permitiu associar o componente defeituoso à respectiva falha de forma muito precisa. Neste artigo, é realizada a comparação de resultados entre as técnicas de classificação SVM e MLMVN, sendo o MLMVN de melhor eficácia. O método SVM foi escolhido por representar a técnica de aprendizado de máquina mais utilizada na área de classificação.

Em (REN et al., 2020), foi desenvolvido um algoritmo para diagnóstico de falhas transitórias baseadas na classificação de características e aplicado na instalação de laser de

alta potência. Foi utilizado o algoritmo *Autoencoder Network*, que apresenta três camadas: codificação, escondida e decodificação. A camada de codificação capta os parâmetros, que são tratados na camada escondida. A camada de decodificação é utilizada para classificar o tipo de saída do sistema, identificando a presença de falhas no sistema. Este método proposto foi comparado com outros dois métodos: *Linear Support Vector Machine and Principal Component Analysis Method* (LSVM-PCA) e *Kernel Support Vector Machine and PCA Method* (KSVM-PCA), onde a função kernel utilizada foi *Radial Basis Function*. Como resultado final, o LSVM-PCA teve uma acurácia de 67,87%, o KSVM-PCA teve uma acurácia de 89,15% e, o método proposto, *Autoencoder Network* teve uma acurácia de 95,5%.

Em (SHI et al., 2020b), é apresentado um método combinado para diagnóstico de falhas em circuitos analógicos baseado em matrizes de dependência e classificadores inteligentes. A matriz de dependência foi calculada pelos coeficiente de sensibilidade para os nós acessíveis. Neste artigo, foram utilizados três tipos de classificadores para efeito de comparação: *Backpropagation Neural Network*, *K-Nearest Neighbors* (KNNs) e *Random Forest* (RF). O objetivo principal deste método é obter grupos de ambiguidades preliminares através da construção de uma matriz de dependência, para obter um resultado diagnóstico mais preciso usando vários classificadores inteligentes simples. Neste método, um novo algoritmo e otimização no ponto de teste é proposto para simplificar os nós de entrada, e o classificador é construído para cada grupo de ambiguidade separável. Como resultado, foi observado que o método teve uma taxa de classificação de 100% correta utilizando qualquer dos três tipos de classificadores.

Em (ARABI et al., 2019), é apresentada uma abordagem para a classificação de falhas em circuitos analógicos usando um classificador de sistema de *Adaptive Neuro Fuzzy Interface System* (ANFIS). Os recursos utilizados nessa abordagem foram extraídos a partir da resposta em frequência do circuito em teste em condições de com e sem falhas. As falhas consideradas foram variações dos valores de resistência e capacitância em relação aos valores nominais. Neste artigo, houve comparação entre o método desenvolvido e a utilização de *MultiLayer Perceptron* (MLP) otimizado pelo algoritmo *Levenberg-Marquadt Backpropagation* (LM-BP). Como resultado, ANFIS obteve melhores taxas de acurácia em relação ao MLP.

Em (BINU; KARIYAPPA, 2018), é apresentada uma técnica para o diagnóstico de falhas em circuitos analógicos, propondo um algoritmo de otimização, denominado *Rider Optimization Algorithm* (ROA). O desenvolvimento do ROA é baseado em um grupo de pilotos, correndo em direção a um local de destino. Além disso, um classificador, denominado RideNN, é desenvolvido incluindo o algoritmo proposto como o algoritmo de treinamento para a ROA. A adoção do classificador RideNN proposto no diagnóstico de falhas resultou em um modelo de diagnóstico de falhas, que envolveu o PCA e o coeficiente de Bhattacharyya. O desempenho da técnica proposta foi comparado com oito métodos existentes, tendo obtido uma acurácia entre 95 e 99,9% nos circuitos testados.

O método tradicional de diagnóstico de falhas baseado em classificadores depende muito do conhecimento prévio completo das falhas existentes e frequentemente requer cálculos complexos de eliminação de ruído. No entanto, em aplicações práticas, é difícil obter os dados completos do estado de falha, especialmente dados do estado de degradação, com antecedência. Isso reduz a precisão da classificação de novos estados desconhecidos e limita severamente o diagnóstico de falhas. Em (SHI et al., 2020a), foi apresentado um método de diagnóstico de falha de circuito analógico e método de reconhecimento de estado desconhecido com base em clustering de pico de densidade e *Voting Probabilistic Neural Network* (VPNN). Também foram utilizadas técnicas de reconhecimento de padrões, como KNN, e procedimentos de agrupamento de pico de densidade para determinar automaticamente o número de novas classes de neurônios.

Em (YUAN et al., 2017), é apresentado um método para diagnóstico de falhas de circuitos analógicos baseado na combinação de *Kernel Entropy Component Analysis* (KECA) aprimorado e *Extreme Learning Machine* (ELM). KECA é um Kernel para redução de dimensão. É um método para extrair recursos e realizar a redução de dimensão preservando a maior parte da entropia de Renyi. ELM é uma proposta para redes neurais *feed-forward* de camada oculta única, o que leva a um treinamento de rede rápido, exigindo pouca supervisão humana. Este artigo faz uma comparação de resultados utilizando o KECA e o método proposto, KECA combinado com ELM. A taxa de acurácia do KECA foi de 97,49%, enquanto que a taxa de acurácia do método proposto neste artigo, KECA + ELM, foi de 99,32%.

Em (DENNIS; KARIYAPPA, 2018), é proposto uma técnica de isolamento automático de falhas utilizando a *Multi-Support Vector Neural Network* (Multi-SVNN). Existem

três etapas principais envolvidas no isolamento de falhas, como processamento, extração de recursos e classificação. O processamento e a normalização do sinal são feitos usando *Linear Predictive Coding* (LPC) e *Probabilistic Principal Component Analysis* (PPCA) para desenvolver o vetor de características, que atua como entrada para o classificador Multi-SVNN proposto, isolando o componente defeituoso no circuito analógico. O método obteve 92,42% de acurácia quando utilizado 90% da base de dados como treino.

Em (VASAN; LONG; PECHT, 2013), foi proposto um método para detectar a condição de circuito com falha, isolar a localização da falha e prever o desempenho útil restante dos circuitos analógicos. Através do refinamento sucessivo da resposta do circuito a um sinal de varredura, recursos são extraídos para diagnóstico de falha. O problema de diagnóstico de falha é colocado e resolvido como um problema de reconhecimento de padrão usando métodos de kernel. A partir dos recursos extraídos, um *Fault Indicator* (FI) é desenvolvido para o prognóstico de falha. Além disso, um modelo empírico é desenvolvido com base na tendência de degradação exibida pelo FI. O método desenvolvido demonstrou 99% de diagnosticabilidade mesmo com flutuação do componente dentro de uma faixa de tolerância, e com valores de falha que não são vistos durante a fase de treinamento. Esses resultados indicam que o método desenvolvido é robusto e é capaz de fornecer informações confiáveis durante a operação.

Em (HAN; LI, 2013), é apresentado um método de diagnóstico de falha de circuito analógico baseado em uma combinação de *Particle Swarm Optimization* (PSO) com RNA. No processo de treinamento, é utilizado o algoritmo de enxame de partículas de peso de inércia decrescente linear para otimizar os pesos iniciais da rede *Backpropagation*. O método proposto foi superior ao algoritmo tradicional do *Backpropagation*, uma vez que apresentou uma alta taxa de convergência e precisão de diagnósticos.

Em (DENG; ZHOU, 2020), foi proposto um algoritmo hierárquico de Levenberg-Marquardt (LM) - *Discrete Volterra Series* (DVS) aprimorado. O DVS é um método comum de extração de recursos, no entanto é difícil calcular seus parâmetros. Neste novo algoritmo, o DVS é simplificado com base na simetria hierárquica dos parâmetros de memória. A estratégia LM é usada para otimizar os coeficientes. Além disso, um critério de informação Bayesiano baseado na simetria de entropia é introduzido para a seleção de ordem. Para o diagnóstico de falhas, foi proposto um método de diagnóstico de falha combinando o algoritmo DVS melhorado e um algoritmo de vizinho mais próximo

condensado. O método aprimorado neste estudo é útil para simplificar o cálculo dos parâmetros DVS de falhas de circuito em sistemas eletrônicos analógicos.

Em (HE et al., 2018), é proposto um método com um extrator de características baseado em *Cross-Wavelet Singular Entropy* (XWSE) e uma SVM para o diagnóstico de falhas em circuitos analógicos. O método XWSE tem uma melhor capacidade de extrair efetivamente características essenciais dos sinais de falha analisados, e os resultados apresentam que o algoritmo proposto oferece grande potencial em relação a diferença entre as diferentes classes de falhas. As características da falha são inseridas no classificador SVM para localizar defeitos dos circuitos em que os parâmetros livres de SVM são determinados por *Quantum-behaved Particle Swarm Optimization* (QPSO), que é um algoritmo heurístico que apresenta taxa de convergência mais rápida e melhor do que outros métodos. O modelo apresentado pode alcançar um desempenho de classificação desejável em circuitos lineares, bem como em circuitos não lineares.

Em (YIGANG et al., 2018), os autores propuseram um esquema de extração de características baseado em *Cross-Wavelet Transform* (XWT) e *Variational Bayesian Matrix Factorisation* (VBMF). Os sinais de falha adquiridos de circuitos defeituosos são coletados e processados usando a XWT para obter a representação de tempo-frequência conjunta. O VBMF é utilizado para buscar as informações de tempo-frequência do sinal de falha. Um vetor de recursos nove dimensional é então construído. Finalmente, uma SVM otimizada por um algoritmo de polinização de flores é introduzida para localizar falhas. Esta proposta pode ser aplicada em circuitos lineares e não lineares.

Em (SHI; HE; WANG, 2019), os autores propõe a utilização de *Decision Tree* para o diagnóstico de falhas em circuitos elétricos analógicos. No entanto, para aumentar a precisão e a eficiência da árvore de decisão, foi proposta a utilização de duas árvores melhoradas: Árvore de decisão baseada na validação do *cluster* (*Cluster Validity based Decision Tree* - CV-DT) e a Árvore de decisão baseada na taxa de falha (*Cluster Validity based Decision Tree* - FR-DT). A CV-DT é construída por um algoritmo aprimorado considerando o índice de validade de *cluster*. Este método seleciona os atributos de divisão com maior credibilidade de classificação e aumenta a precisão do diagnóstico. Já o FR-DT, que é construído por um algoritmo aprimorado considerando as taxas de falha, não considera apenas a capacidade de particionamento de cada atributo, mas também considera a prioridade de isolamento de falhas com taxas de falha mais altas.

Em (JING; YING, 2018), é proposto um método baseado no *Sine Cosine Algorithm* (SCA) para o diagnóstico de falhas leves em circuitos analógicos com tolerância. SCA é um tipo de PSO. No algoritmo SCA, quando o valor absoluto da função seno ou cosseno é maior que 1, o algoritmo realiza exploração global, enquanto que quando o valor absoluto da função seno ou cosseno está entre -1 e 1, o algoritmo realiza o desenvolvimento local. O algoritmo SCA-SVM pode alcançar maior precisão de classificação mesmo quando o número de amostras é pequeno. Neste artigo, foi observado que tanto a velocidade de iteração do algoritmo quanto a taxa de precisão da classificação são melhores do que o SVM otimizado pelos algoritmos *Genetic Algorithm* (GA) e PSO. A taxa de precisão da classificação no conjunto de teste é de 99,1667%.

2.3 Abordagem com Técnicas de Otimização

A abordagem de inteligência também é chamada de abordagem de diagnóstico de falhas baseado em dados. É categorizada em técnicas baseadas em transformação, técnicas baseadas em otimização, técnicas de aprendizado de máquina, técnicas híbridas e técnicas baseadas em regras (BINU; KARIYAPPA, 2017).

Em (ZHOU; SHI, 2009), é proposto um método de diagnóstico de falha simples suave para circuito analógico com tolerância baseado em *Particle Swarm Optimization* (PSO). O erro do parâmetro dos elementos do circuito é definido como o elemento da partícula. As equações incrementais de tensão do nó baseadas na análise de sensibilidade são construídas como restrições de uma equação de programação linear. Através da indução do coeficiente de penalidade, a equação *Linear Programming* (LP) é definida como a função de adequação para o programa PSO.

Em (YU; HE; GAO, 2016), é apresentado um método recursivo para calcular sensibilidades de ordem superior de tensões de nó de circuitos eletrônicos analógicos. A identificação de falhas é obtida pela solução das equações relacionadas aos desvios dos elementos, encontradas a partir do cálculo dos coeficientes de sensibilidade. Para encontrar a solução das equações, foi utilizada a técnica de Otimização por Enxame de Partícula (*Particle Swarm Optimization* - PSO).

Em (KARTHI; SHANTHI; BHUVANESWARI, 2014), é apresentado um novo método para diagnóstico de falhas paramétricas em circuitos analógicos baseado na função de transferência do circuito em teste. O GA é usado para otimizar os parâmetros do sistema

definidos no cromossomo. Neste método, cada parâmetro do sistema é composto por vários componentes. Os componentes são agrupados em módulos adequados. Em seguida, o algoritmo genético é usado para projetar o filtro usando parâmetros do sistema e também para diagnosticar a falha e localizar a falha no nível do módulo.

Em (YANG; ZHEN; HU, 2019), uma simulação baseada em GA após o método de diagnóstico de falha de teste é proposta. O diagnóstico de falhas se transforma em um problema de otimização. Os genes representam os valores dos parâmetros de potenciais componentes defeituosos. A resposta defeituosa do circuito é o objetivo. O objetivo foi minimizar a diferença entre a resposta com falha real e a resposta simulada do GA. O cromossomo que minimiza a diferença dá a solução. Este método não salva todas as falhas possíveis com antecedência, embora possa diagnosticar todos os valores de falhas contínuas.

Em (YANG, 2020), a identificação de parâmetros com falha é importante para a previsão da vida útil restante do circuito em teste. Com base na função de transferência do circuito, utiliza-se a resposta com falha medida para deduzir os possíveis parâmetros com falha. Sabe-se que a resposta da otimização é função dos parâmetros analógicos. Normalmente, o número de respostas independentes é muito menor do que a quantidade de componentes analógicos. As equações subdeterminadas têm soluções infinitas, ou seja, existem muitas combinações de parâmetros analógicos que podem gerar a mesma resposta com falha. O método proposto utiliza o GA. O comprimento do cromossomo é igual ao número do componente analógico. Cada gene representa o valor do parâmetro de um componente. Com base nos valores do gene e na função de transferência, cada indivíduo tem uma resposta simulada. O objetivo é encontrar todos os indivíduos possíveis que minimizam a diferença entre a resposta com falha simulada e medida.

2.4 Considerações Finais

Neste capítulo foram apresentados, de maneira breve, trabalhos relacionados ao diagnóstico de falhas em circuitos eletrônicos analógicos. Foram apresentados trabalhos em três abordagens diferentes: Análise de Circuito, Classificação e Otimização. Em todas as abordagens, observou-se que a maioria dos trabalhos apresentados buscava métodos para aquisição de dados que permitem a verificação das falhas, seja pelo cálculo dos coeficientes de sensibilidade, medição de tensão nos nós acessíveis ou criação de dicionário.

Qualquer metodologia que seja desenvolvida, em qualquer que seja a abordagem, busca a otimização e, em seguida, tratamento dos dados obtidos nos circuitos analógicos. Nos próximos capítulos serão analisadas, em detalhe, algumas ferramentas para o diagnóstico de falhas com uma abordagem de otimização, com o objetivo de transformar o problema de diagnóstico de falha em um problema de otimização.

Capítulo 3

TÉCNICAS DE INTELIGÊNCIA DE ENXAME

INTELIGÊNCIA de enxame (*Swarm Intelligence* - SI) é baseada no comportamento coletivo de sistemas descentralizados e auto-organizáveis, sendo naturais ou artificiais. Colônias de formigas, cardumes de peixes, bandos de pássaros, enxames de abelhas, colônia de morcegos são exemplos de SI naturais. Enxames são sistemas multi-robôs, onde alguns programas de computador são usados para resolver problemas de otimização e análise de dados (DORIGO; BIRATTARI, 2007).

A Seção 3.1 revisa algumas das definições básicas relacionadas a esta tese. A Seção 3.2 aborda a otimização por enxame de partículas baseada em uma estratégia inspirada no voo dos pássaros. A Seção 3.3 apresenta a técnica de otimização inspirada no comportamento de busca dos morcegos. Por fim, na Seção 3.4, são elencadas as considerações finais a respeito das técnicas de busca otimizada utilizadas nesta dissertação.

3.1 Otimização

(RAO, 2019) define otimização como a solução mais adequada para um determinado problema, respeitando as suas características. O objetivo de uma otimização é selecionar o melhor elemento de um conjunto de alternativas disponíveis de modo a maximizar ou minimizar a uma determinada função, respeitando suas características. Os problemas de otimização podem ser lineares ou não lineares, sendo os não lineares com maior complexidade de obter solução. Os problemas de otimização possuem características comuns, tais como função objetivo, otimização irrestrita e restrita.

Problemas de otimização, geralmente, possuem soluções da funções objetivo que mudam ao longo do tempo, chamada de posição ótima (x^*). Esse tipo de problema foi

definido por (ENGELBRECHT, 2004), de acordo com a Equação 50

$$\min_x f(x, \varpi(t)), x = (x_1, x_2, \dots, x_n), \varpi(t) = (\varpi_1(t), \varpi_2(t), \dots, \varpi_n(t)), \quad (50)$$

onde n é o número de dimensões, x_n é a posição x na dimensão n e ϖ_n é um parâmetro de controle da função objetivo, dependente do tempo. Quando atingido o objetivo, é obtido o valor $x^*(t)$ que é o melhor valor da posição x no tempo t .

Problemas de otimização podem não apresentar características restritivas aos valores atribuídos às variáveis do problema. Quando não há restrição, as variáveis podem percorrer todo o espaço de busca para encontrar a melhor solução. (ENGELBRECHT, 2004) define esse tipo de problema como otimização irrestrita, conforme Equação 51

$$\min_x f(x), x = (x_1, x_2, \dots, x_n), \forall x \in R^n. \quad (51)$$

Muitos problemas de otimização requerem que as variáveis satisfaçam a certas restrições, limitando o espaço de busca disponível para atingir o objetivo. (EVERS; GHALIA, 2009) define esse tipo de problema como otimização restrita, utilizando a Equação 51 respeitando as restrições apresentadas na Equação 52

$$\text{Restrito a } \begin{cases} g_m(x) \leq 0, m = 0, 1, \dots, n_g \\ h_m(x) = 0, m = 0, 1, \dots, n_h, \end{cases} \quad (52)$$

onde n_g é a quantidade de inequações de restrição e n_h é a quantidade de equações de restrição do problema. O Algoritmo 1 apresenta uma versão canônica de aplicação de restrição em problemas de otimização.

Algorithm 1 Restrição

```

Atualize  $x_n$  com nova posição
para  $j := 1 \rightarrow n$  faça
  se  $x_j \leq x_{min_j}$  ou  $x_j \geq x_{max_j}$  então
    Atualize  $x_j$  com nova posição
  fim se
  se  $g_m(x) \leq 0$  então
    Atualize  $x_j$  com nova posição
  fim se
  se  $h_m(x) = 0$  então
    Atualize  $x_j$  com nova posição
  fim se
fim para
retorna Posição  $x$  atualizada
  
```

Há diversas técnicas que são utilizadas para atualização da posição quando esta encontra-se fora do espaço de busca. Realocação randômica dentro do espaço de busca, valor médio, valor absoluto, valor máximo. Estas são algumas técnicas mais utilizadas na atualização da posição.

Critérios de parada são parâmetros da implementação que são usados para encerrar o processo de busca iterativa. A seguir são apresentados alguns critérios de parada:

- Número de iterações: Se não houver um correto dimensionamento deste parâmetro, o processo de busca poderá se encerrar antes que o resultado ótimo seja atingido;
- Diferença na qualidade: O processo pode ser encerrado se não houver uma melhora significativa em várias iterações. Por exemplo, o processo pode ser considerado terminado se a mudança média das posições das partículas for muito pequena ou a velocidade média das partículas for aproximadamente zero em várias iterações;
- Objetivo alcançado: O processo pode ser considerado encerrado se a otimização encontrar uma solução ótima que minimiza a função objetivo da Equação 50.

Em seguida são apresentadas duas técnicas de busca otimizada que são aplicadas aos problemas de diagnóstico de falhas em circuitos analógicos. São apresentados os algoritmos canônicos e um breve histórico do emprego dos mesmos para resolver problemas de alta complexidade, para os quais a resolução usando busca exaustiva é inviável.

3.2 Otimização por Enxame de Partículas

A técnica de busca Otimização por Enxame de Partículas (*Particle Swarm Optimization* - PSO), proposta em (KENNEDY; EBERHART, 1995), foi inspirada pelo comportamento coletivo de grupos de animais, mais especificamente bandos de pássaros. As aves voam agrupadas por longas distâncias, geralmente atraídas por fontes de alimento. Elas possuem uma interação social que, mesmo havendo mudanças bruscas de direção, evitam colisões entre si; quando da presença de predadores, têm a característica de se espalharem e de reagruparem rapidamente; assim como possuem uma capacidade de evitar predadores. Essas interações permitem que cada indivíduo do bando faça ajustes de posição e de velocidade baseando-se no princípio da proximidade.

Se um dos pássaros descobre um caminho onde há uma maior facilidade para atingir o objetivo, os outros componentes do grupo tendem a acompanhar a trajetória

(REYNOLDS, 1987). Esta técnica permite a otimização global de uma função objetivo. É utilizado um conjunto de partículas, sendo cada uma delas representada por uma solução potencial do problema. Cada partícula é modelada pelas suas coordenadas de posição no espaço de busca referente à aplicação, sendo geralmente multidimensional.

O termo partícula denota um indivíduo do enxame, ou seja, a uma ave membro de um bando. No contexto dos algoritmos baseados em inteligência de enxame, PSO é uma abordagem estocástica originalmente utilizada para resolver problemas contínuos de otimização não-linear. Analogamente a um bando, que é um grupo de aves que interagem entre si, um enxame se refere a um conjunto de partículas que interagem entre si na busca de um melhor caminho para cumprir o objetivo. Cada partícula representa uma solução do problema de otimização.

3.2.1 Algoritmo

Uma versão canônica do algoritmo do PSO é apresentada pelo Algoritmo 2. Nesta versão, todas as partículas socializam entre si para trocarem suas melhores experiências.

Algorithm 2 Algoritmo PSO

Crie e inicialize um enxame x com n partículas

repita

para $i := 1 \rightarrow n$ **faça**

 Calcule a qualidade da partícula x_i usando a Equação 50

se $qualidade(x_i) \leq Pbest_i$ **então**

 Atualize $Pbest_i$ com nova posição

fim se

se $Pbest_i \leq Gbest$ **então**

 Atualize $Gbest$ com nova posição

fim se

 Atualize a velocidade da partícula usando a Equação 56

 Controle da velocidade

 Atualize a posição da partícula usando a Equação 55

 Confine a partícula usando o Algoritmo 1

fim para

até Condição de parada

retorna Melhor resultado

O primeiro passo do algoritmo é a distribuição das partículas no espaço de busca e inicialização dos parâmetros, tais como o número de dimensões d , a quantidade de partículas n , e as posições x e velocidades v referente a cada dimensão. Um método proposto em (ENGELBRECHT, 2005) inicializa os valores das posições randomicamente no

espaço de busca e inicializa a velocidade, com valor nulo, conforme Equações 53 e 54

$$x_i(0) = x_{min,i} + r_i(x_{max,i} - x_{min,i}), \quad (53)$$

$$v_i(0) = 0, \quad (54)$$

onde i representa a dimensão da partícula, x_{min} e x_{max} os valores mínimo e máximo do espaço de busca e r_i é um fator randômico entre $[0,1]$. O valor de $Pbest$ também é inicializado com a melhor posição da partícula no instante $t = 0$.

Após a inicialização dos parâmetros, o algoritmo entra no processo iterativo enquanto não atinge a condição de parada, onde a qualidade de cada partícula é testada. Caso a qualidade seja melhor que a posição anterior, é realizada a atualização da partícula ($Pbest$) em cada uma das dimensões. Em seguida, é realizada atualização da melhor posição do enxame ($Gbest$), caso a qualidade da partícula seja a melhor em relação a todas as partículas do enxame.

3.2.2 Movimento das Partículas

A atualização da posição da partícula i do enxame é realizada conforme Equação 55:

$$x_i(t) = x_i(t - 1) + v_i(t), \quad (55)$$

onde $x_i(t)$ representa a próxima posição da partícula, $x_i(t - 1)$ a posição atual e $v_i(t)$ representa a velocidade.

A velocidade de deslocamento é obtida baseando-se 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 um melhor lugar encontrado no passado. A componente social modela a memória coletiva do enxame e a tendência de se dirigir a lugares em relação a um grupo de partículas. O modelo de cálculo da velocidade da partícula i é dada pela Equação 56:

$$v_{ij}(t) = \varphi_0 v_{ij}(t - 1) + \varphi_1 r_{1j}(t)(y_{ij}(t) - x_{ij}(t - 1)) + \varphi_2 r_{2j}(t)(g_j(t) - x_{ij}(t - 1)), \quad (56)$$

onde φ_0 é chamado de coeficiente de inércia, r_{1j} e $r_{2j} \in [0,1]$ são valores aleatórios, φ_1 e φ_2 são os pesos referentes às componentes cognitiva e social, respectivamente, y_{ij} é a coordenada referente à dimensão j da melhor posição visitada pela partícula i no

passado e g_j é a coordenada referente à dimensão j da melhor posição atingida no passado, considerando todas as partículas do enxame. No Algoritmo 2, y_i e g são denominadas $Pbest_i$ e $Gbest$, respectivamente. Note que o cálculo da velocidade é baseado em três termos, que são:

- A velocidade anterior ponderada, $\varphi_0 v_{ij}(t)$, que é como a memória da direção do movimento no passado recente. É também conhecida como a Componente de Inércia.
- O componente cognitivo, $\varphi_1 r_{1j}(y_{ij} - x_{ij}(t))$, quantifica o desempenho da partícula i em relação aos desempenhos anteriores. Essa componente atrai a partícula para a melhor posição no passado.
- A componente social, $\varphi_2 r_{2j}(g_j - x_{ij}(t))$, quantifica o desempenho da partícula em relação ao desempenho da sua vizinhança. Este termo atrai a partícula para a melhor posição encontrada pelo grupo de partículas.

3.2.3 Topologias

A vizinhança de uma partícula é formada pelas partículas que irão contribuir na obtenção da melhor solução do grupo, usada na componente social da Equação 56. Diferentes tipos de topologia podem ser usadas conforme Figura 3. A Figura 3.3(a) exhibe a topologia em anel, cujo fluxo de informações flui mais lentamente através da componente social. A troca de informações entre partículas ocorre apenas na vizinhança imediata, tendo como consequência uma menor taxa de convergência.

Na topologia em círculo, Figura 3.3(b), a troca de informação ocorre em uma partícula específica, chamada de central, com as demais partículas do grupo. O desempenho da melhor partícula é passado para a central, que passa a influenciar todas as demais. Essa topologia reduz a possibilidade de convergência em um ótimo local.

Na topologia *cluster*, as partículas são distribuídas e conectadas conforme Figura 3.3(c). Cada cluster se comunica um com o outro através de apenas uma partícula. Esta pode ser vista como um informante. Assim, as informações sobre as melhores soluções que são encontradas por um determinado cluster fluem para os demais por meio de uma informante. As partículas selecionadas de cada cluster se comunicam sempre com a mesma partícula dos outros clusters. Por outro lado, as partículas dentro de um aglomerado estão totalmente conectadas a todas as outras partículas do mesmo grupo.

A Figura 3.3(d) apresenta a topologia em estrela, em que a vizinhança é formada por todas as partículas do enxame. Nesta topologia, as partículas movimentam-se no espaço de busca e suas posições são ajustadas de acordo com a sua própria experiência e das demais partículas, o que resulta em uma rápida taxa de convergência, apesar de poder convergir para um mínimo local no caso de o objetivo ser multimodal. Esta topologia é a utilizada no Algoritmo 2.

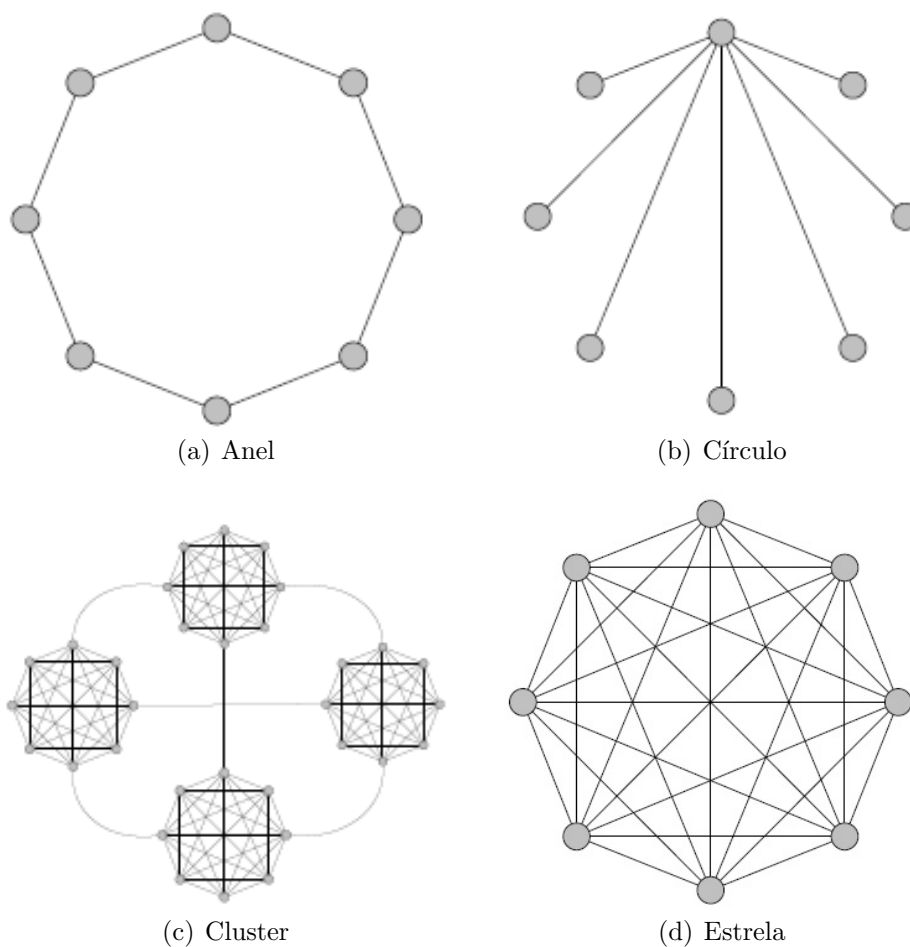


Figura 3: Topologias

3.2.4 Parâmetros

É fundamental para no processo de busca da otimização a definição dos parâmetros do PSO. Tamanho do enxame, coeficiente de inércia, cognitivo e social, e velocidade máxima são os parâmetros mais importantes na implementação, baseado em (BERGH; ENGELBRECHT, 2002). Esses parâmetros podem ser descritos da seguinte forma:

- O tamanho do enxame (n) define a possibilidade de abranger uma determinada porção do espaço de busca em cada iteração do algoritmo. Um número grande de partículas permite uma maior abrangência, mas exige um maior esforço computacional. De acordo com (BERGH; ENGELBRECHT, 2002), estudos empíricos mostraram que o PSO consegue chegar a solução ótimas utilizando um pequeno número de partículas, entre 10 e 30.
- O coeficiente de inércia (φ_0) foi introduzido por (SHI; EBERHART, 1998b) e tem a finalidade de controlar a relação entre explorar grandes espaços ou uma determinada localidade. As implementações iniciais utilizavam um valor fixo durante todo o processo de otimização, normalmente próximo de 1. Um método apresentado em (SHI; EBERHART, 1998c) utilizando atualizações dinâmicas de φ_0 teve um bom resultado durante o processamento do algoritmo, começando com um valor alto ($\varphi_0 \approx 0,9$) e diminuindo gradativamente até $\varphi_0 \approx 0,4$.
- O coeficiente cognitivo (φ_1) e o coeficiente social (φ_2) levam o algoritmo a um desempenho satisfatório quando balanceados, ou seja, $\varphi_1 = \varphi_2$. Além disso, de acordo com (ENGELBRECHT, 2005), trabalhos indicam que é melhor que o coeficiente cognitivo seja maior que o social, e que $\varphi_1 + \varphi_2 \approx 4$. Bons resultados são alcançados em *Clerc's constriction factor* (EBERHART; SHI, 2001) utilizando $\varphi_1 \approx \varphi_2 \approx 1,49$. Os fatores r_1 e r_2 definem o teor estocástico das contribuições cognitiva e social do algoritmo. São selecionados randomicamente no intervalo $[0,1]$ para cada um dos fatores.
- A velocidade máxima $v_{max,j}$, referente à dimensão de busca j , pode ser definida como uma fração do domínio de cada dimensão do espaço de busca, $v_{max,j} = \delta(x_{max,j} - x_{min,j})$, onde $x_{max,j}$ e $x_{min,j}$ são, respectivamente, o valor máximo e mínimo da variável de busca associada à dimensão j , e δ é um valor no intervalo $(0,1]$, cuja definição é dependente do problema (SHI; EBERHART, 1998a). A correta definição do valor de v_{max} contribui para a realização de uma busca balanceada em termos de exploração do espaço de busca ou realização de uma busca mais refinada de uma região promissora.

3.2.5 Controle de Velocidade

No PSO, uma das técnicas utilizadas para evitar que as partículas se movam para além do espaço de busca é realizar o controle de velocidade. Limita-se a velocidade da partícula impondo limite máximo em cada dimensão do espaço de busca, conforme Equação 57:

$$v_{ij}(t) = \begin{cases} v_{ij}(t), & \text{se } v_{ij}(t) < v_{max,j} \\ v_{max,j}, & \text{se } v_{ij}(t) \geq v_{max,j} \end{cases} \quad (57)$$

O Algoritmo 3 apresenta uma versão canônica do controle de velocidade, um dos passos apresentados no Algoritmo 2.

Algorithm 3 Controle de velocidade

```

Atualize  $v_{ij}$  com nova velocidade
para  $j := 1 \rightarrow n$  faça
  se  $v_{ij}(t) < v_{max,j}$  então
    Atualize  $v_{ij}(t)$  como nova velocidade
  fim se
  se  $v_{ij}(t) \geq v_{max,j}$  então
    Atualize  $v_{max,j}$  com nova velocidade
  fim se
fim para
retorna Velocidade  $v_{ij}$  atualizada

```

3.3 Otimização Inspirada no Comportamento de Morcego

A técnica do Algoritmo de Morcegos (*Bat Algorithm* - BA) foi proposto por (YANG, 2010) e foi inspirado no comportamento de ecolocalização dos micromorcegos. As principais regras idealizadas para o algoritmo inspirado no comportamento dos micromorcegos são:

1. Os morcegos utilizam a ecolocalização para sentir a distância e saber a diferença entre comida/presa e barreiras de fundo;
2. Costumam voar aleatoriamente velocidade v_i e posição x_i com uma frequência de pulso mínima f_{min} fixa, variando o comprimento de onda λ e a sonoridade A_0 para procurar presas. Podem ajustar automaticamente λ ou f_{min} de seus pulsos e ajustar a taxa de emissão do pulso $r \in [0, 1]$, dependendo da proximidade de seu alvo;
3. Embora a intensidade da sonoridade possa variar, assume-se que o volume sonoro varia de um valor mínimo A_{min} a um máximo A_0 .

Em seu desenvolvimento inicial, foram evitados recursos que ampliariam a complexidade da geometria computacional, tais como a estimativa de atraso de tempo e a topografia tridimensional. Além disso, em geral, a frequência f varia em uma faixa de $[f_{min}, f_{max}]$ o que corresponde a uma variação no comprimento de onda $[\lambda_{min}, \lambda_{max}]$.

Em uma implementação real, pode-se ajustar o alcance modificando os comprimentos de onda (ou frequências). O alcance detectável (λ_{max}) deve ser escolhido de modo que seja comparável ao tamanho do domínio de interesse e, em seguida, diminuir a sonoridade para intervalos menores. Também é possível variar a frequência enquanto fixa-se o comprimento de onda λ , uma vez que o comprimento de onda e a frequência estão relacionados devido ao fato de $\lambda * f$ ser constante.

As frequências mais altas possuem comprimentos de onda curtos e percorrem uma distância menor. Para os morcegos, os alcances típicos são de alguns metros. A taxa de pulso pode simplesmente estar na faixa de $[0, 1]$, onde 0 significa nenhum pulso e 1 significa a taxa máxima de emissão.

3.3.1 Algoritmo

Com base nessas características, o algoritmo inspirado no comportamento dos morcegos é apresentado no Algoritmo 4.

No instante inicial ($t = 0$), todos os n morcegos são inicializados com a posição x_i randomicamente no espaço de busca do problema. Outros parâmetros também podem ser inicializados com: taxa de pulso $r = 0$, velocidade $v = 0$, amplitude da sonoridade $A = 1$. Também são definidos os valores de frequência mínima (f_{min}) e máxima (f_{max}). Após a inicialização dos parâmetros, o algoritmo entra no processo iterativo enquanto não atinge a condição de parada, onde a qualidade dos morcegos é testada. Caso a qualidade seja melhor que a posição anterior, é realizada a atualização dos parâmetros dos morcegos conforme Equações 61, 58, 59 e 60. Em seguida, é realizada a atualização da melhor posição da colônia (x^*), caso a qualidade da do morcego seja a melhor em relação aos demais da colônia.

3.3.2 Movimento dos Morcegos

O movimento dos morcegos é definido pela atualização das posições x_i , velocidades v_i e frequências f_i em um espaço de busca de D dimensões. As novas soluções de posição

Algorithm 4 Algoritmo BA

Crie e inicialize uma colônia de morcegos x com n morcegos e velocidade v
 Defina o pulso de frequência f para cada morcego x
 Inicialize a taxa do pulso r e a sonoridade A para cada morcego x
repita
 para $i := 1 \rightarrow n$ **faça**
 Calcule a qualidade do morcego x_i usando a Equação 50
 Gere novas soluções ajustando f_i utilizando a Equação 60
 Atualize a velocidade v_i utilizando a Equação 59
 Atualize a posição x_i utilizando a Equação 58
 se $\xi > r_i$, onde $\xi \in [0, 1]$ **então**
 Selecione uma solução entre as melhores
 Gerar uma solução local em torno da melhor selecionada
 fim se
 Gere uma nova solução voando aleatoriamente utilizando a Equação 61
 Confine a partícula usando o Algoritmo 1
 se $rand < A_i$ & $f(x_i) < f(x^*)$ **então**
 Aumente a taxa de emissão de pulsos r_i utilizando a Equação 63
 Reduza a sonoridade A_i utilizando a Equação 62
 Aceite as novas soluções
 fim se
 Classifique os morcegos e encontre o melhor x^*
fim para
até Condição de parada
retorna Melhor resultado

atual, são dada pela Equação 58:

$$x_i(t) = x_i(t-1) + v_i(t), \quad (58)$$

onde $x_i(t-1)$ é a posição anterior do morcego em relação ao momento t e $v_i(t)$ é a velocidade atualizada.

A partir da atualização da posição, os morcegos determinam o novo valor de velocidade, no passo de tempo t , a partir da Equação 59:

$$v_i(t) = v_i^{t-1} + (x_i(t) - x_{best})f_i, \quad (59)$$

onde x_i é a posição atual do micromorcego, x_{best} é o valor de melhor global atual, que está localizado após comparação de todas as melhores soluções entre os morcegos.

Após atualização dos parâmetros de posição e velocidade, novas soluções de frequência são obtidas através da Equação 60:

$$f_i = f_{min} + (f_{max} - f_{min})\beta, \quad (60)$$

onde f_{min} é o valor mínimo da frequência, f_{max} é o valor máximo e β é um vetor aleatório desenhado a partir de uma distribuição uniforme e $\beta \in [0, 1]$.

Na busca local, dada a melhor solução entre as atuais, uma nova posição é gerada usando uma caminhada aleatória, dada pela Equação 61:

$$x_i(t) = x_i(t - 1) + \epsilon A(t), \quad (61)$$

onde $\epsilon \in [-1, 1]$ é um número aleatório, enquanto que $A(t) = \dot{A}_i(t)$ é a sonoridade média dos morcegos no tempo t .

3.3.3 Sonoridade e Emissão de Pulso

A sonoridade A_i e a taxa de emissão de pulsos r_i devem ser atualizadas conforme prosseguem as iterações. Geralmente, o volume diminui quando um morcego encontra sua presa, enquanto que a taxa de emissão de pulso aumenta. Quando o morcego encontra sua presa, a intensidade sonora diminui pela Equação 62:

$$A_i(t + 1) = \alpha A_i(t) \quad (62)$$

onde α é uma constante com valor $0 < \alpha < 1$ e similar ao fator de resfriamento definido por (KIRKPATRICK; GELATT; VECCHI, 1983). A taxa de emissão de pulso aumenta conforme Equação 63:

$$r_i(t + 1) = A_i(0)[1 - e^{(-\gamma t)}], \quad (63)$$

onde γ constante e $\gamma > 0$.

3.3.4 Parâmetros

É fundamental para no processo de busca da otimização a definição dos parâmetros do BA. Ajustes na frequência, delimitação dos limites do espaço de busca e o controle da sonoridade e taxa de pulso são os parâmetros mais importantes na implementação, baseado em (YANG, 2013). Os ajustes são feitos da seguinte forma:

- Ajuste de frequência (f_{min} e f_{max}): BA usa ecolocalização e sintonização de frequência para resolver problemas. A ecolocalização não é usada diretamente para imitar a função verdadeiro função na realidade, as variações de frequência são usadas. Esta capacidade pode fornecer alguma funcionalidade que pode ser semelhante ao recurso

principal usado em otimização de enxame de partículas e busca de harmonia. Portanto, BA pode possuir as vantagens de outros algoritmos baseados em inteligência de enxame.

- Zoom automático: BA tem uma vantagem distinta sobre outros algoritmos meta-heurísticos. O BA tem uma capacidade de zoom automático em uma região onde soluções promissoras foi encontrado. Este zoom é acompanhado pelo mudança automática de movimentos exploratórios para locais exploração intensiva. Como resultado, a BA tem uma rápida taxa de convergência, pelo menos nas fases iniciais do iterações, em comparação com outros algoritmos.
- Controle de parâmetros: Muitos algoritmos meta-heurísticos usam parâmetros fixos e alguns parâmetros dependentes de algoritmos pré-ajustados. Em contraste, BA usa controle de parâmetros, que pode variar os valores dos parâmetros (A e r) à medida que as iterações prosseguem. Isso fornece uma maneira de alternar automaticamente a exploração para quando a solução ideal está se aproximando. Isso dá outras vantagens do BA sobre outros algoritmos meta-heurísticos.

3.4 Considerações Finais

Neste capítulo foram abordadas duas técnicas de busca otimizada empregadas nesta dissertação, inspiradas no comportamento dos pássaros e dos morcegos. A técnica do PSO é amplamente utilizada como referência quando o problema está relacionado a otimização e estudos demonstram que a técnica inspirada em morcegos apresenta um desempenho semelhante ou ainda maior quando utilizado em problemas de otimização. O objetivo desta dissertação é implementar as duas técnicas a fim de resolver o problema de falhas em circuitos eletrônicos analógicos e comparar o desempenho destas técnicas aplicados em dois estudos de caso distintos para o diagnóstico de falhas individuais nos circuitos empregados. O próximo capítulo apresenta técnicas de análise de circuitos que foram aplicadas para efeito de diagnóstico de falhas nos componentes do circuito.

Capítulo 4

DIAGNÓSTICO DE FALHAS VIA OTIMIZAÇÃO

NESTE capítulo é apresentada a forma de cálculo da otimização do circuito desenvolvida nesta dissertação. 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 estimados dos componentes e os valores nominais.

A Seção 4.1 aborda a transformação do problema de falhas em circuitos eletrônicos analógicos em um problema de otimização. A Seção 4.2 apresenta alguns experimentos realizados com o filtro Biquad de Tow-Thomas para os casos sem falhas, com uma falha e com múltiplas falhas. A Seção 4.3 apresenta alguns experimentos realizados com o filtro de Butterworth para os casos sem falhas, com uma falha e com múltiplas falhas. A Seção 4.4 são elencadas as considerações finais sobre o capítulo apresentado.

4.1 Definição do Problema de Otimização

Dado um circuito eletrônico analógico com K componentes e T_n nós acessíveis, a função transferência pode ser definida como a tensão em um nó acessível do circuito quando aplicada uma função impulso, no domínio de Laplace, na entrada. Quando aplicada uma tensão senoidal, a partir de um gerador de sinal, com amplitude unitária, a transformada de Laplace garante que a função transferência tenha valor igual à tensão no nó que se quer medir, conforme (HAYT; KERMMERLY; DURBIN, 2008). No domínio da frequência, onde faz-se $s = jw$, observa-se que a resposta em frequência do circuito é expressa na forma complexa, conforme Equação 4.

A resposta mensurada no circuito, nos T_n pontos acessíveis, também é expressa por componentes real e imaginária, conforme Equação 6. Os dados $\mathbf{H}(x)$ e \mathbf{U} têm a mesma dimensão e são igualmente separáveis. Com o termos reais e imaginários de $\mathbf{H}(x)$ e \mathbf{U} temos um sistema de com $2n$ equações, conforme Equação 64:

$$\left\{ \begin{array}{l} h_{Re}^{(1)}(x) = \dot{u}_{Re}^{(1)} \\ h_{Im}^{(1)}(x) = \dot{u}_{Im}^{(1)} \\ \dots \\ h_{Re}^{(T_n)}(x) = \dot{u}_{Re}^{(T_n)} \\ h_{Im}^{(T_n)}(x) = \dot{u}_{Im}^{(T_n)} \end{array} \right. \quad (64)$$

O objetivo da otimização é encontrar valores dos componentes de \mathbf{X} tal que satisfaça a Equação 64 de modo que a diferença absoluta entre a tensão medida no circuito e a tensão obtida através do cálculo da função transferência seja mínima, conforme Equação 65:

$$\min_{\mathbf{X}} E = \|\mathbf{H}(\mathbf{X}) - \mathbf{U}\|, \quad (65)$$

onde \mathbf{X} representa os valores dos componentes do circuito que tem potencial para apresentar falhas, $\mathbf{H}(\mathbf{X})$ é o termo da função objetivo que é calculado pela função transferência, e \mathbf{U} é o termo obtido através da mensuração do circuito em análise.

Os resultados obtidos da otimização são caracterizados por \mathbf{X}^* como sendo os melhores valores dos componentes do circuito que minimizam a função objetivo. O diagnóstico de falhas se dá pela comparação dos valores dos componentes \mathbf{X}^* com a faixa de operação especificada pelo fabricante do componente. A faixa de operação normal aplicada nos experimentos que serão apresentados nas próximas seções deste capítulo foi de $\pm 5\%$ do valor nominal, conforme Equação 66:

$$f_{x_K} = \begin{cases} 0, & 0,95 * x_{K,ideal} \leq x_K^* \leq 1,05 * x_{K,ideal} \\ 1, & x_K^* < 0,95 * x_{K,ideal} \text{ ou } x_K^* > 1,05 * x_{K,ideal}, \end{cases} \quad (66)$$

onde f_{x_K} identifica se o componente K apresenta falha ($f_{x_K} = 1$) ou se não está defeituoso ($f_{x_K} = 0$) e x_K refere-se ao valor ideal do componente analisado.

4.2 Estudo de Caso 1 - Biquad de Tow-Thomas

Nesta seção são apresentados três experimentos: um experimento do circuito sem falhas, onde os componentes têm valores considerados como ideais para o funcionamento, um

experimento do circuito com falha em um componente e com os demais componentes simulados com os valores considerados como ideais, e um experimento com o circuito apresentando falhas em dois componentes. Para este estudo de caso, a frequência atribuída para a fonte de tensão na entrada do circuito foi de $1kHz$, com amplitude de $1V$, e os valores ideais dos componentes \mathbf{X}_{ideal} foram definidos conforme Tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros ideais dos componentes do Circuito Biquad de Tow-Thomas.

R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	C_1	C_2
$10k\Omega$	$10k\Omega$	$10k\Omega$	$10k\Omega$	$10k\Omega$	$10k\Omega$	$10nF$	$10nF$

4.2.1 Experimento 1: Circuito sem falhas

Na Figura 4 é apresentado o circuito *Biquad de Tow-Thomas* com os valores dos componentes para funcionamento do circuito como um filtro passa-baixa, considerado em bom funcionamento.

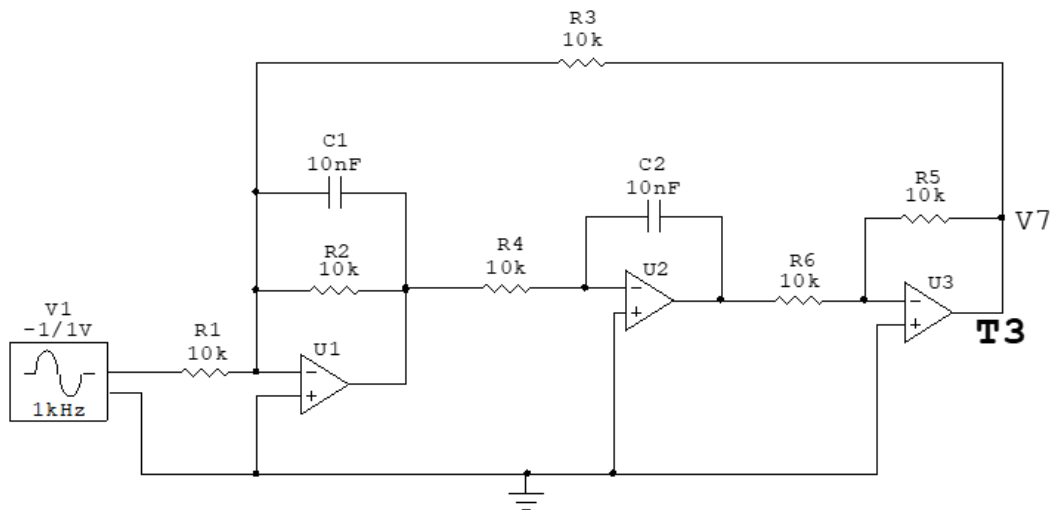


Figura 4: Filtro Biquad Tow-Thomas sem falhas.

A Figura 5 apresenta a forma de onda do circuito da Figura 4 sem falha, onde a senoide em vermelho representa o sinal de entrada aplicada por uma fonte geradora, e a senoide em preto representa o sinal obtido no nó V_7 , também definido como nó T_3 , atribuído como saída nesse estudo de caso.

Nota-se que há um ganho de amplitude na tensão do sinal de saída em relação ao sinal de entrada e que o valor máximo de tensão obtida pela medição no circuito foi de $V_7 = 1,1460V$. Na Equação 65, $\mathbf{U} = 1,1460$.

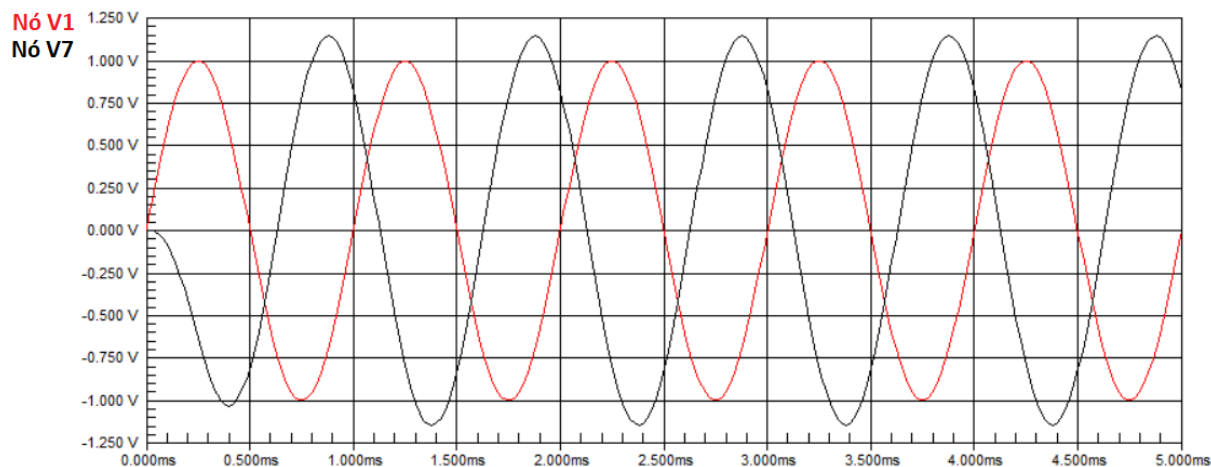


Figura 5: Forma de onda do Filtro Biquad Tow-Thomas sem falhas.

A função transferência no nó T_3 do circuito Biquad de Tow-Thomas, no domínio de Laplace, é dada pela Equação 21. Aplicando os valores ideais dos componentes do circuito na Equação 21, obtemos que o valor de $H^{T_3}(j\omega) = 1,1463$. Na Equação 65, $H(\mathbf{X}) = 1,1463$. Obtidos os valores de $H(\mathbf{X})$ e \mathbf{U} , calcula-se que o resultado da minimização é de $E = 0,0003$. Como resultado da otimização, os valores obtidos foram iguais aos valores nominais definidos na Tabela 1.

4.2.2 Experimento 2: Circuito com uma falha

Para este experimento, os valores atribuídos aos componentes são os considerados ideais de $10k\Omega$ para os resistores e $10nF$ para os capacitores, conforme Figura 4, exceto para um dos componentes que teve seu valor alterado para um valor fora da faixa de operação. A Figura 6 apresenta a forma de onda do circuito, onde a senoide em vermelho representa o sinal de entrada aplicada por uma fonte geradora, e a senoide em preto representa o sinal obtido no nó V_7 , nó T_3 , atribuído como saída nesse estudo de caso.

Nota-se que há uma perda de amplitude na tensão do sinal de saída em relação ao sinal de entrada e que o valor máximo de tensão obtida pela medição no circuito foi de $V_7 = 454,93mV$. Na Equação 65, $\mathbf{U} = 0,45493$.

Conforme apresentado no Experimento 1, aplicando-se os valores ideais dos componentes na função transferência da Equação 21, obtém-se que $H^{(T_3)}(j\omega) = 1,1463$. Na Equação 65, $H(\mathbf{X}) = 1,1463$. Para estes valores de $H(\mathbf{X})$ e \mathbf{U} , a função objetivo da Equação 65 tem valor $E = 0,69107$. Como o objetivo da otimização é a busca por um valor

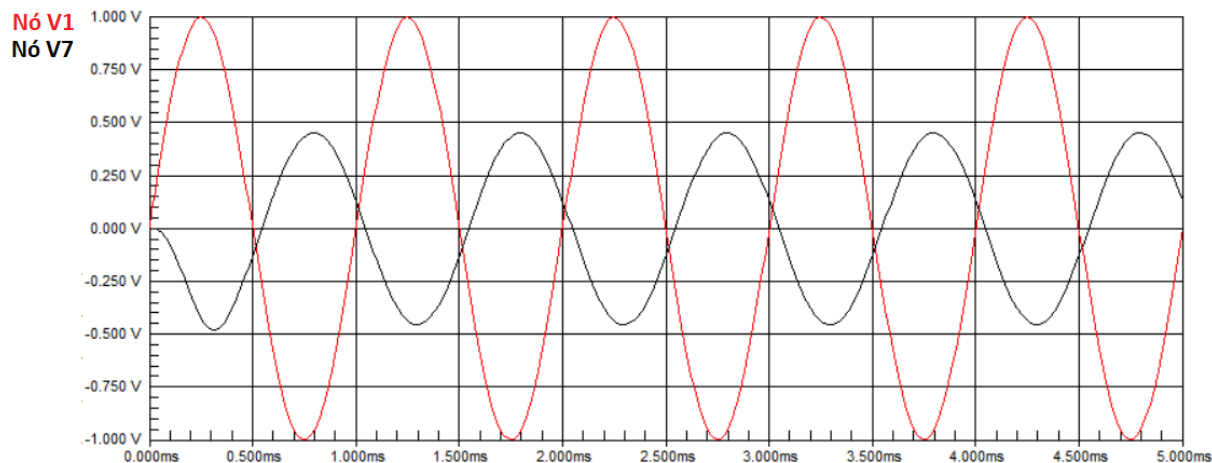


Figura 6: Forma de onda do Filtro Biquad Tow-Thomas com falha em R_3 .

próximo de zero, este valor é inapropriado e o algoritmo irá buscar por novas soluções que resultem de um valor de função objetivo menor.

Quando aplicados valores dos componentes equivalentes ao Experimento 2, resistores $R_1 - R_6$ com $10k\Omega$, exceto R_3 com $4k\Omega$, e capacitores com $10nF$, na função transferência da Equação 21, obtém-se que $H^{(T_3)}(j\omega) = 0,45517$. Na Equação 65, $H(\mathbf{X}) = 0,45517$. Para estes valores de $H(\mathbf{X})$ e \mathbf{U} , a função objetivo da Equação 65 é minimizada e obtemos o valor $E = 0,00024$. Na Tabela 2 são apresentados os valores dos componentes otimizados (\mathbf{X}^*) para este experimento.

Tabela 2: Parâmetros obtidos pela otimização do experimento 2.

R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	C_1	C_2
$10k\Omega$	$10k\Omega$	$4k\Omega$	$10k\Omega$	$10k\Omega$	$10k\Omega$	$10nF$	$10nF$

4.2.3 Experimento 3: Circuito com múltiplas falhas

Para este experimento, os valores atribuídos aos componentes são os considerados ideais de $10k\Omega$ para os resistores e $10nF$ para os capacitores, conforme Figura 4, exceto para dois componentes que tiveram seus valores alterados para fora da faixa de operação. A Figura 7 apresenta a forma de onda do circuito com duas falhas, onde a senoide em vermelho representa o sinal de entrada aplicada por uma fonte geradora, e a senoide em preto representa o sinal obtido no nó V_7 , nó T_3 , atribuído como saída nesse estudo de caso.

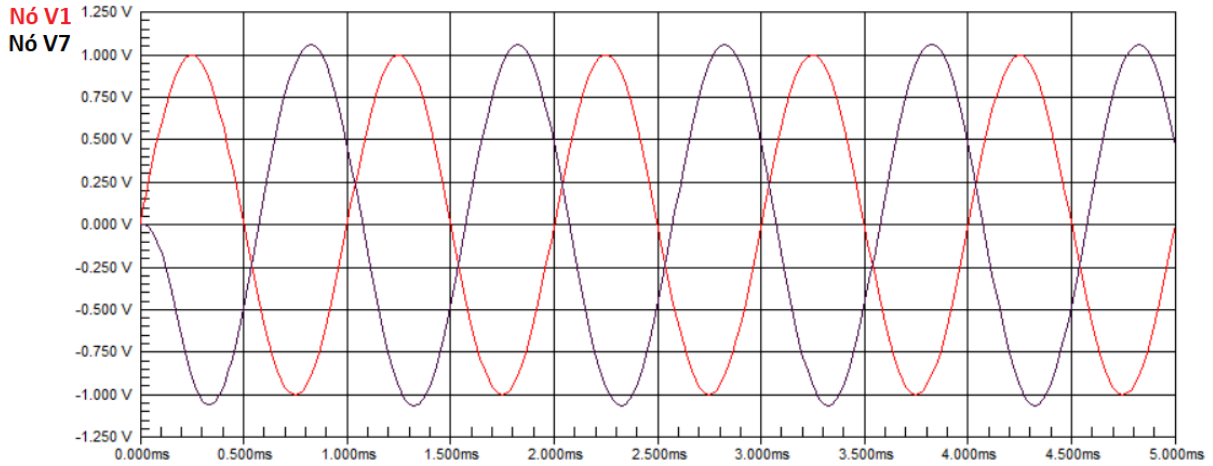


Figura 7: Forma de onda do Filtro Biquad Tow-Thomas com falhas R_2 e C_2 .

Nota-se que há um ganho de amplitude na tensão do sinal de saída em relação ao sinal de entrada e que o valor de tensão obtido pela medição no circuito foi de $V_7 = 1,0634V$, ou seja, na Equação 65, $\mathbf{U} = 1,0634$.

Conforme apresentado no Experimento 1, aplicando-se os valores ideais na função transferência da Equação 21, obtém-se que $H^{(T_3)}(j\omega) = 1,1463$. Na Equação 65, $H(\mathbf{X}) = 1,1463$. Para estes valores de $H(\mathbf{X})$ e \mathbf{U} , a função objetivo da Equação 65 tem valor $E = 0,0829$. Como o objetivo da otimização é a busca por um valor próximo de zero, este valor é inapropriado e o algoritmo irá buscar por novas soluções que resultem de um valor de função objetivo menor.

Quando aplicados valores dos componentes equivalentes ao Experimento 2, conforme Tabela 2, na função transferência da Equação 21, obtém-se que $H^{(T_3)}(j\omega) = 0,45517$. Na Equação 65, $H(\mathbf{X}) = 0,45517$. Para estes valores de $H(\mathbf{X})$ e \mathbf{U} , a função objetivo da Equação 65 tem valor $E = 0,60823$. Como o objetivo da otimização é a busca por um valor próximo de zero, este valor é inapropriado e o algoritmo irá buscar por novas soluções que resultem de um valor de função objetivo menor.

Quando aplicados valores dos componentes para resistores $R_1 - R_6$ com $10k\Omega$, exceto R_2 com $6k\Omega$, e capacitores $C_1 = 10nF$ e $C_2 = 4nF$, na função transferência da Equação 21, obtém-se que $H^{(T_3)}(j\omega) = 1,0632$. Na Equação 65, $H(\mathbf{X}) = 1,0632$. Para estes valores de $H(\mathbf{X})$ e \mathbf{U} , a função objetivo da Equação 65 foi minimizada e tem valor $E = 0,0002$. Na Tabela 3 são apresentados os valores dos componentes otimizados (\mathbf{X}^*) para este experimento.

Tabela 3: Parâmetros obtidos pela otimização do experimento 3.

R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	C_1	C_2
$10k\Omega$	$6k\Omega$	$10k\Omega$	$10k\Omega$	$10k\Omega$	$10k\Omega$	$10nF$	$4nF$

4.3 Estudo de Caso 2 - Butterworth

Nesta seção são apresentados três experimentos: um experimento do circuito sem falhas, onde os componentes tem valores considerados como ideais para o funcionamento, um experimento do circuito com falha em um componente e com os demais componentes simulados com os valores considerados como ideais, e um experimento com o circuito apresentando falhas em dois componentes. Para este estudo de caso, a frequência atribuída para a fonte de tensão na entrada do circuito foi de $1kHz$, com amplitude de $1V$, e os valores ideais dos componentes \mathbf{X}_{ideal} foram definidos conforme Tabela 4.

Tabela 4: Parâmetros ideais dos componentes do Circuito Butterworth.

R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	R_7	C_1	C_2	C_3
$10k\Omega$	$10k\Omega$	$10k\Omega$	$10k\Omega$	$10k\Omega$	$10k\Omega$	$10k\Omega$	$10nF$	$10nF$	$10nF$

4.3.1 Experimento 1: Circuito sem falhas

Na Figura 8 é apresentado o circuito *Butterworth* com os valores dos componentes para funcionamento do circuito como um filtro passa-alta, considerado um bom funcionamento.

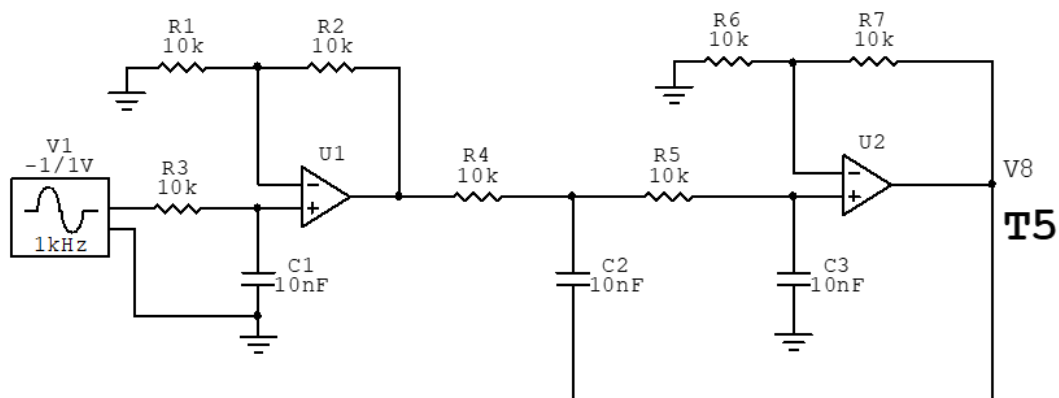


Figura 8: Filtro Butterworth sem falhas.

A Figura 9 apresenta a forma de onda do circuito da Figura 8 sem falha, onde a senoide em vermelho representa o sinal de entrada aplicada por uma fonte geradora, e a senoide em preto representa o sinal obtido no nó V_8 , também definido de nó T_5 , atribuído como saída nesse estudo de caso.

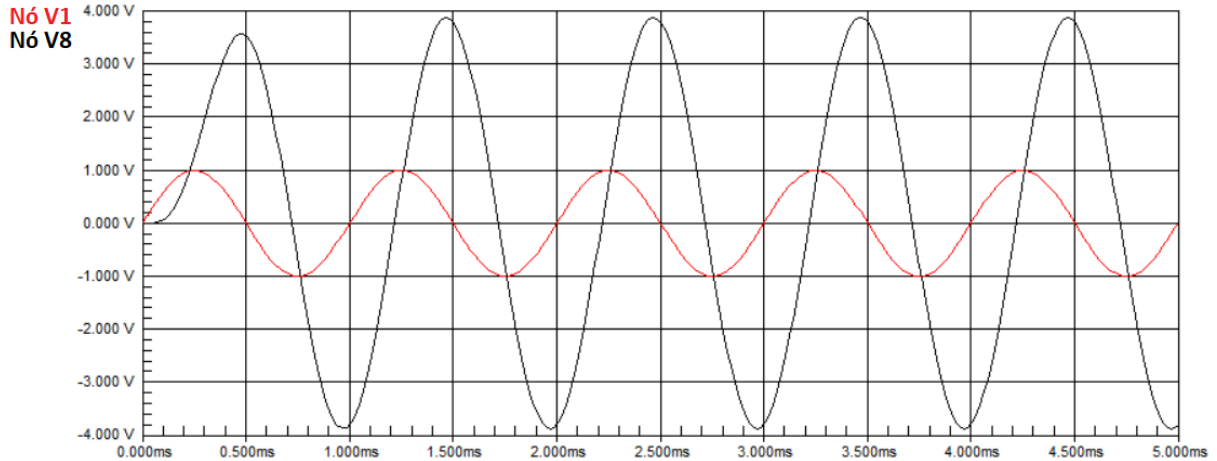


Figura 9: Forma de onda do Filtro Butterworth sem falhas.

Nota-se que há um ganho de amplitude na tensão do sinal de saída em relação ao sinal de entrada e que o valor de tensão obtido pela medição no circuito foi de $V_8 = 3,8810V$, ou seja, da Equação 65, $\mathbf{U} = 3,8810$.

A função transferência no nó T_5 do circuito Butterworth, no domínio de Laplace, é dada pela Equação 49. Aplicando os valores dos componentes do circuito na Equação 49, com frequência de $1kHz$, obtemos que o valor de $H^{(T_5)}(j\omega) = 3,8823$. Portanto, pela Equação 65, $H(\mathbf{X}) = 3,8823$. Pela Equação 65, tendo sido obtidos os valores de $H(\mathbf{X})$ e \mathbf{U} , calcula-se que o resultado da minimização é de $E = 0,0013$. Na Tabela 5 são apresentados os valores dos componentes otimizados (\mathbf{X}^*) para este experimento.

Tabela 5: Parâmetros obtidos pela otimização do experimento 1.

R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	R_7	C_1	C_2	C_3
$10k\Omega$	$10k\Omega$	$10k\Omega$	$10k\Omega$	$10k\Omega$	$10k\Omega$	$10k\Omega$	$10nF$	$10nF$	$10nF$

4.3.2 Experimento 2: Circuito com uma falha

Para este experimento, os valores atribuídos aos componentes são os considerados ideais de $10k\Omega$ para os resistores e $10nF$ para os capacitores, conforme Figura 8, exceto para

um componente que teve o valor alterado para fora da faixa de operação. A Figura 10 apresenta a forma de onda do circuito com uma falha, onde a senoide em vermelho representa o sinal de entrada aplicada por uma fonte geradora, e a senoide em preto representa o sinal obtido no nó V_8 , nó T_5 , atribuído como saída nesse estudo de caso.

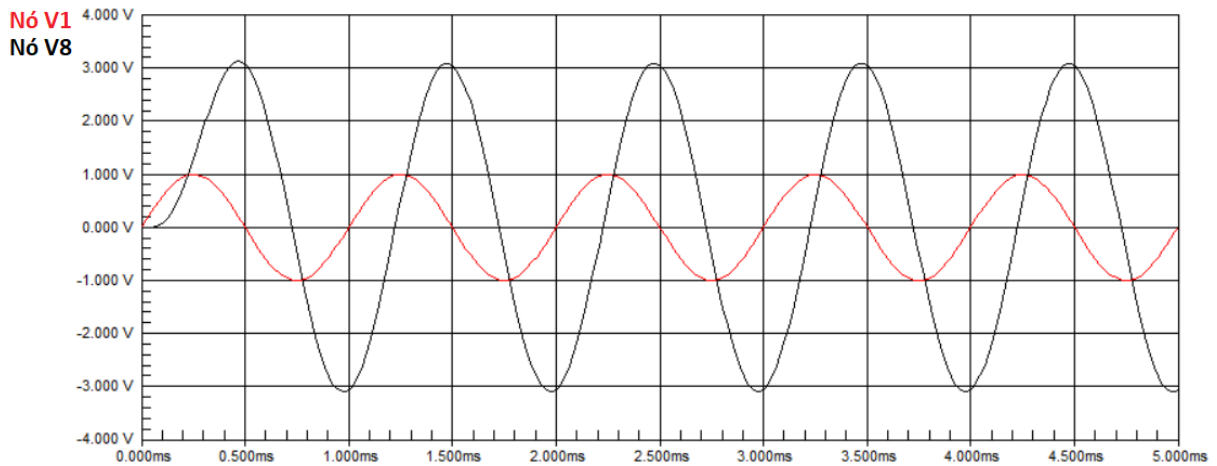


Figura 10: Forma de onda do Filtro Biquad Tow-Thomas com falha em R_3 .

Nota-se que há um ganho de amplitude na tensão do sinal de saída em relação ao sinal de entrada, no entanto menor que o observado no experimento sem falha deste circuito, e que o valor de tensão obtida pela medição no circuito foi de $V_7 = 3,0973V$. Na Equação 65, $\mathbf{U} = 3,0973$.

Conforme apresentado no Experimento 1, aplicando-se os valores de $10k\Omega$ para os Resistores e $10nF$ para os Capacitores na função transferência da Equação 49, obtém-se que $H^{(T_5)}(j\omega) = 3,8823$. Na Equação 65, $H(\mathbf{X}) = 3,8823$. Para estes valores de $H(\mathbf{X})$ e \mathbf{U} , a função objetivo da Equação 65 tem valor $E = 0,785$. Como o objetivo da otimização é a busca por um valor próximo de zero, este valor é inadequado e o algoritmo irá buscar por novas soluções que resultem de um valor de função objetivo menor.

Quando aplicado aos componentes os valores de resistores $R_1 - R_7$ com $10k\Omega$, e de capacitores C_1 e C_3 com $10nF$ e C_2 com $7nF$, na função transferência da Equação 49, obtém-se que $H^{(T_5)}(j\omega) = 3,1037$. Na Equação 65, $H(\mathbf{X}) = 3,1037$. Para estes valores de $H(\mathbf{X})$ e \mathbf{U} , a função objetivo da Equação 65 é minimizada e tem valor $E = 0,0064$. Na Tabela 6 são apresentados os valores dos componentes otimizados (\mathbf{X}^*) para este experimento.

Tabela 6: Parâmetros obtidos pela otimização do experimento 2.

R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	R_7	C_1	C_2	C_3
$10k\Omega$	$10k\Omega$	$10k\Omega$	$10k\Omega$	$10k\Omega$	$10k\Omega$	$10k\Omega$	$10nF$	$7nF$	$10nF$

4.3.3 Experimento 3: Circuito com múltiplas falhas

Para este experimento, os valores atribuídos aos componentes são os considerados ideais de $10k\Omega$ para os resistores e $10nF$ para os capacitores, conforme Figura 8, exceto para dois componentes que tiveram seus valores alterados para fora da faixa de operação. A Figura 11 apresenta a forma de onda do circuito com falhas em R_1 e C_3 , onde a senoide em vermelho representa o sinal de entrada aplicada por uma fonte geradora, e a senoide em preto representa o sinal obtido no nó V_8 , no T_5 , atribuído como saída nesse estudo de caso.

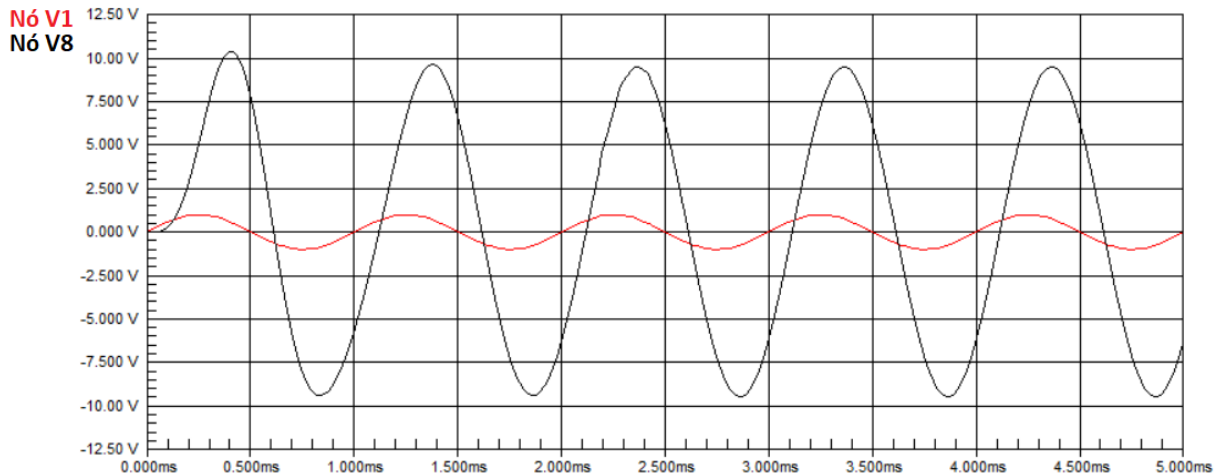


Figura 11: Forma de onda do Filtro Biquad Tow-Thomas com falhas em R_1 e C_3 .

Nota-se que há um ganho de amplitude na tensão do sinal de saída em relação ao sinal de entrada, no entanto menor que o observado no experimento sem falha deste circuito, e que o valor de tensão obtida pela medição no circuito foi de $V_7 = 9,4793V$. Na Equação 65, $\mathbf{U} = 9,4793$.

Conforme apresentado no Experimento 1, aplicando-se os valores de $10k\Omega$ para os Resistores e $10nF$ para os Capacitores na função transferência da Equação 49, obtém-se que $H^{(T_5)}(j\omega) = 3,8823$. Na Equação 65, $H(\mathbf{X}) = 3,8823$. Para estes valores de $H(\mathbf{X})$ e \mathbf{U} , a função objetivo da Equação 65 tem valor $E = 5,597$. Como o objetivo da otimização

é a busca por um valor próximo de zero, este valor é inapropriado e o algoritmo irá buscar por novas soluções que resultem de um valor de função objetivo menor.

Quando aplicado valores dos componentes equivalentes ao Experimento 2, resistores $R_1 - R_7$ com $10k\Omega$, e capacitores C_1 e C_3 com $10nF$ e C_2 com $7nF$, na função transferência da Equação 49, obtém-se que $H^{(T_5)}(jw) = 3,1037$. Na Equação 65, $H(\mathbf{X}) = 3,1037$. Para estes valores de $H(\mathbf{X})$ e \mathbf{U} , a função objetivo da Equação 65 tem valor $E = 6,3756$. Como o objetivo da otimização é a busca por um valor próximo de zero, este valor é inapropriado e o algoritmo irá buscar por novas soluções que resultem de um valor de função objetivo menor.

Quando aplicado aos componentes valores de resistores $R_1 - R_7$ com $10k\Omega$, exceto para R_1 que teve seu valor em $3k\Omega$, e capacitores C_1 e C_2 com $10nF$, e C_3 com $6nF$, na função transferência da Equação 49, obtém-se que $H^{(T_5)}(jw) = 9,4892$. Na Equação 65, $H(x) = 9,4883$. Para estes valores de $H(x)$ e U , a função objetivo da Equação 65 é minimizada e tem valor $E = 0,0009$. Na Tabela 7 são apresentados os valores dos componentes otimizados (\mathbf{X}^*) para este experimento.

Tabela 7: Parâmetros obtidos pela otimização do experimento 3.

R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	R_7	C_1	C_2	C_3
$3k\Omega$	$10k\Omega$	$10k\Omega$	$10k\Omega$	$10k\Omega$	$10k\Omega$	$10k\Omega$	$10nF$	$10nF$	$6nF$

4.4 Considerações Finais

Neste capítulo foi definido o problema do diagnóstico de falhas em circuitos eletrônicos analógicos e sua transformação em um problema de otimização. Além disso, foram apresentados três experimentos, com casos sem falhas, com uma falha e com duas falhas, para os filtros que foram utilizados como estudo de caso neste projeto.

O objetivo desta dissertação é a aplicação da função transferência em conjunto com técnicas de otimização de inteligência de enxame para identificar melhor solução para os parâmetros dos componentes do circuito a partir dos valores das tensões medidas nos nós acessíveis. O próximo capítulo apresenta os estudos de caso que foram aplicadas para efeito de diagnóstico de falhas nos componentes do circuito.

Capítulo 5

RESULTADOS DE DESEMPENHO

NESTE capítulo são apresentados e analisados os resultados alcançados com a aplicação do PSO e do BA como técnicas para o diagnóstico de falhas em circuitos analógicos.

A Seção 5.1 apresenta a metodologia desenvolvida para a diagnosticar falhas em circuitos eletrônicos analógicos. A Seção 5.2 define as métricas usadas para avaliação do desempenho das técnicas de otimização exploradas. A Seção 5.3 apresenta a análise dos resultados dos experimentos realizados com os filtros Biquad de Tow-Thomas e de Butterworth utilizando a técnica do PSO. A Seção 5.4 apresenta a análise dos resultados dos experimentos realizados com os filtros Biquad de Tow-Thomas e de Butterworth utilizando a técnica do BA. A Seção 5.5 apresenta a comparação dos desempenhos das técnicas de otimização utilizadas nessa dissertação. Na Seção 5.6 são elencadas as considerações finais do capítulo.

5.1 Metodologia

A metodologia utilizada para o diagnóstico de falhas em circuitos eletrônicos analógicos consiste de, a partir de um circuito qualquer com K componentes e N nós acessíveis, para cada nó acessível ou combinação de nós, são realizadas simulações considerando todos os componentes do circuito. Cada simulação abrange 100 execuções de otimização. Para cada componente do circuito, o processo de otimização avalia se não há presença de falhas (SF - Sem Falhas) ou se apresenta falhas. Caso haja indícios de falhas, a simulação S_{A_i} apresenta o número de execuções que tiveram como resultado da otimização valores para a admitância A_i fora da faixa de operação normal.

São realizados K experimentos para cada nó individual ou combinação, onde cada experimento trata de caso Sem Falhas (SF) ou de Falha no componente A_i (F_{A_i}). Cada experimento consiste de K simulações. Em cada simulação (S_{A_i}), referente à análise no componente A_i , tem-se duas possibilidades: apenas o componente A_i varia ao longo do espaço de busca, enquanto que os demais $K - 1$ componentes variam dentro da faixa de operação determinada pelo fabricante; ou A_i e A_j , onde $j \neq i$ e o componente A_i está sendo investigado, variam no espaço de busca, enquanto que os demais $K - 2$ componentes variam dentro da faixa de operação determinada pelo fabricante. Assim, o teste completo do circuito consiste em $N \times (K + 1) \times K$ simulações. 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 67:

$$p_{i, inicial} = 0, 0 \leq p_i \leq 1, 2 * p_{i, ideal}, \quad (67)$$

onde p_i corresponde ao componente do circuito em análise.

Para ilustração da metodologia de testes, considere um circuito com quatro resistores ($R_1 - R_4$) e com um nó T acessível. Suponha que as simulações compostas de 100 execuções para cada componente do circuito apresentem os resultados da Tabela 8.

Tabela 8: Exemplo de resultado para caso de circuito sem falhas .

	S_{R_1}	S_{R_2}	S_{R_3}	S_{R_4}
SF	81	83	80	82
F_{R_1}	19	0	0	0
F_{R_2}	0	17	0	0
F_{R_3}	0	0	20	0
F_{R_4}	0	0	0	18

A linha SF representa o número de execuções durante a simulação S_{R_i} que classificaram o circuito em teste como um caso sem falha no componente F_{R_i} . Já as linhas F_{R_i} , referem-se ao número de execuções que classificaram o circuito em teste como um caso com falha no componente R_i . Por exemplo, durante a simulação S_{R_3} , das 100 execuções realizadas, 80 apresentaram como melhor solução valores de resistência dentro da faixa de operação determinada pelo fabricante, classificando o circuito como sem falhas. No entanto, 20 execuções apresentaram como melhor solução um valor para o resistor R_3 fora da faixa de operação, e portanto classificaram o circuito como um caso com falha em R_3 .

Na Tabela 9 são apresentados os exemplos de resultados para os experimentos referentes a falhas nos componentes $R_1 - R_4$.

Tabela 9: Exemplo de resultado para um circuito com falhas.

	Falha em R_1				Falha em R_2				Falha em R_3				Falha em R_4			
	S_{R_1}	S_{R_2}	S_{R_3}	S_{R_4}	S_{R_1}	S_{R_2}	S_{R_3}	S_{R_4}	S_{R_1}	S_{R_2}	S_{R_3}	S_{R_4}	S_{R_1}	S_{R_2}	S_{R_3}	S_{R_4}
SF	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F_{R_1}	100	100	100	100	76	0	0	0	52	0	0	0	64	0	0	0
F_{R_2}	0	76	0	0	100	100	100	99	0	56	0	0	0	53	0	0
F_{R_3}	0	0	61	0	0	0	44	0	98	98	100	81	0	0	88	0
F_{R_4}	0	0	0	37	0	0	0	51	0	0	0	82	100	100	90	100

Nos estudos de caso dessa dissertação, foram utilizados os *softwares* *SapWin4*TM e *Circuit Maker*TM. O *SapWin4*TM é utilizado para obtenção da função transferência dos nós acessíveis do circuito, minimizando a possibilidade de erro para o cálculo manual das funções. Neste *software* é possível representar o o circuito identificando o nó de entrada e os nós acessíveis para análise do circuito. A partir destas informações, o *SapWin4*TM apresenta a função transferência correspondente ao nó indicado.

O *Circuit Maker*TM é um *software* de análise de circuito onde é possível simular sinais de saída a partir de um sinal de entrada genérico, onde se pode mensurar características como amplitude do sinal de saída e diferença de fase entre o sinal de entrada e o sinal de saída de determinado nó acessível. Estas informações foram utilizadas como medidas ao transformar o problema de diagnóstico de falhas em um problema de otimização.

Nota-se que para o caso de um circuito em teste com mais de um nó acessível, as simulações são realizadas utilizando os nós de maneira incremental (utilizando mais de um nó na função objetivo), tanto individualmente quanto combinados.

5.2 Métricas de Avaliação

Neste projeto são utilizadas quatro métricas de avaliação de desempenho: Acurácia, Precisão, Sensibilidade e Especificidade. A acurácia é definida pela proporção de acertos em um conjunto de classificações, permitindo analisar quantos casos foram identificados corretamente dentre todos os casos analisados. A precisão é expressa como a proporção de casos identificados com acertos verdadeiros em detrimento ao número de casos com acertos verdadeiros e falsos (GLAS et al., 2003). A sensibilidade estima a proporção de acertos em relação aos dados acertados positiva ou negativamente. A especificidade estima a pro-

babilidade de classificações negativas erradas em relação ao número de casos obtidos na análise das falhas nos demais componentes do circuito (ALTMAN; BLAND, 1994).

A maioria dos testes de diagnóstico tem resultados múltiplos ou contínuos. O agrupamento de categorias ou a aplicação de um valor de corte é frequentemente usado para classificar os resultados em positivos ou negativos. Essa classificação permite representar a comparação entre um teste diagnóstico e seu padrão de referência em uma tabela de contingência onde VP (Verdadeiro Positivo) denota o número de classificações positivas corretas, VN (Verdadeiro Negativo) o número de classificações negativas corretas, FP (Falso Positivo) o número de classificações positivas erradas, e FN (Falso Negativo) o número de classificações negativas erradas. Para os estudos de caso apontados nessa dissertação, definimos os termos da métrica da seguinte forma:

- VP: Quantidade de execuções que não apresentaram falhas em SF (Sem Falhas) ou que apresentaram falhas no componente A_i na respectiva simulação S_{A_i} ;
- VN: Quantidade de execuções que apresentaram falhas no campo SF ou que não apresentaram falhas no componente A_i na respectiva simulação S_{A_i} ;
- FP: Quantidade de execuções que apresentaram falhas em componentes diferentes de A_i nas simulações S_{A_i} ;
- FN: Quantidade de execuções que não apresentaram falhas no componente defeituoso nas simulações.

A acurácia é uma medida para quantificar o nível de acertos entre um valor esperado e o número de acertos obtidos, e é definida pela Equação 68:

$$A = 100 * \frac{VP + VN}{VP + VN + FP + FN}. \quad (68)$$

A precisão é a proximidade entre os valores obtidos pela repetição do processo de avaliação, e é definida pela Equação 69:

$$P = 100 * \frac{VP}{VP + FP}. \quad (69)$$

A sensibilidade é a relação entre o número de acertos e os o número total de execuções para a falha analisada, e é definida pela Equação 70.

$$S = 100 * \frac{VP}{VP + FN}. \quad (70)$$

A especificidade é a relação entre o número de casos classificados errados negativamente e o número de casos com falha em um determinado componente diferente do que está sendo analisado, e é definida pela Equação 71.

$$E = 100 * \frac{VN}{VN + FP}. \quad (71)$$

A Matriz de Confusão é calculada pela função de pesquisa classificação e exibe a distribuição dos registros em termos de suas classes. A Tabela 10 apresenta a matriz de confusão para o ponto T , a partir dos dados do exemplo apresentados nas Tabelas 8 e 9, onde SF indica o número de execuções sem falhas, e F_{R_i} indica a quantidade de execuções com falhas no componente R_i .

Tabela 10: Matriz de confusão para um circuito com 4 componentes no nó T .

		Valores Obtidos				
		SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}
Valores Esperados	SF	326	19	17	20	18
	F_{R_1}	0	400	76	61	37
	F_{R_2}	0	76	399	44	51
	F_{R_3}	0	52	56	377	82
	F_{R_4}	0	64	53	88	390

Considerando a matriz de confusão da Tabela 10, obtém-se os valores das métricas de desempenho conforme apresentados na Tabela 11.

Tabela 11: Métricas para o exemplo do caso sem falhas.

	SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	Global
A	97,27	85,77	86,22	85,11	85,48	87,97
P	81,50	69,69	70,00	66,49	65,55	70,64
S	100,00	65,47	66,39	63,90	67,47	72,65
E	96,89	91,69	91,88	91,02	90,37	92,37

5.3 Resultado Utilizando PSO

O PSO foi implementado em *Python*, sem a utilização de bibliotecas específicas. Para permitir a comparação dos resultados, todas as otimizações realizadas tiveram parâmetros fixos, conforme Tabela 12, onde K representa o número de componentes do circuito sob análise. Vale ressaltar que o circuito 1 inclui 8 componentes e o circuito 2 inclui 10

componentes possíveis de haver falhas. O Termo de Inércia e os Termos Cognitivo e Social foram definidos conforme (YANG, 2010).

Tabela 12: Parâmetros do PSO.

Parâmetros	Valores	Parâmetros	Valores	Parâmetros	Valores
# Dimensões	K	Termo de Inércia	0,5	Ótimo da Função Objetivo	0,0
# Iterações	1000	Termo Cognitivo	1,49	Erro Tolerado	10^{-15}
# Partículas	30	Termo Social	1,49		

Os resultados preliminares para a técnica do PSO, utilizando o Circuito Biquad de Tow-Thomas, podem ser encontrados em (GALINDO; NEDJAH; MOURELLE, 2022a).

5.3.1 Circuito Biquad de Tow-Thomas

Com o *software Circuit Maker*TM foram realizadas as análises do circuito sob testes, de acordo com a alteração nos valores dos componentes, sendo possível testá-lo sob diferentes circunstâncias.

Na Tabela 13 são apresentados os nove casos diferentes e os valores de tensão medidos em cada nó acessível do circuito, conforme mostrado na Figura 1. Os componentes têm valores ideais $10k\Omega$ para os resistores e $10nF$ para os capacitores. Nesta configuração, o circuito se comporta como um filtro passa-baixa.

Tabela 13: Tensão medida nos nós $T_1 - T_3$ no circuito Biquad de Tow-Thomas.

Casos	T_1 (V)	T_2 (V)	T_3 (V)
Caso 1: Sem falhas com valores ideais	$-0,283-j0,451$	$0,717-j0,451$	$0,717-j0,451$
Caso 2: Falha em R_1 com valor de $4,32k\Omega$	$-0,655-j1,043$	$1,659-j1,043$	$1,659-j1,043$
Caso 3: Falha em R_2 com valor de $6,5k\Omega$	$-0,314-j0,325$	$0,517-j0,499$	$0,517-j0,499$
Caso 4: Falha em R_3 com valor de $4,3k\Omega$	$-0,068-j0,252$	$0,401-j0,108$	$0,401-j0,108$
Caso 5: Falha em R_4 com valor de $5,0k\Omega$	$-0,089-j0,286$	$0,910-j0,286$	$0,910-j0,286$
Caso 6: Falha em R_5 com valor de $6,0k\Omega$	$-0,523-j0,499$	$0,795-j0,832$	$0,477-j0,499$
Caso 7: Falha em R_6 com valor de $4,0k\Omega$	$-0,059-j0,236$	$0,376-j0,095$	$0,941-j0,236$
Caso 8: Falha em C_1 com valor de $5nF$	$-0,283-j0,450$	$0,717-j0,450$	$0,717-j0,450$
Caso 9: Falha em C_2 com valor de $4nF$	$-0,059-j0,236$	$0,941-j0,236$	$0,941-j0,236$

Nos Casos de 2 – 9, apenas os componentes indicados são alterados em relação aos valores dos componentes referentes ao Caso 1. Como o circuito apresenta três nós acessíveis, para cada caso têm-se sete combinações possíveis: três considerando um único ponto, três considerando dois pontos combinados e um considerando a combinação dos três

pontos. Portanto, serão apresentados os resultados para as combinações de nós conforme mostrado na Tabela 14. Os resultados obtidos dos processos de otimização caso a caso, utilizando o PSO, são apresentados no Apêndice A.

Tabela 14: Incremento dos nós utilizados no circuito Biquad de Tow-Thomas.

Quantidade de nós	Relação dos nós ou combinação
1	T_1, T_2 e T_3
2	$T_1/T_2, T_1/T_3$ e T_1/T_2
3	$T_1/T_2/T_3$

Na Tabela 15 é apresentada a matriz de confusão para o circuito 1 utilizando o nó T_1 individualmente. Na Tabela 16 são apresentados os valores das métricas de desempenho referentes a este caso. O valor global desta tabela é definido pela média aritmética das métricas avaliadas para cada F_{A_i} do nó estudado.

Tabela 15: Matriz de confusão dos resultados do nó T_1 no circuito Biquad de Tow-Thomas usando o PSO.

		Valores Obtidos								
		SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{C_1}	F_{C_2}
Valores Esperados	SF	446	16	13	51	44	44	47	91	48
	F_{R_1}	0	800	73	64	68	70	62	91	67
	F_{R_2}	0	82	793	69	66	63	56	93	58
	F_{R_3}	1	63	63	784	97	87	94	97	94
	F_{R_4}	1	41	33	91	777	84	90	97	91
	F_{R_5}	1	32	36	92	87	798	90	94	95
	F_{R_6}	0	53	59	94	95	90	782	96	96
	F_{C_1}	1	30	27	79	85	69	81	773	81
	F_{C_2}	1	49	56	93	91	84	93	96	777

Tabela 16: Resultados para as métricas consideradas para o nó T_1 no circuito Biquad de Tow-Thomas usando o PSO.

	SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{C_1}	F_{C_2}	Global
A	96,83	92,39	92,52	89,14	89,74	90,12	89,43	89,32	89,46	90,99
P	55,75	61,78	61,95	56,81	59,54	60,23	57,29	63,05	57,99	59,38
S	98,89	68,61	68,78	55,33	55,11	57,45	56,06	50,59	55,22	62,89
E	96,74	95,12	95,21	93,98	94,67	94,69	94,12	95,37	94,32	94,91

Quando é utilizado o nó T_1 do circuito, observa-se os valores médios da acurácia de 90,99%, da precisão de 59,38%, da sensibilidade de 62,89% e da especificidade de 94,91%.

Para o caso sem falhas, obteve-se os melhores resultados para a acurácia, sensibilidade e especificidade: 96,83%, 98,89% e 96,74%, respectivamente. O caso de falha no capacitor C_1 teve a melhor precisão com 63,05%.

Na Tabela 17 é apresentada a matriz de confusão para o circuito 1 utilizando o nó T_2 individualmente. Na Tabela 18 são apresentados os valores das métricas de desempenho referentes a este caso.

Tabela 17: Matriz de confusão dos resultados do nó T_2 no circuito Biquad de Tow-Thomas usando o PSO.

		Valores Obtido								
		SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{C_1}	F_{C_2}
Valores Esperados	SF	455	32	39	41	38	38	39	80	38
	F_{R_1}	0	796	77	65	69	78	63	91	76
	F_{R_2}	0	80	799	45	86	55	48	88	80
	F_{R_3}	0	62	59	792	67	82	91	96	73
	F_{R_4}	1	65	85	60	783	62	57	96	92
	F_{R_5}	0	52	58	96	59	799	93	94	50
	F_{R_6}	0	64	74	96	71	86	794	94	69
	F_{C_1}	2	43	61	84	55	61	71	779	54
	F_{C_2}	0	66	77	47	89	60	59	92	791

Tabela 18: Resultados para as métricas consideradas para o nó T_2 no circuito Biquad de Tow-Thomas usando o PSO.

	SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{C_1}	F_{C_2}	Global
A	96,88	91,19	90,93	90,47	90,57	90,82	90,37	89,59	90,84	91,30
P	56,88	60,53	62,37	59,91	60,18	61,41	58,90	64,38	61,75	60,70
S	99,34	63,17	60,12	59,73	59,45	60,48	60,38	51,59	59,79	63,78
E	96,78	94,76	95,10	94,61	94,74	94,90	94,37	95,53	95,02	95,09

Quando é utilizado o nó T_2 do circuito, observa-se os valores médios da acurácia de 91,30%, da precisão de 60,70%, da sensibilidade de 63,78% e da especificidade de 95,09%. Para o caso sem falhas, obteve-se os melhores resultados para a acurácia, sensibilidade e especificidade: 96,88%, 99,34% e 96,78%, respectivamente. O caso de falha no capacitor C_1 teve a melhor precisão com 64,38%.

Na Tabela 19 é apresentada a matriz de confusão para o circuito 1 utilizando o nó T_3 individualmente. Na Tabela 20 são apresentados os valores das métricas de desempenho referentes a este caso.

Tabela 19: Matriz de confusão dos resultados do nó T_3 no circuito Biquad de Tow-Thomas usando o PSO.

		Valores Obtidos								
		SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{C_1}	F_{C_2}
Valores Esperados	SF	453	15	46	15	43	52	49	78	49
	F_{R_1}	0	800	77	62	73	60	61	87	77
	F_{R_2}	1	70	789	30	88	73	83	83	75
	F_{R_3}	0	66	74	800	75	70	66	95	68
	F_{R_4}	0	45	84	30	776	90	92	93	92
	F_{R_5}	1	65	77	45	87	793	86	75	88
	F_{R_6}	0	35	81	40	96	88	791	95	92
	F_{C_1}	0	40	59	76	62	56	56	792	64
	F_{C_2}	0	40	89	40	98	86	96	96	788

Tabela 20: Resultados para as métricas consideradas para o nó T_3 no circuito Biquad de Tow-Thomas usando o PSO.

	SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{C_1}	F_{C_2}	Global
A	96,88	92,19	90,25	92,38	89,73	90,17	90,02	90,03	89,71	91,26
P	56,63	61,68	61,07	60,88	59,60	60,21	60,02	65,73	59,11	60,55
S	99,56	68,03	57,34	70,30	55,51	57,97	57,32	53,01	56,57	63,96
E	96,76	95,03	94,87	94,88	94,62	94,66	94,62	95,74	94,43	95,07

Quando é utilizado o nó T_3 , observa-se os valores médios da acurácia de 91,26%, da precisão de 60,55%, da sensibilidade de 63,96% e da especificidade de 95,07%. Para o caso sem falhas, obteve-se os melhores resultados para a acurácia, sensibilidade e especificidade: 96,88%, 99,56% e 96,76%, respectivamente. O caso de falha no capacitor C_1 teve a melhor precisão com 65,73%.

Na Tabela 21 é apresentada a matriz de confusão para o circuito 1 utilizando a combinação dos nós T_1 e T_2 . Na Tabela 22 são apresentados os valores das métricas de desempenho referentes a este caso.

Quando é utilizada a combinação dos nós T_1 e T_2 , observa-se os valores médios da acurácia de 92,69%, da precisão de 67,34%, da sensibilidade de 69,56% e da especificidade de 95,87%. Para o caso sem falhas, obteve-se os melhores resultados para a acurácia, precisão, sensibilidade e especificidade: 97,82%, 72,38, 99,31% e 97,73%, respectivamente.

Na Tabela 23 é apresentada a matriz de confusão para o circuito 1 utilizando a combinação dos nós T_1 e T_3 . Na Tabela 24 são apresentados os valores das métricas de desempenho referentes a este caso.

Tabela 21: Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós T_1 e T_2 no circuito Biquad de Tow-Thomas usando o PSO.

		Valores Obtidos								
		SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{C_1}	F_{C_2}
Valores Esperados	SF	579	14	17	24	14	27	27	81	17
	F_{R_1}	0	800	75	53	35	56	54	88	33
	F_{R_2}	1	74	798	49	40	46	38	90	37
	F_{R_3}	0	49	52	786	42	81	96	95	35
	F_{R_4}	0	37	41	42	790	35	51	92	92
	F_{R_5}	0	34	31	89	31	799	88	94	23
	F_{R_6}	0	53	38	89	34	92	789	92	40
	F_{C_1}	3	24	22	73	32	60	77	787	30
	F_{C_2}	0	37	56	54	90	41	48	90	793

Tabela 22: Resultados para as métricas consideradas para a combinação dos nós T_1 e T_2 no circuito Biquad de Tow-Thomas usando o PSO.

	SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{C_1}	F_{C_2}	Global
A	97,82	93,06	93,15	91,05	93,14	91,97	91,11	89,89	92,99	92,69
P	72,38	67,00	68,03	63,59	66,95	67,20	64,30	71,03	65,59	67,34
S	99,31	71,30	70,62	62,43	71,30	64,59	62,22	52,15	72,09	69,56
E	97,73	95,71	95,92	95,03	95,76	95,70	95,16	96,36	95,49	95,87

Tabela 23: Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós T_1 e T_3 no circuito Biquad de Tow-Thomas usando o PSO.

		Valores Obtidos								
		SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{C_1}	F_{C_2}
Valores Esperados	SF	558	12	7	7	29	36	45	68	38
	F_{R_1}	0	800	68	31	58	46	54	90	50
	F_{R_2}	0	57	799	13	52	50	47	74	53
	F_{R_3}	0	48	40	800	54	54	56	93	60
	F_{R_4}	0	26	48	19	782	82	92	91	94
	F_{R_5}	0	20	38	21	83	795	84	68	88
	F_{R_6}	0	21	41	16	94	83	784	91	93
	F_{C_1}	0	29	24	75	51	49	43	797	43
	F_{C_2}	0	20	49	23	96	87	96	92	783

Quando é utilizada a combinação dos nós T_1 e T_3 , observa-se os valores médios da acurácia de 92,58%, da precisão de 66,80%, da sensibilidade de 69,54% e da especificidade de 95,81%. Para o caso sem falhas, obteve-se os melhores resultados para a acurácia, sensibilidade e especificidade: 97,66%, 100,00% e 97,53%, respectivamente. O caso de falha no capacitor C_1 teve a melhor precisão com 71,74%.

Tabela 24: Resultados para as métricas consideradas para a combinação dos nós T_1 e T_3 no circuito Biquad de Tow-Thomas usando o PSO.

	SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{C_1}	F_{C_2}	Global
A	97,66	93,92	93,62	94,11	90,64	91,42	90,77	90,53	90,52	92,58
P	69,75	66,83	69,78	66,39	63,37	66,42	64,10	71,74	62,84	66,80
S	100,00	77,44	71,72	79,60	60,20	62,01	60,26	54,44	60,14	69,54
E	97,53	95,74	96,26	95,67	95,01	95,57	95,15	96,47	94,89	95,81

Na Tabela 25 é apresentada a matriz de confusão para o circuito 1 utilizando a combinação dos nós T_2 e T_3 . Na Tabela 26 são apresentados os valores das métricas de desempenho referentes a este caso.

Tabela 25: Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós T_2 e T_3 no circuito Biquad de Tow-Thomas usando o PSO.

		Valores Obtidos								
		SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{C_1}	F_{C_2}
Valores Esperados	SF	568	7	43	12	29	21	15	72	33
	F_{R_1}	0	800	74	55	61	30	28	91	52
	F_{R_2}	1	60	800	30	72	29	25	79	81
	F_{R_3}	0	67	71	800	67	22	32	98	74
	F_{R_4}	0	26	78	27	788	26	34	90	90
	F_{R_5}	0	38	38	42	46	800	86	77	47
	F_{R_6}	0	20	59	15	68	84	800	93	68
	F_{C_1}	0	53	44	73	57	25	32	791	51
	F_{C_2}	0	30	81	30	95	35	32	94	787

Tabela 26: Resultados para as métricas consideradas para a combinação dos nós T_2 e T_3 no circuito Biquad de Tow-Thomas usando o PSO.

	SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{C_1}	F_{C_2}	Global
A	97,73	93,25	91,56	93,02	91,55	93,70	93,26	89,96	91,29	92,81
P	71,00	67,17	67,97	64,99	67,99	68,14	66,28	70,25	66,47	67,81
S	99,82	72,66	62,11	73,80	61,42	74,63	73,80	53,27	61,34	70,32
E	97,60	95,73	95,79	95,30	95,86	95,92	95,56	96,18	95,57	95,95

Quando é utilizada a combinação dos nós T_2 e T_3 , observa-se os valores médios da acurácia de 92,81%, da precisão de 67,81%, da sensibilidade de 70,32% e da especificidade de 95,95%. Para o caso sem falhas, obteve-se os melhores resultados para a acurácia, precisão, sensibilidade e especificidade: 97,73%, 71,00%, 99,82% e 97,60%, respectivamente.

Na Tabela 27 é apresentada a matriz de confusão para o circuito 1 utilizando a combinação dos nós $T_1 - T_3$. Na Tabela 28 são apresentados os valores das métricas de desempenho referentes a este caso.

Tabela 27: Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós $T_1 - T_3$ no circuito Biquad de Tow-Thomas usando o PSO.

		Valores Obtidos								
		SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{C_1}	F_{C_2}
Valores Esperados	SF	639	6	20	5	17	20	15	65	13
	F_{R_1}	0	800	72	33	42	32	36	89	37
	F_{R_2}	0	61	800	20	37	36	26	83	34
	F_{R_3}	0	47	39	800	36	26	28	97	30
	F_{R_4}	0	20	50	12	788	30	24	94	88
	F_{R_5}	0	17	27	30	39	798	87	65	30
	F_{R_6}	0	25	39	17	43	86	800	89	49
	F_{C_1}	2	41	23	75	24	25	26	790	24
	F_{C_2}	0	27	56	23	94	32	22	92	789

Tabela 28: Resultados para as métricas consideradas para a combinação dos nós $T_1 - T_3$ no circuito Biquad de Tow-Thomas usando o PSO.

	SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{C_1}	F_{C_2}	Global
A	98,31	93,94	93,55	94,63	93,27	93,97	93,66	90,53	93,26	93,90
P	79,88	70,11	72,93	72,53	71,25	73,01	69,69	76,70	69,52	72,84
S	99,69	76,63	71,05	78,82	70,36	73,55	75,19	53,96	72,12	74,60
E	98,21	96,04	96,52	96,49	96,27	96,56	95,95	97,07	95,96	96,56

Quando é utilizada a combinação dos nós $T_1 - T_3$, observa-se os valores médios da acurácia de 93,90%, da precisão de 72,84%, da sensibilidade de 74,60% e da especificidade de 96,56%. Para o caso sem falhas, obteve-se os melhores resultados para a acurácia, precisão, sensibilidade e especificidade com 98,31%, 79,88%, 99,69% e 98,21%, respectivamente.

A Figura 12 permite a comparação das globais de desempenho analisando os respectivos nós acessíveis do circuito.

A partir do gráfico da Figura 12, observa-se que com o incremento da utilização dos nós acessíveis na análise do circuito há uma melhora nos valores das métricas consideradas. Apesar de ser observado um menor incremento na acurácia e especificidade, observa-se um maior incremento na precisão e na sensibilidade quando da utilização dos três nós acessíveis combinados.

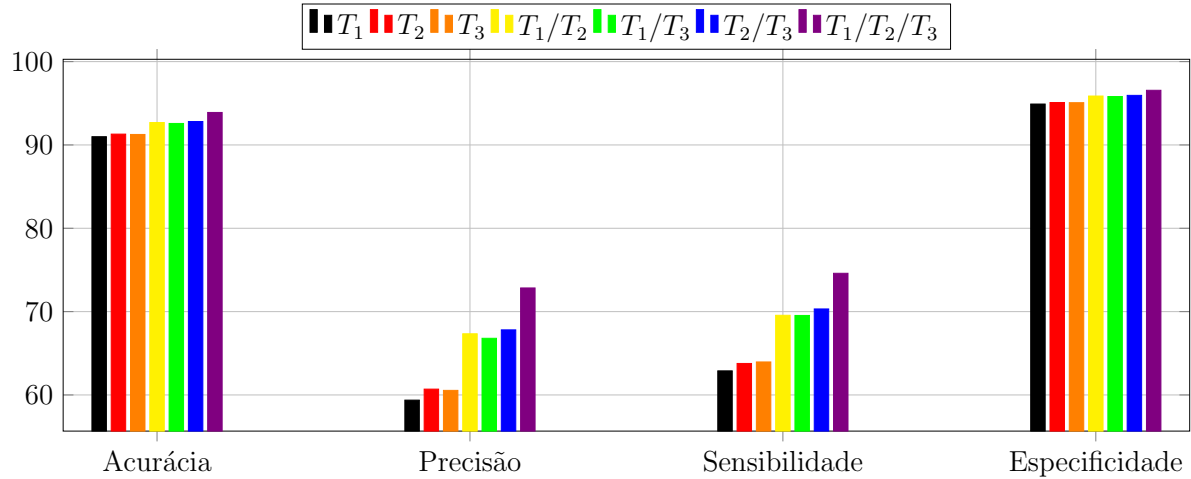


Figura 12: Comparação das métricas de avaliação para o circuito Biquad de Tow-Thomas usando o PSO.

5.3.2 Circuito de Butterworth

Com o *software Circuit Maker*[™] foram realizadas as análises do circuito sob testes, de acordo com a alteração nos valores dos componentes, sendo possível testá-lo sob diferentes circunstâncias. Na Tabela 29 são apresentados os 11 casos diferentes e os valores de tensão medidos em cada nó acessível do circuito. Os componentes têm como valores ideais $10k\Omega$ para os resistores e $10nF$ para os capacitores. Nesta configuração, o circuito se comporta como um filtro passa-baixa.

Tabela 29: Tensão medida nos nós $T_1 - T_5$ no Circuito Butterworth.

Casos	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5
Caso 1: Sem falhas com valores ideais	0,7170-j0,4505	1,4339-j0,9009	1,5904-j1,6511	0,3965-j1,9003	0,7929-j3,8005
Caso 2: Falha em R_1 com valor de $5,0k\Omega$	0,9102-j0,2859	1,8203-j0,5719	2,2054-j1,3447	0,9754-j1,9576	1,9509-j3,9152
Caso 3: Falha em R_2 com valor de $4,0k\Omega$	0,7170-j0,4505	2,5093-j1,5767	2,7833-j2,8895	0,6938-j3,3254	1,3876-j6,6509
Caso 4: Falha em R_3 com valor de $6,0k\Omega$	0,7170-j0,4505	1,1471-j0,7208	1,2723-j1,3209	0,3172-j1,5202	0,6344-j3,0404
Caso 5: Falha em R_4 com valor de $5,0k\Omega$	0,7170-j0,4505	1,4339-j0,9010	1,5450-j1,2095	0,5629-j1,5632	1,1257-j3,1263
Caso 6: Falha em R_5 com valor de $6,0k\Omega$	0,7170-j0,4505	1,4339-j0,9010	1,6806-j1,3025	1,0416-j1,6952	2,0832-j3,3903
Caso 7: Falha em R_6 com valor de $4,0k\Omega$	0,7170-j0,4505	1,4339-j0,9010	2,6032+j1,3513	2,4751-j0,2039	8,6628-j0,7135
Caso 8: Falha em R_7 com valor de $5,0k\Omega$	0,7170-j0,4505	1,4339-j0,9010	0,9648-j1,5025	0,0149-j1,5119	0,0224-j2,2678
Caso 9: Falha em C_1 com valor de $4nF$	0,9406-j0,2364	1,8812-j0,4728	2,3177-j1,2343	1,1056-j1,929	2,2112-j3,8580
Caso 10: Falha em C_2 com valor de $5nF$	0,7170-j0,4505	1,4339-j0,9010	1,0475-j1,2300	0,1969-j1,3537	0,3938-j2,7075
Caso 11: Falha em C_3 com valor de $4nF$	0,7170-j0,4505	1,4339-j0,9010	2,0225-j0,3401	1,8219-j0,7981	3,6438-j1,5961

Nos Casos de 2 – 11, apenas os componentes indicados são alterados em relação aos valores referentes ao Caso 1. Como o circuito apresenta cinco nós acessíveis, têm-se 31 combinações possíveis: cinco considerando apenas um único nó, dez considerando a combinação de dois nós, dez considerando a combinação de três nós, cinco considerando a combinação de quatro nós e um considerando a combinação dos cinco nós. Nesta seção

são apresentados os resultados para o estudo de caso, conforme Tabela 30. Os resultados obtidos dos processos de otimização caso a caso, utilizando o PSO, são apresentados no Apêndice B.

Tabela 30: Incremento dos nós utilizados no Circuito Butterworth.

# nós	Combinação
1	T_1, T_2, T_3, T_4 e T_5
2	$T_1/T_2, T_1/T_3, T_1/T_4, T_1/T_5, T_2/T_3, T_2/T_4, T_2/T_5, T_3/T_4, T_3/T_5$ e T_4/T_5
3	$T_1/T_2/T_3, T_1/T_2/T_4, T_1/T_2/T_5, T_1/T_3/T_4, T_1/T_3/T_5, T_1/T_4/T_5, T_2/T_3/T_4, T_2/T_3/T_5, T_2/T_4/T_5$ e $T_3/T_4/T_5$
4	$T_1/T_2/T_3/T_4, T_1/T_2/T_3/T_5, T_1/T_2/T_4/T_5, T_1/T_3/T_4/T_5$ e $T_2/T_3/T_4/T_5$
5	$T_1/T_2/T_3/T_4/T_5$

Na Tabela 31 é apresentada a matriz de confusão para o circuito 2 utilizando o nó T_3 individualmente. Na Tabela 32 são apresentados os valores das métricas de desempenho referentes a este caso.

Tabela 31: Matriz de confusão dos resultados do nó T_1 no Circuito Butterworth usando o PSO.

		Valores Obtidos										
		SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}
Valores Esperados	SF	153	97	97	34	98	97	97	93	37	99	98
	F_{R_1}	8	965	92	26	95	98	98	97	32	98	96
	F_{R_2}	6	97	968	28	99	97	96	98	36	100	99
	F_{R_3}	1	99	100	986	98	97	97	99	86	95	97
	F_{R_4}	10	98	95	36	968	98	97	96	29	99	98
	F_{R_5}	6	96	94	36	98	977	97	99	29	94	95
	F_{R_6}	7	99	97	33	96	97	970	99	34	96	99
	F_{R_7}	4	98	96	36	96	99	100	975	18	96	98
	F_{C_1}	75	99	100	92	98	99	98	99	985	98	97
	F_{C_2}	9	99	95	30	97	97	100	98	25	968	98
F_{C_3}	7	97	97	31	96	97	97	97	25	98	975	

Tabela 32: Resultados referentes às métricas consideradas para o nó T_1 no Circuito Butterworth usando o PSO.

	SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}	Global
A	94,72	90,73	90,73	93,25	90,69	90,73	90,65	90,75	92,96	90,72	90,74	91,25
P	15,30	56,60	56,15	53,15	56,15	56,77	56,17	56,82	50,77	56,41	56,79	55,46
S	53,50	49,64	50,13	72,08	49,92	50,03	49,82	50,00	73,73	49,87	50,00	55,06
E	95,36	95,54	95,45	94,94	95,45	95,52	95,44	95,53	94,45	95,50	95,53	95,31

Quando é utilizado o nó T_1 , observa-se os valores médios da acurácia de 91,25%, da precisão de 55,46%, da sensibilidade de 55,06% e da especificidade de 95,31%. Obteve-se

o melhor resultado para a acurácia no caso sem falhas com valor de 94,72%. O melhor resultado de precisão foi obtido para o caso de falha em C_2 com valor de 56,79%. O caso com falha em C_1 apresentou o melhor resultado da sensibilidade com 73,73%. E o caso de falha em R_1 teve o melhor desempenho na especificidade com resultado de 95,54%.

Na Tabela 33 é apresentada a matriz de confusão para o circuito 2 utilizando o nó T_3 individualmente. Na Tabela 34 são apresentados os valores das métricas de desempenho referentes a este caso.

Tabela 33: Matriz de confusão dos resultados do nó T_2 no Circuito Butterworth usando o PSO.

		Valores Obtidos										
		SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}
Valores Esperados	SF	356	7	14	16	97	98	96	99	19	99	99
	F_{R_1}	0	999	84	32	96	95	100	99	39	98	98
	F_{R_2}	0	82	1000	33	97	99	98	96	39	99	99
	F_{R_3}	84	96	82	561	97	98	97	99	64	100	98
	F_{R_4}	7	99	86	57	961	97	99	97	57	99	98
	F_{R_5}	9	19	21	20	100	972	98	95	20	97	95
	F_{R_6}	10	12	9	17	97	95	975	98	17	99	95
	F_{R_7}	14	15	19	19	96	98	98	978	12	95	98
	F_{C_1}	0	40	33	92	98	99	99	98	988	98	100
	F_{C_2}	17	16	18	19	97	97	98	99	20	960	96
	F_{C_3}	10	20	15	24	96	97	97	99	17	99	973

Tabela 34: Resultados referentes às métricas consideradas para o nó T_2 no Circuito Butterworth usando o PSO.

	SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}	Global
A	95,37	93,31	93,45	92,75	89,70	90,98	91,09	91,01	93,82	90,91	90,97	91,63
P	35,60	57,41	57,41	38,01	54,70	62,87	63,98	63,42	56,62	62,46	62,90	58,04
S	70,22	71,10	72,41	63,03	49,74	49,97	49,87	49,97	76,47	49,41	49,92	56,76
E	96,13	95,30	95,30	94,37	94,77	96,23	96,39	96,29	95,23	96,21	96,23	95,67

Quando é utilizado o nó T_2 , observa-se os valores médios da acurácia de 91,63%, da precisão de 58,04%, da sensibilidade de 56,76% e da especificidade de 95,67%. Obteve-se o melhor resultado para a acurácia no caso sem falhas com valor de 95,37%. O caso de falha no resistor R_6 apresentou os melhores desempenhos nas métricas de precisão e especificidade com valores de 63,98% e 96,39%, respectivamente. O caso com falha em C_1 apresentou o melhor resultado da sensibilidade com 76,47%.

Na Tabela 35 é apresentada a matriz de confusão para o circuito 2 utilizando o nó T_3 individualmente. Na Tabela 36 são apresentados os valores das métricas de desempenho referentes a este caso.

Tabela 35: Matriz de confusão dos resultados do nó T_3 no Circuito Butterworth usando o PSO.

		Valores Obtidos										
		SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}
Valores Esperados	SF	479	57	47	63	59	54	49	66	66	38	22
	F_{R_1}	0	1000	87	74	86	85	62	87	79	96	47
	F_{R_2}	0	88	990	69	94	88	74	88	72	85	62
	F_{R_3}	2	74	55	979	80	87	74	83	92	48	72
	F_{R_4}	0	79	68	55	990	92	71	85	63	71	72
	F_{R_5}	0	80	77	77	90	974	65	71	80	82	67
	F_{R_6}	1	89	71	98	86	77	975	91	97	75	76
	F_{R_7}	0	64	68	85	66	94	92	997	74	64	81
	F_{C_1}	0	69	71	96	83	95	79	77	990	48	83
	F_{C_2}	0	86	84	55	81	98	82	90	56	993	80
	F_{C_3}	0	76	65	83	92	87	75	88	88	75	986

Tabela 36: Resultados referentes às métricas consideradas para o nó T_3 no Circuito Butterworth usando o PSO.

	SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}	Global
A	97,07	91,82	92,11	92,06	91,77	91,36	91,71	91,54	91,80	92,21	92,23	91,87
P	47,90	58,72	57,89	59,48	60,15	58,57	56,16	59,17	58,55	58,24	57,49	58,41
S	99,38	56,75	58,82	56,46	54,79	53,19	57,42	54,69	56,35	59,28	59,83	56,76
E	97,01	95,64	95,56	95,87	95,92	95,71	95,30	95,72	95,66	95,61	95,51	95,65

Quando é utilizado o nó T_3 , observa-se os valores médios da acurácia de 91,87%, da precisão de 58,41%, da sensibilidade de 56,76% e da especificidade de 95,65%. Para o caso sem falhas, obteve-se os melhores resultados para a acurácia, sensibilidade e especificidade: 97,07%, 99,38% e 97,01%, respectivamente. O caso de falha no resistor R_4 teve a melhor medida de precisão com 60,15%.

Na Tabela 37 é apresentada a matriz de confusão para o circuito 2 utilizando o nó T_4 individualmente. Na Tabela 38 são apresentados os valores das métricas de desempenho referentes a este caso.

Quando é utilizado o nó T_4 , observa-se um valor médio da acurácia de 91,90%, uma precisão de 58,76%, uma sensibilidade de 57,02% e uma especificidade de 95,69%. Para o caso sem falhas, obteve-se os melhores resultados para a acurácia, sensibilidade e

Tabela 37: Matriz de confusão dos resultados do nó T_4 no Circuito Butterworth usando o PSO.

		Valores Obtidos										
		SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}
Valores Esperados	SF	473	52	55	73	52	42	59	69	77	28	20
	F_{R_1}	0	1000	84	79	86	74	82	83	86	91	32
	F_{R_2}	1	92	986	90	94	63	68	89	86	91	23
	F_{R_3}	1	70	68	966	72	70	77	81	90	45	69
	F_{R_4}	0	69	75	71	987	72	89	92	70	86	44
	F_{R_5}	0	68	74	92	85	977	76	85	92	80	71
	F_{R_6}	1	89	74	97	72	79	980	87	95	76	73
	F_{R_7}	0	71	66	70	74	77	93	994	80	70	61
	F_{C_1}	1	53	63	95	77	87	78	74	983	50	71
	F_{C_2}	0	79	87	77	86	72	87	91	72	984	43
	F_{C_3}	0	67	56	92	86	92	82	91	92	77	988

Tabela 38: Resultados referentes às métricas consideradas para o nó T_4 no Circuito Butterworth usando o PSO.

	SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}	Global
A	97,01	92,08	92,12	91,67	91,82	91,83	91,36	91,53	91,61	92,18	93,01	91,90
P	47,30	58,93	58,59	60,04	59,64	57,47	56,88	60,02	60,23	58,64	57,34	58,76
S	99,16	58,48	58,41	53,61	55,73	57,30	55,34	54,14	53,92	58,64	66,09	57,02
E	96,95	95,66	95,66	95,97	95,82	95,50	95,35	95,84	95,93	95,68	95,48	95,69

especificidade: 97,01%, 99,16% e 96,95%, respectivamente. O caso de falha no capacitor C_1 teve a melhor medida de precisão com 60,23%.

Na Tabela 39 é apresentada a matriz de confusão para o circuito 2 utilizando o nó T_5 individualmente. Na Tabela 40 são apresentados os valores das métricas de desempenho referentes a este caso.

Quando é utilizado o nó T_5 , observa-se os valores médios da acurácia de 91,97%, da precisão de 58,78%, da sensibilidade de 57,55% e da especificidade de 95,69%. Para o caso sem falhas, obteve-se os melhores resultados para a acurácia, precisão, sensibilidade e especificidade: 97,01%, 98,96% e 96,96%, respectivamente. O caso de falha no resistor R_3 teve a melhor medida de precisão com 60,35%.

Na Tabela 41 é apresentada a matriz de confusão para o circuito 2 utilizando a combinação dos nós T_1 e T_2 . Na Tabela 42 são apresentados os valores das métricas de desempenho referentes a este caso.

Quando é utilizada a combinação dos nós T_1 e T_2 , observa-se os valores médios da acurácia de 91,77%, da precisão de 59,20%, da sensibilidade de 57,66% e da especificidade

Tabela 39: Matriz de confusão dos resultados do nó T_5 no Circuito Butterworth usando o PSO.

		Valores Obtidos										
		SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}
Valores Esperados	SF	474	72	71	72	56	39	33	36	76	54	17
	F_{R_1}	0	998	87	90	91	55	74	79	84	96	32
	F_{R_2}	0	91	985	86	91	68	65	87	82	91	45
	F_{R_3}	5	76	67	962	86	75	56	48	94	66	59
	F_{R_4}	0	82	80	76	994	64	70	74	80	92	42
	F_{R_5}	0	75	68	88	90	977	53	64	88	87	72
	F_{R_6}	0	84	83	96	95	62	995	94	95	90	48
	F_{R_7}	0	89	90	78	84	71	87	988	76	93	46
	F_{C_1}	0	84	77	97	85	88	53	46	979	64	71
	F_{C_2}	0	85	89	71	88	74	76	83	78	990	44
	F_{C_3}	0	74	76	91	91	88	62	66	90	84	989

Tabela 40: Resultados referentes às métricas consideradas para o nó T_5 no Circuito Butterworth usando o PSO.

	SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}	Global
A	97,01	91,56	91,59	91,69	91,46	92,29	92,25	92,17	91,51	91,53	93,26	91,97
P	47,40	59,19	58,25	60,35	60,10	58,78	57,12	58,05	59,55	59,00	57,80	58,78
S	98,96	55,14	55,56	53,24	53,70	58,82	61,27	59,34	53,73	54,79	67,51	57,55
E	96,96	95,69	95,59	96,04	95,85	95,75	95,37	95,56	95,83	95,69	95,57	95,69

Tabela 41: Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós T_1 e T_2 no Circuito Butterworth usando o PSO.

		Valores Obtidos										
		SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}
Valores Esperados	SF	359	17	12	19	99	98	97	94	10	96	99
	F_{R_1}	0	1000	84	35	96	98	98	95	42	98	97
	F_{R_2}	0	88	1000	35	99	99	100	97	31	100	99
	F_{R_3}	17	96	79	881	98	95	99	97	61	95	100
	F_{R_4}	8	100	88	62	971	97	99	97	56	98	98
	F_{R_5}	17	15	24	26	99	960	96	99	22	98	95
	F_{R_6}	16	19	17	21	98	96	969	96	15	93	97
	F_{R_7}	18	15	20	27	98	96	99	974	22	98	98
	F_{C_1}	0	40	38	93	96	99	98	100	989	99	99
	F_{C_2}	12	24	18	16	94	97	100	97	20	975	100
	F_{C_3}	12	13	18	22	99	96	95	98	19	98	978

de 95,74%. Para o caso sem falhas, obteve-se os melhores resultados para a acurácia e sensibilidade: 95,76% e 78,21%, respectivamente. O caso de falha no resistor C_3 obteve

Tabela 42: Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós T_1 e T_2 no Circuito Butterworth usando o PSO.

	SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}	Global
A	95,76	93,31	93,45	93,18	89,83	91,07	91,14	91,07	93,94	91,13	91,13	91,77
P	35,90	57,37	57,21	51,28	54,74	61,90	63,04	62,24	56,48	62,78	63,18	59,20
S	78,21	70,08	71,53	71,22	49,87	49,72	49,69	50,10	76,85	50,05	49,90	57,66
E	96,24	95,37	95,35	94,85	94,83	96,20	96,34	96,20	95,30	96,28	96,33	95,74

os melhores desempenhos para as métricas de precisão e especificidade com valores de 63,18% e 96,33%, respectivamente.

Na Tabela 43 é apresentada a matriz de confusão para o circuito 2 utilizando a combinação dos nós T_1 e T_3 . Na Tabela 44 são apresentados os valores das métricas de desempenho referentes a este caso.

Tabela 43: Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós T_1 e T_3 no Circuito Butterworth usando o PSO.

		Valores Obtidos										
		SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}
Valores Esperados	SF	624	49	46	32	40	49	40	57	30	22	11
	F_{R_1}	0	999	86	60	78	90	70	88	61	88	32
	F_{R_2}	0	86	981	38	82	83	60	71	44	97	30
	F_{R_3}	0	67	59	985	67	74	61	74	89	47	33
	F_{R_4}	0	59	66	29	999	94	68	74	29	84	53
	F_{R_5}	0	80	71	40	91	991	55	61	45	58	44
	F_{R_6}	0	87	76	82	90	71	991	93	91	72	80
	F_{R_7}	0	79	70	37	53	89	90	998	29	60	98
	F_{C_1}	0	66	63	94	72	68	56	76	996	49	50
	F_{C_2}	0	84	82	28	66	99	84	86	24	991	69
F_{C_3}	0	84	67	54	86	82	66	77	46	57	1000	

Tabela 44: Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós T_1 e T_3 no Circuito Butterworth usando o PSO.

	SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}	Global
A	97,79	91,81	92,50	93,75	92,48	92,11	91,83	92,00	93,65	92,62	93,43	92,71
P	62,40	60,47	62,40	63,30	64,24	64,52	57,18	62,26	62,64	61,44	61,77	62,20
S	100,00	57,41	58,85	66,60	57,95	55,36	60,39	56,87	67,12	60,98	66,67	61,20
E	97,71	95,73	96,15	96,33	96,37	96,42	95,18	96,04	96,18	95,96	96,01	96,07

Quando é utilizada a combinação dos nós T_1 e T_3 , observa-se os valores médios da acurácia de 92,71%, da precisão de 62,20%, da sensibilidade de 61,20% e da especificidade

de 96,07%. Para o caso sem falhas, obteve-se os melhores resultados para a acurácia, sensibilidade e especificidade: 97,79%, 100,00% e 97,71%, respectivamente. O caso de falha no resistor R_5 teve a melhor medida de precisão com 64,52%.

Na Tabela 45 é apresentada a matriz de confusão para o circuito 2 utilizando a combinação dos nós T_1 e T_4 . Na Tabela 46 são apresentados os valores das métricas de desempenho referentes a este caso.

Tabela 45: Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós T_1 e T_4 no Circuito Butterworth usando o PSO.

		Valores Obtidos										
		SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}
Valores Esperados	SF	634	36	40	21	43	42	49	67	32	23	13
	F_{R_1}	0	999	82	71	84	53	69	88	51	94	22
	F_{R_2}	0	88	988	39	87	65	76	86	44	93	14
	F_{R_3}	1	72	46	984	65	62	65	79	86	42	30
	F_{R_4}	0	72	77	43	994	60	81	90	41	86	22
	F_{R_5}	0	72	58	54	84	993	63	76	51	65	68
	F_{R_6}	0	81	79	84	76	82	984	92	83	74	78
	F_{R_7}	0	75	71	28	68	71	90	995	26	69	59
	F_{C_1}	0	66	57	95	66	58	65	76	992	41	27
	F_{C_2}	0	82	90	27	92	68	92	93	28	994	27
F_{C_3}	0	67	50	48	76	94	74	89	60	75	997	

Tabela 46: Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós T_1 e T_4 no Circuito Butterworth usando o PSO.

	SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}	Global
A	97,83	92,16	92,65	93,74	92,23	92,63	91,41	91,76	93,77	92,54	94,13	92,76
P	63,40	61,93	62,53	64,23	63,47	62,69	57,44	64,11	64,29	62,40	61,17	62,48
S	99,84	58,42	60,32	65,86	57,29	60,25	57,61	54,34	66,40	60,02	73,47	61,73
E	97,75	95,96	96,12	96,44	96,23	96,13	95,20	96,31	96,42	96,07	95,93	96,10

Quando é utilizada a combinação dos nós T_1 e T_4 , observa-se os valores médios da acurácia de 92,76%, da precisão de 62,48%, da sensibilidade de 61,73% e da especificidade de 96,10%. Para o caso sem falhas, obteve-se os melhores resultados para a acurácia, sensibilidade e especificidade: 97,83%, 99,84% e 97,75%, respectivamente. O caso de falha no resistor C_1 teve a melhor medida de precisão com 64,29%.

Na Tabela 47 é apresentada a matriz de confusão para o circuito 2 utilizando a combinação dos nós T_1 e T_5 . Na Tabela 48 são apresentados os valores das métricas de desempenho referentes a este caso.

Tabela 47: Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós T_1 e T_5 no Circuito Butterworth usando o PSO.

		Valores Obtidos										
		SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}
Valores Esperados	SF	559	59	62	42	53	42	41	39	43	48	12
	F_{R_1}	0	999	84	83	89	70	70	83	76	93	24
	F_{R_2}	1	89	985	62	88	66	59	77	55	93	25
	F_{R_3}	1	76	72	980	80	63	58	40	92	63	57
	F_{R_4}	0	81	82	54	990	68	65	63	45	87	31
	F_{R_5}	0	75	66	70	95	985	46	54	69	85	73
	F_{R_6}	1	94	83	89	93	71	996	92	91	95	46
	F_{R_7}	0	86	89	42	76	59	89	992	46	91	47
	F_{C_1}	0	72	75	97	68	76	46	53	990	65	50
	F_{C_2}	0	89	83	42	90	64	82	82	39	985	18
	F_{C_3}	0	77	71	68	91	92	50	60	76	77	995

Tabela 48: Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós T_1 e T_5 no Circuito Butterworth usando o PSO.

	SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}	Global
A	97,42	91,47	91,98	92,74	91,88	92,43	92,10	92,64	92,84	91,95	93,93	92,50
P	55,90	59,78	61,56	61,95	63,22	60,88	56,88	61,35	62,19	62,58	60,05	61,18
S	99,47	55,59	56,22	60,16	54,61	59,48	62,17	60,67	61,04	55,27	72,21	60,20
E	97,35	95,65	96,03	96,14	96,26	95,94	95,17	95,99	96,14	96,19	95,82	95,96

Quando é utilizada a combinação dos nós T_1 e T_5 , observa-se os valores médios da acurácia de 92,50%, da precisão de 61,18%, da sensibilidade de 60,20% e da especificidade de 95,96%. Para o caso sem falhas, obteve-se os melhores resultados para a acurácia, sensibilidade e especificidade: 97,42%, 99,47% e 97,35%, respectivamente. O caso de falha no resistor R_4 teve a melhor medida de precisão com 63,22%.

Na Tabela 49 é apresentada a matriz de confusão para o circuito 2 utilizando a combinação dos nós T_2 e T_3 . Na Tabela 50 são apresentados os valores das métricas de desempenho referentes a este caso.

Quando é utilizada a combinação dos nós T_2 e T_3 , observa-se os valores médios da acurácia de 93,37%, da precisão de 65,97%, da sensibilidade de 65,00% e da especificidade de 96,43%. Para o caso sem falhas, obteve-se os melhores resultados para a acurácia, sensibilidade e especificidade: 98,04%, 95,63% e 98,16%, respectivamente. O caso de falha no resistor R_5 teve a melhor medida de precisão com 72,75%.

Tabela 49: Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós T_2 e T_3 no Circuito Butterworth usando o PSO.

		Valores Obtidos										
		SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}
Valores Esperados	SF	722	16	30	29	34	46	38	46	12	12	15
	F_{R_1}	0	1000	87	35	66	58	54	66	36	17	22
	F_{R_2}	0	87	1000	25	54	71	45	59	28	24	27
	F_{R_3}	33	68	50	825	95	96	90	78	74	43	100
	F_{R_4}	0	92	81	47	996	93	85	96	48	99	82
	F_{R_5}	0	30	27	24	86	985	38	48	27	34	55
	F_{R_6}	0	50	47	66	71	61	998	86	59	65	61
	F_{R_7}	0	16	25	21	49	82	88	999	25	46	74
	F_{C_1}	0	27	29	94	67	70	54	55	989	19	23
	F_{C_2}	0	19	24	19	52	98	80	89	22	1000	63
	F_{C_3}	0	37	39	31	79	80	73	68	31	32	999

Tabela 50: Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós T_2 e T_3 no Circuito Butterworth usando o PSO.

	SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}	Global
A	98,04	94,42	94,58	92,94	91,31	92,90	92,35	92,95	94,95	94,59	93,74	93,37
P	72,20	69,40	70,42	53,16	57,94	72,75	63,81	70,11	69,31	68,21	68,01	65,97
S	95,63	69,35	69,49	67,85	60,40	56,61	60,74	59,11	73,21	71,89	65,68	65,00
E	98,16	96,94	97,08	95,03	94,90	97,38	96,01	96,99	96,98	96,77	96,72	96,43

Na Tabela 51 é apresentada a matriz de confusão para o circuito 2 utilizando a combinação dos nós T_2 e T_4 . Na Tabela 52 são apresentados os valores das métricas de desempenho referentes a este caso.

Tabela 51: Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós T_2 e T_4 no Circuito Butterworth usando o PSO.

		Valores Obtidos										
		SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}
Valores Esperados	SF	730	18	23	14	42	33	47	55	19	14	5
	F_{R_1}	0	999	82	33	72	49	58	74	33	31	18
	F_{R_2}	0	86	980	28	65	47	53	65	34	26	15
	F_{R_3}	58	73	60	780	85	96	88	76	68	62	93
	F_{R_4}	0	99	90	53	999	64	82	93	48	98	41
	F_{R_5}	0	29	28	30	82	995	62	73	26	33	62
	F_{R_6}	0	49	47	53	68	72	994	88	55	60	69
	F_{R_7}	0	25	17	21	60	51	85	999	19	52	59
	F_{C_1}	0	31	29	93	54	50	62	69	994	28	17
	F_{C_2}	0	18	22	19	82	62	83	90	21	1000	15
	F_{C_3}	0	34	37	31	58	81	73	83	35	40	997

Tabela 52: Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós T_2 e T_4 no Circuito Butterworth usando o PSO.

	SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}	Global
A	97,91	94,20	94,57	92,79	91,50	93,45	92,03	92,66	94,97	94,56	94,49	93,45
P	73,00	68,94	70,05	50,68	59,93	70,07	63,92	71,97	69,66	70,82	67,87	66,11
S	92,64	68,38	69,26	67,53	59,93	62,19	58,92	56,60	73,52	69,25	71,68	65,43
E	98,19	96,85	97,07	94,79	95,25	96,99	96,00	97,21	96,99	97,12	96,71	96,46

Quando é utilizada a combinação dos nós T_2 e T_4 , observa-se os valores médios da acurácia de 93,45%, da precisão de 66,11%, da sensibilidade de 65,43% e da especificidade de 96,46%. Para o caso sem falhas, obteve-se os melhores resultados para a acurácia, precisão, sensibilidade e especificidade: 97,91%, 73,00%, 92,64% e 98,19%, respectivamente.

Na Tabela 53 é apresentada a matriz de confusão para o circuito 2 utilizando a combinação dos nós T_2 e T_5 . Na Tabela 54 são apresentados os valores das métricas de desempenho referentes a este caso.

Tabela 53: Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós T_2 e T_5 no Circuito Butterworth usando o PSO.

		Valores Obtidos										
		SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}
Valores Esperados	SF	699	26	32	25	58	29	27	32	26	39	7
	F_{R_1}	0	999	82	55	75	46	49	41	63	68	25
	F_{R_2}	0	88	988	43	73	58	56	48	46	67	18
	F_{R_3}	28	69	52	874	86	96	52	41	76	60	87
	F_{R_4}	0	97	74	57	999	58	61	73	51	94	39
	F_{R_5}	0	39	51	50	90	988	35	40	48	73	74
	F_{R_6}	0	77	72	83	95	57	997	91	83	68	66
	F_{R_7}	0	33	39	32	62	44	91	995	31	92	33
	F_{C_1}	0	44	44	95	64	59	42	38	997	58	21
	F_{C_2}	0	37	38	33	85	62	84	81	32	990	18
F_{C_3}	0	46	45	68	90	94	36	54	63	80	995	

Tabela 54: Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós T_2 e T_5 no Circuito Butterworth usando o PSO.

	SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}	Global
A	97,97	93,47	93,68	92,68	91,49	93,21	92,45	93,86	93,94	92,80	94,06	93,13
P	69,90	66,47	66,53	57,46	62,32	66,40	59,03	68,53	68,19	67,81	63,34	64,40
S	96,15	64,24	65,13	61,77	56,22	62,10	65,16	64,86	65,77	58,61	71,95	63,51
E	98,06	96,57	96,62	95,63	95,82	96,59	95,29	96,89	96,84	96,77	96,12	96,29

Quando é utilizada a combinação dos nós T_2 e T_5 , observa-se os valores médios da acurácia de 93,13%, da precisão de 64,40%, da sensibilidade de 63,51% e da especificidade de 96,29%. Para o caso sem falhas, obteve-se os melhores resultados para a acurácia, precisão, sensibilidade e especificidade: 97,97%, 69,90%, 96,15% e 98,06%, respectivamente.

Na Tabela 55 é apresentada a matriz de confusão para o circuito 2 utilizando a combinação dos nós T_3 e T_4 . Na Tabela 56 são apresentados os valores das métricas de desempenho referentes a este caso.

Tabela 55: Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós T_3 e T_4 no Circuito Butterworth usando o PSO.

		Valores Obtidos										
		SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}
Valores Esperados	SF	575	49	54	59	44	19	46	55	56	26	17
	F_{R_1}	0	1000	88	68	82	50	67	81	75	90	28
	F_{R_2}	0	88	986	69	84	42	68	77	73	91	30
	F_{R_3}	0	63	52	981	62	36	71	77	97	43	48
	F_{R_4}	0	67	70	51	998	36	65	84	54	84	27
	F_{R_5}	0	51	47	75	86	998	42	66	73	62	68
	F_{R_6}	0	73	71	99	72	56	991	90	96	61	60
	F_{R_7}	0	76	64	71	54	33	94	996	69	53	37
	F_{C_1}	1	62	65	100	73	41	68	80	991	44	51
	F_{C_2}	0	83	85	38	76	30	81	94	35	991	28
	F_{C_3}	0	58	56	85	86	82	66	78	83	73	995

Tabela 56: Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós T_3 e T_4 no Circuito Butterworth usando o PSO.

	SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}	Global
A	97,47	92,30	92,45	92,51	92,55	94,10	92,02	92,10	92,32	93,02	93,71	92,75
P	57,50	61,39	61,32	64,12	64,97	63,65	59,38	64,38	62,88	64,31	59,87	62,76
S	99,83	59,88	60,20	57,84	58,12	70,13	59,73	56,02	58,23	61,25	71,63	61,46
E	97,39	95,86	95,92	96,38	96,45	96,31	95,54	96,35	96,14	96,39	95,69	96,13

Quando é utilizada a combinação dos nós T_3 e T_4 , observa-se os valores médios da acurácia de 92,75%, da precisão de 62,76%, da sensibilidade de 61,46% e da especificidade de 96,13%. Para o caso sem falhas, obteve-se os melhores resultados para a acurácia, sensibilidade e especificidade: 97,47%, 99,83% e 97,39%, respectivamente. O caso de falha no resistor R_4 teve a melhor medida de precisão com 64,97%.

Na Tabela 57 é apresentada a matriz de confusão para o circuito 2 utilizando a combinação dos nós T_3 e T_5 . Na Tabela 58 são apresentados os valores das métricas de desempenho referentes a este caso.

Tabela 57: Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós T_3 e T_5 no Circuito Butterworth usando o PSO.

		Valores Obtidos										
		SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}
Valores Esperados	SF	634	57	54	53	45	30	19	17	48	30	13
	F_{R_1}	0	998	88	79	85	41	51	58	64	85	19
	F_{R_2}	72	88	989	68	85	57	51	66	69	58	26
	F_{R_3}	0	69	63	980	71	39	38	34	91	44	51
	F_{R_4}	0	71	66	48	996	45	34	30	35	81	29
	F_{R_5}	0	57	60	78	88	998	30	42	70	71	62
	F_{R_6}	0	89	83	98	93	53	999	93	89	75	33
	F_{R_7}	0	58	64	56	45	33	91	1000	59	55	21
	F_{C_1}	0	60	63	97	75	46	43	35	998	49	56
	F_{C_2}	0	85	87	48	73	42	43	46	44	991	22
	F_{C_3}	0	62	60	88	81	83	38	38	83	64	998

Tabela 58: Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós T_3 e T_5 no Circuito Butterworth usando o PSO.

	SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}	Global
A	97,34	92,31	91,93	92,63	92,83	93,76	93,05	94,28	92,85	93,30	94,35	93,22
P	63,40	63,65	60,71	66,22	69,41	64,14	58,59	67,48	65,57	66,91	62,57	64,62
S	89,80	58,91	58,97	57,89	57,34	68,03	69,52	68,54	60,48	61,82	75,04	64,18
E	97,68	96,14	95,67	96,61	97,02	96,28	95,30	96,79	96,46	96,70	96,05	96,32

Quando é utilizada a combinação dos nós T_3 e T_5 , observa-se os valores médios da acurácia de 93,22%, da precisão de 64,62%, da sensibilidade de 64,18% e da especificidade de 96,32%. Para o caso sem falhas, obteve-se os melhores resultados para a acurácia, sensibilidade e especificidade: 97,34%, 89,80% e 97,68%, respectivamente. O caso de falha no resistor R_4 teve a melhor medida de precisão com 69,41%.

Na Tabela 59 é apresentada a matriz de confusão para o circuito 2 utilizando a combinação dos nós T_4 e T_5 . Na Tabela 60 são apresentados os valores das métricas de desempenho referentes a este caso.

Quando é utilizada a combinação dos nós T_4 e T_5 , observa-se os valores médios da acurácia de 92,50%, da precisão de 61,37%, da sensibilidade de 60,54% e da especificidade de 95,96%. Para o caso sem falhas, obteve-se os melhores resultados para a acurácia,

Tabela 59: Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós T_4 e T_5 no Circuito Butterworth usando o PSO.

		Valores Obtidos										
		SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}
Valores Esperados	SF	557	57	56	77	54	38	25	22	72	35	7
	F_{R_1}	0	999	85	84	89	51	51	46	86	91	13
	F_{R_2}	0	90	989	86	92	67	49	67	81	89	18
	F_{R_3}	0	63	70	975	61	80	41	38	90	50	65
	F_{R_4}	0	75	75	68	995	56	32	36	72	93	34
	F_{R_5}	0	58	61	86	94	978	34	38	88	72	72
	F_{R_6}	0	91	88	96	93	73	993	88	97	86	54
	F_{R_7}	0	58	58	83	71	60	89	1000	77	77	28
	F_{C_1}	3	75	68	98	85	83	52	52	971	55	78
	F_{C_2}	0	83	84	57	91	74	41	46	65	991	35
	F_{C_3}	0	70	79	92	84	96	46	51	87	73	987

Tabela 60: Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós T_4 e T_5 no Circuito Butterworth usando o PSO.

	SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}	Global
A	97,39	92,30	92,02	91,89	92,07	92,50	92,82	93,65	91,43	92,41	93,67	92,50
P	55,70	62,63	60,75	63,60	64,78	61,86	56,45	62,46	59,94	63,24	59,28	61,37
S	99,46	58,12	57,73	54,11	55,00	59,06	68,34	67,39	54,37	57,89	70,96	60,54
E	97,32	96,12	95,84	96,35	96,46	96,09	95,10	96,15	95,76	96,25	95,68	95,96

sensibilidade e especificidade: 97,39%, 99,46% e 97,32%, respectivamente. O caso de falha no resistor R_4 teve a melhor medida de precisão com 64,78%.

Na Tabela 61 é apresentada a matriz de confusão para o circuito 2 utilizando a combinação dos nós T_1 , T_2 e T_3 . Na Tabela 62 são apresentados os valores das métricas de desempenho referentes a este caso.

Quando é utilizada a combinação dos nós T_1 , T_2 e T_3 , observa-se os valores médios da acurácia de 93,40%, da precisão de 66,16%, da sensibilidade de 65,19% e da especificidade de 96,44%. Para o caso sem falhas, obteve-se os melhores resultados para a acurácia, precisão, sensibilidade e especificidade: 98,24%, 72,80%, 98,78% e 98,21%, respectivamente.

Na Tabela 63 é apresentada a matriz de confusão para o circuito 2 utilizando a combinação dos nós T_1 , T_2 e T_4 . Na Tabela 64 são apresentados os valores das métricas de desempenho referentes a este caso.

Quando é utilizada a combinação dos nós T_1 , T_2 e T_4 , observa-se os valores médios da acurácia de 93,50%, da precisão de 66,24%, da sensibilidade de 65,91% e da

Tabela 61: Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós T_1 , T_2 e T_3 no Circuito Butterworth usando o PSO.

		Valores Obtidos										
		SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}
Valores Esperados	SF	728	19	19	13	36	53	45	49	16	10	12
	F_{R_1}	0	1000	89	45	56	71	41	57	27	30	22
	F_{R_2}	0	89	1000	20	53	67	39	50	27	24	25
	F_{R_3}	9	70	55	930	96	97	91	69	71	46	99
	F_{R_4}	0	98	79	51	997	97	79	97	52	94	69
	F_{R_5}	0	35	33	29	92	987	32	52	31	39	45
	F_{R_6}	0	55	53	52	63	66	996	86	57	61	66
	F_{R_7}	0	24	26	21	45	89	92	1000	24	68	74
	F_{C_1}	0	21	25	95	43	70	49	60	994	65	49
	F_{C_2}	0	17	29	23	51	99	76	87	14	1000	65
	F_{C_3}	0	34	42	28	74	81	69	73	34	28	1000

Tabela 62: Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós T_1 , T_2 e T_3 no Circuito Butterworth usando o PSO.

	SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}	Global
A	98,24	94,36	94,71	93,24	91,70	92,62	92,66	92,84	94,80	94,20	93,81	93,40
P	72,80	69,54	71,74	56,95	58,20	71,78	64,05	68,35	67,57	68,45	68,35	66,16
S	98,78	68,40	68,97	71,16	62,08	55,54	61,90	59,52	73,79	68,26	65,53	65,19
E	98,21	96,98	97,29	95,20	95,01	97,27	96,11	96,76	96,74	96,82	96,79	96,44

Tabela 63: Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós T_1 , T_2 e T_4 no Circuito Butterworth usando o PSO.

		Valores Obtidos										
		SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}
Valores Esperados	SF	730	23	20	16	43	37	45	51	14	15	6
	F_{R_1}	0	998	83	39	64	49	64	67	31	33	16
	F_{R_2}	72	89	1000	21	59	38	55	72	21	27	17
	F_{R_3}	16	83	58	906	93	99	82	72	74	49	91
	F_{R_4}	0	97	85	51	1000	62	86	94	44	97	40
	F_{R_5}	0	26	26	30	83	994	59	73	31	27	64
	F_{R_6}	0	47	49	58	53	73	994	92	52	62	64
	F_{R_7}	0	29	24	21	56	45	92	998	22	58	57
	F_{C_1}	0	28	40	95	57	48	63	65	987	28	12
	F_{C_2}	0	27	32	16	74	59	89	87	19	991	22
	F_{C_3}	0	37	31	24	66	88	81	88	34	47	993

especificidade de 96,46%. Para o caso sem falhas, obteve-se os melhores resultados para a acurácia, precisão, sensibilidade e especificidade: 97,75%, 73,00%, 89,24% e 98,21%, respectivamente.

Tabela 64: Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós T_1 , T_2 e T_4 no Circuito Butterworth usando o PSO.

	SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}	Global
A	97,75	94,13	94,21	93,15	91,79	93,60	92,03	92,66	95,10	94,53	94,43	93,50
P	73,00	69,11	67,98	55,82	60,39	70,35	64,38	71,18	69,36	69,99	66,69	66,24
S	89,24	67,25	69,06	70,95	60,68	62,44	58,13	56,74	74,27	69,11	71,85	65,91
E	98,21	96,90	96,74	95,09	95,39	97,07	96,12	97,14	97,00	97,06	96,58	96,46

Na Tabela 65 é apresentada a matriz de confusão para o circuito 2 utilizando a combinação dos nós T_1 , T_2 e T_5 . Na Tabela 66 são apresentados os valores das métricas de desempenho referentes a este caso.

Tabela 65: Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós T_1 , T_2 e T_5 no Circuito Butterworth usando o PSO.

		Valores Obtidos										
		SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}
Valores Esperados	SF	688	25	26	31	55	41	32	27	26	42	7
	F_{R_1}	0	999	87	58	73	53	42	59	52	74	14
	F_{R_2}	0	84	989	46	75	47	43	55	39	73	11
	F_{R_3}	9	59	47	952	95	93	62	41	74	73	85
	F_{R_4}	0	94	75	51	996	61	73	79	60	96	39
	F_{R_5}	0	39	42	38	85	994	41	42	40	78	79
	F_{R_6}	0	74	73	81	95	58	1000	84	84	96	41
	F_{R_7}	0	42	34	28	59	44	88	996	21	92	26
	F_{C_1}	3	35	51	95	71	57	33	44	991	58	23
	F_{C_2}	0	33	34	25	83	62	76	87	28	997	23
	F_{C_3}	0	47	56	54	94	89	46	50	49	72	994

Tabela 66: Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós T_1 , T_2 e T_5 no Circuito Butterworth usando o PSO.

	SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}	Global
A	98,01	93,57	93,86	92,95	91,30	93,29	92,48	93,83	94,19	92,58	94,43	93,21
P	68,80	66,12	67,65	59,87	61,33	67,25	59,31	69,65	67,83	68,85	64,09	65,09
S	98,29	65,25	65,32	65,25	55,92	62,16	65,10	63,68	67,69	56,94	74,07	64,02
E	97,99	96,52	96,79	95,68	95,66	96,69	95,33	97,04	96,82	96,89	96,26	96,35

Quando é utilizada a combinação dos nós T_1 , T_2 e T_5 , observa-se os valores médios da acurácia de 93,21%, da precisão de 65,09%, da sensibilidade de 64,02% e da especificidade de 96,35%. Para o caso sem falhas, obteve-se os melhores resultados para a acurácia, sensibilidade e especificidade: 98,01%, 98,29% e 97,99%, respectivamente. O caso de falha no capacitor R_7 teve a melhor medida de precisão com 69,65%.

Na Tabela 67 é apresentada a matriz de confusão para o circuito 2 utilizando a combinação dos nós T_1 , T_3 e T_4 . Na Tabela 68 são apresentados os valores das métricas de desempenho referentes a este caso.

Tabela 67: Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós T_1 , T_3 e T_4 no Circuito Butterworth usando o PSO.

		Valores Obtidos										
		SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}
Valores Esperados	SF	679	41	42	31	24	17	38	48	35	35	10
	F_{R_1}	0	999	86	58	83	47	54	79	65	94	29
	F_{R_2}	0	94	988	45	86	42	59	72	46	91	12
	F_{R_3}	1	64	64	986	63	33	53	60	95	31	26
	F_{R_4}	0	68	73	31	998	22	67	74	28	75	21
	F_{R_5}	0	38	46	43	75	999	40	63	54	50	51
	F_{R_6}	0	69	69	90	66	56	997	90	90	69	53
	F_{R_7}	0	62	66	36	43	26	91	998	34	51	46
	F_{C_1}	0	61	62	98	64	37	61	77	993	42	32
	F_{C_2}	0	78	84	19	64	22	82	82	20	992	30
	F_{C_3}	0	57	53	66	82	79	62	71	61	53	998

Tabela 68: Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós T_1 , T_3 e T_4 no Circuito Butterworth usando o PSO.

	SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}	Global
A	98,01	92,43	92,64	93,79	93,16	94,81	92,23	92,77	93,45	93,38	94,48	93,41
P	67,90	62,67	64,36	66,80	68,50	68,47	60,46	68,69	65,03	67,35	63,08	65,86
S	99,85	61,25	60,50	65,60	60,56	72,39	62,16	58,23	65,29	62,67	76,30	64,85
E	97,93	95,92	96,25	96,67	96,85	96,90	95,53	96,86	96,36	96,71	96,08	96,47

Quando é utilizada a combinação dos nós T_1 , T_3 e T_4 , observa-se os valores médios da acurácia de 93,41%, da precisão de 65,86%, da sensibilidade de 64,85% e da especificidade de 96,47%. Para o caso sem falhas, obteve-se os melhores resultados para a acurácia, sensibilidade e especificidade: 98,01%, 99,85% e 97,93%, respectivamente. O caso de falha no capacitor R_7 teve a melhor medida de precisão com 68,69%.

Na Tabela 69 é apresentada a matriz de confusão para o circuito 2 utilizando a combinação dos nós T_1 , T_3 e T_5 . Na Tabela 70 são apresentados os valores das métricas de desempenho referentes a este caso.

Quando é utilizada a combinação dos nós T_1 , T_3 e T_5 , observa-se os valores médios da acurácia de 93,33%, da precisão de 65,41%, da sensibilidade de 64,29% e da especificidade de 96,41%. Para o caso sem falhas, obteve-se os melhores resultados para a acurácia,

Tabela 69: Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós T_1 , T_3 e T_5 no Circuito Butterworth usando o PSO.

		Valores Obtidos										
		SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}
Valores Esperados	SF	696	50	50	41	40	17	14	17	43	26	6
	F_{R_1}	0	999	84	65	85	48	54	64	73	95	21
	F_{R_2}	0	86	983	28	65	47	53	65	34	26	15
	F_{R_3}	0	67	59	996	67	74	61	74	89	47	33
	F_{R_4}	1	99	90	53	999	64	82	93	48	74	41
	F_{R_5}	1	47	54	40	91	997	55	61	58	58	55
	F_{R_6}	1	49	47	53	68	62	999	89	55	71	41
	F_{R_7}	0	61	70	37	53	87	90	999	29	58	97
	F_{C_1}	0	66	63	94	72	58	50	54	998	49	50
	F_{C_2}	0	69	79	28	82	44	52	61	24	1000	28
	F_{C_3}	0	34	37	31	58	81	73	83	35	40	997

Tabela 70: Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós T_1 , T_3 e T_5 no Circuito Butterworth usando o PSO.

	SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}	Global
A	98,12	92,54	93,56	93,62	91,88	93,25	93,14	92,39	93,60	93,81	94,74	93,33
P	69,60	62,91	70,11	63,56	60,77	65,72	65,08	63,19	64,22	68,17	67,87	65,41
S	99,57	61,40	60,83	67,94	59,46	63,14	63,11	60,18	67,16	64,77	72,04	64,29
E	98,05	95,99	97,15	96,16	95,60	96,47	96,36	96,03	96,25	96,84	96,84	96,41

sensibilidade e especificidade: 98,12%, 99,57% e 98,05%, respectivamente. O caso de falha no capacitor R_2 teve a melhor medida de precisão com 70,11%.

Na Tabela 71 é apresentada a matriz de confusão para o circuito 2 utilizando a combinação dos nós T_1 , T_4 e T_5 . Na Tabela 72 são apresentados os valores das métricas de desempenho referentes a este caso.

Quando é utilizada a combinação dos nós T_1 , T_4 e T_5 , observa-se os valores médios da acurácia de 93,16%, da precisão de 64,57%, da sensibilidade de 63,84% e da especificidade de 96,32%. Para o caso sem falhas, obteve-se os melhores resultados para a acurácia, sensibilidade e especificidade: 97,80%, 99,84% e 97,72%, respectivamente. O caso de falha no capacitor C_2 teve a melhor medida de precisão com 67,92%.

Na Tabela 73 é apresentada a matriz de confusão para o circuito 2 utilizando a combinação dos nós T_2 , T_3 e T_4 . Na Tabela 74 são apresentados os valores das métricas de desempenho referentes a este caso.

Quando é utilizada a combinação dos nós T_2 , T_3 e T_4 , observa-se os valores médios da acurácia de 93,40%, da precisão de 65,71%, da sensibilidade de 65,12% e da

Tabela 71: Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós T_1 , T_4 e T_5 no Circuito Butterworth usando o PSO.

		Valores Obtidos										
		SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}
Valores Esperados	SF	639	44	55	43	52	33	25	22	46	34	7
	F_{R_1}	0	996	85	75	89	52	54	53	81	92	12
	F_{R_2}	1	89	991	49	82	46	42	64	57	89	16
	F_{R_3}	0	63	59	988	74	60	31	37	82	42	37
	F_{R_4}	0	75	73	41	995	68	34	34	49	91	28
	F_{R_5}	0	62	73	71	92	990	35	43	73	65	62
	F_{R_6}	0	92	76	84	86	61	999	91	94	73	33
	F_{R_7}	0	60	66	49	71	57	83	1000	51	70	20
	F_{C_1}	0	64	63	96	70	76	41	32	992	54	45
	F_{C_2}	0	77	84	34	78	59	35	45	32	993	25
	F_{C_3}	0	60	70	73	89	91	46	40	74	72	994

Tabela 72: Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós T_1 , T_4 e T_5 no Circuito Butterworth usando o PSO.

	SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}	Global
A	97,80	92,23	92,47	93,32	92,25	92,84	93,22	94,00	92,83	93,01	94,53	93,16
P	63,90	62,68	64,94	67,07	66,87	63,22	59,15	65,49	64,71	67,92	61,78	64,57
S	99,84	59,22	58,47	61,63	55,96	62,15	70,11	68,45	60,82	59,28	77,72	63,84
E	97,72	95,99	96,38	96,74	96,64	96,13	95,41	96,49	96,35	96,83	95,95	96,32

Tabela 73: Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós T_2 , T_3 e T_4 no Circuito Butterworth usando o PSO.

		Valores Obtidos										
		SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}
Valores Esperados	SF	756	28	29	17	37	14	42	36	21	12	8
	F_{R_1}	0	999	86	47	49	45	48	63	43	40	16
	F_{R_2}	0	83	1000	29	59	36	51	58	43	34	10
	F_{R_3}	25	67	40	881	96	81	92	67	77	42	94
	F_{R_4}	0	95	80	45	1000	59	74	98	44	95	41
	F_{R_5}	0	33	38	41	77	1000	51	56	32	35	60
	F_{R_6}	0	50	47	66	71	61	998	86	59	65	61
	F_{R_7}	0	28	26	21	45	61	81	1000	24	51	18
	F_{C_1}	0	29	25	75	43	61	49	58	994	31	49
	F_{C_2}	0	83	85	38	76	30	81	94	35	991	28
	F_{C_3}	0	58	56	85	86	82	66	78	83	73	995

especificidade de 96,40%. Para o caso sem falhas, obteve-se os melhores resultados para a acurácia, precisão, sensibilidade e especificidade: 98,32%, 75,60%, 96,80% e 98,40%, respectivamente.

Tabela 74: Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós T_2 , T_3 e T_4 no Circuito Butterworth usando o PSO.

	SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}	Global
A	98,32	93,80	94,28	92,84	92,06	94,04	92,49	93,44	94,49	93,57	93,42	93,40
P	75,60	69,57	71,28	56,40	61,31	70,27	63,81	73,80	70,30	64,31	59,87	65,71
S	96,80	64,33	66,14	65,50	61,01	65,36	61,11	59,03	68,32	67,46	72,10	65,12
E	98,40	96,97	97,22	95,35	95,60	97,07	96,06	97,52	97,11	96,21	95,43	96,40

Na Tabela 75 é apresentada a matriz de confusão para o circuito 2 utilizando a combinação dos nós T_2 , T_3 e T_5 . Na Tabela 76 são apresentados os valores das métricas de desempenho referentes a este caso.

Tabela 75: Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós T_2 , T_3 e T_5 no Circuito Butterworth usando o PSO.

		Valores Obtidos										
		SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}
Valores Esperados	SF	746	29	32	26	44	24	22	24	28	16	9
	F_{R_1}	0	1000	85	49	56	44	49	58	52	58	18
	F_{R_2}	0	89	1000	21	59	38	55	72	21	27	17
	F_{R_3}	5	63	70	982	61	80	41	38	90	50	65
	F_{R_4}	1	94	75	51	996	61	73	79	60	96	39
	F_{R_5}	0	37	44	70	75	1000	35	40	50	38	66
	F_{R_6}	1	71	83	89	93	61	999	84	91	95	40
	F_{R_7}	1	25	35	21	60	51	85	999	25	52	29
	F_{C_1}	0	60	63	97	75	46	43	35	998	49	56
	F_{C_2}	0	85	87	48	73	42	43	46	44	991	22
	F_{C_3}	0	62	60	88	81	83	38	38	83	64	998

Tabela 76: Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós T_2 , T_3 e T_5 no Circuito Butterworth usando o PSO.

	SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}	Global
A	98,38	93,30	93,62	93,06	91,93	93,91	92,63	94,45	93,40	93,60	94,08	93,41
P	74,60	68,07	71,48	63,56	61,29	68,73	58,52	72,23	65,57	66,91	62,57	65,65
S	98,94	61,92	61,20	63,68	59,53	65,36	67,36	66,03	64,72	64,52	73,44	65,09
E	98,35	96,78	97,26	96,15	95,66	96,89	95,18	97,38	96,42	96,65	95,97	96,40

Quando é utilizada a combinação dos nós T_2 , T_3 e T_5 , observa-se os valores médios da acurácia de 93,41%, da precisão de 65,65%, da sensibilidade de 65,09% e da especificidade de 96,40%. Para o caso sem falhas, obteve-se os melhores resultados para a acurácia, precisão, sensibilidade e especificidade: 98,38%, 74,60%, 98,94% e 98,35%, respectivamente.

Na Tabela 77 é apresentada a matriz de confusão para o circuito 2 utilizando a combinação dos nós T_2 , T_4 e T_5 . Na Tabela 78 são apresentados os valores das métricas de desempenho referentes a este caso.

Tabela 77: Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós T_2 , T_4 e T_5 no Circuito Butterworth usando o PSO.

		Valores Obtidos										
		SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}
Valores Esperados	SF	731	33	35	23	49	37	22	17	31	18	4
	F_{R_1}	0	1000	88	61	71	59	40	45	55	54	13
	F_{R_2}	0	81	1000	51	74	59	30	42	53	55	7
	F_{R_3}	19	73	47	889	92	96	47	54	78	50	86
	F_{R_4}	0	93	74	58	997	57	41	59	68	92	35
	F_{R_5}	0	42	51	51	86	996	27	30	49	48	65
	F_{R_6}	0	72	71	88	86	60	999	87	88	66	31
	F_{R_7}	0	26	34	20	62	54	88	999	30	63	14
	F_{C_1}	0	30	51	91	63	63	32	33	995	44	25
	F_{C_2}	0	24	39	23	80	53	45	52	22	1000	26
	F_{C_3}	0	35	48	60	73	91	36	31	60	67	999

Tabela 78: Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós T_2 , T_4 e T_5 no Circuito Butterworth usando o PSO.

	SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}	Global
A	98,18	93,71	93,74	92,62	91,70	93,18	93,32	94,68	93,89	94,18	94,90	93,58
P	73,10	67,29	68,87	58,07	63,34	68,93	60,62	71,87	69,73	73,31	66,60	66,82
S	97,47	66,27	65,02	62,83	57,53	61,29	71,00	68,94	65,08	64,23	76,55	65,83
E	98,21	96,60	96,83	95,54	95,90	96,84	95,50	97,28	96,98	97,45	96,55	96,54

Quando é utilizada a combinação dos nós T_2 , T_4 e T_5 , observa-se os valores médios da acurácia de 93,58%, da precisão de 66,82%, da sensibilidade de 65,83% e da especificidade de 96,54%. Para o caso sem falhas, obteve-se os melhores resultados para a acurácia, sensibilidade e especificidade: 98,18%, 97,47% e 98,21%, respectivamente. O caso de falha no capacitor C_2 teve a melhor medida de precisão com 73,31%.

Na Tabela 79 é apresentada a matriz de confusão para o circuito 2 utilizando a combinação dos nós T_3 , T_4 e T_5 . Na Tabela 80 são apresentados os valores das métricas de desempenho referentes a este caso.

Quando é utilizada a combinação dos nós $T_3 - T_5$, observa-se os valores médios da acurácia de 93,28%, da precisão de 65,24%, da sensibilidade de 64,44% e da especificidade de 96,39%. Para o caso sem falhas, obteve-se os melhores resultados para a acurácia,

Tabela 79: Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós $T_3 - T_5$ no Circuito Butterworth usando o PSO.

		Valores Obtidos										
		SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}
Valores Esperados	SF	631	55	51	52	46	24	20	24	56	28	13
	F_{R_1}	0	1000	87	75	90	43	39	56	72	92	19
	F_{R_2}	0	88	987	69	89	40	36	55	72	90	15
	F_{R_3}	0	64	62	977	70	36	37	31	92	45	46
	F_{R_4}	0	70	70	48	996	37	27	31	53	83	36
	F_{R_5}	0	53	55	76	84	998	19	32	79	59	60
	F_{R_6}	0	83	81	97	90	55	999	90	92	67	37
	F_{R_7}	0	55	51	57	52	32	93	999	57	61	23
	F_{C_1}	0	63	59	97	74	51	31	35	991	32	60
	F_{C_2}	0	88	88	46	76	39	40	36	43	988	23
	F_{C_3}	0	52	64	88	86	88	48	51	87	63	998

Tabela 80: Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós $T_3 - T_5$ no Circuito Butterworth usando o PSO.

	SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}	Global
A	97,74	92,37	92,50	92,71	92,56	94,10	93,36	94,34	92,61	93,26	94,12	93,28
P	63,10	63,57	64,05	66,92	68,64	65,87	59,08	67,50	66,38	67,35	61,42	65,24
S	100,00	59,84	59,64	58,09	56,82	69,16	71,92	69,38	58,50	61,44	75,04	64,44
E	97,64	96,08	96,22	96,69	96,87	96,52	95,36	96,76	96,56	96,74	95,81	96,39

sensibilidade e especificidade: 97,74%, 100,00% e 97,64%, respectivamente. O caso de falha no resistor R_4 teve a melhor medida de precisão com 68,64%.

Na Tabela 81 é apresentada a matriz de confusão para o circuito 2 utilizando a combinação dos nós $T_1 - T_4$. Na Tabela 82 são apresentados os valores das métricas de desempenho referentes a este caso.

Quando é utilizada a combinação dos nós $T_1 - T_4$, observa-se os valores médios da acurácia de 93,97%, da precisão de 68,81%, da sensibilidade de 67,96% e da especificidade de 96,73%. Para o caso sem falhas, obteve-se os melhores resultados para a acurácia, precisão, sensibilidade e especificidade: 98,55%, 78,10%, 99,24% e 98,51%, respectivamente.

Na Tabela 83 é apresentada a matriz de confusão para o circuito 2 utilizando a combinação dos nós $T_1 - T_3$ e T_5 . Na Tabela 84 são apresentados os valores das métricas de desempenho referentes a este caso.

Quando é utilizada a combinação dos nós $T_1 - T_3$ e T_5 , observa-se os valores médios da acurácia de 93,71%, da precisão de 67,29%, da sensibilidade de 66,52% e da

Tabela 81: Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós $T_1 - T_4$ no Circuito Butterworth usando o PSO.

		Valores Obtidos										
		SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}
Valores Esperados	SF	781	28	17	23	20	13	41	43	17	11	6
	F_{R_1}	0	999	87	35	56	37	36	60	46	32	19
	F_{R_2}	0	84	1000	30	60	36	49	54	19	27	14
	F_{R_3}	6	60	47	945	89	78	90	67	78	38	85
	F_{R_4}	0	98	80	45	1000	48	79	96	44	95	33
	F_{R_5}	0	33	29	31	68	1000	48	51	29	35	62
	F_{R_6}	0	54	52	70	59	60	997	88	67	57	65
	F_{R_7}	0	20	29	23	47	30	88	999	23	42	47
	F_{C_1}	0	22	30	97	51	37	50	54	1000	20	26
	F_{C_2}	0	24	36	20	49	26	76	83	13	1000	16
	F_{C_3}	0	43	38	30	61	80	62	62	34	47	1000

Tabela 82: Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós $T_1 - T_4$ no Circuito Butterworth usando o PSO.

	SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}	Global
A	98,55	94,35	94,71	93,26	92,39	94,63	92,30	93,49	95,11	95,17	94,64	93,97
P	78,10	71,00	72,83	59,70	61,80	72,15	63,54	74,11	72,10	74,46	68,63	68,81
S	99,24	68,19	69,20	70,05	64,10	69,20	61,70	60,29	72,99	71,23	72,83	67,96
E	98,51	97,09	97,34	95,48	95,56	97,25	95,87	97,47	97,26	97,56	96,76	96,73

Tabela 83: Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós $T_1 - T_3$ e T_5 no Circuito Butterworth usando o PSO.

		Valores Obtidos										
		SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}
Valores Esperados	SF	747	27	34	36	36	24	27	24	27	13	5
	F_{R_1}	0	1000	86	48	65	50	47	35	49	50	19
	F_{R_2}	0	87	1000	42	73	45	38	51	39	55	17
	F_{R_3}	0	66	50	960	87	62	47	47	82	42	83
	F_{R_4}	0	87	79	47	999	53	37	55	39	94	27
	F_{R_5}	0	40	39	46	84	997	32	29	40	50	71
	F_{R_6}	0	68	81	74	82	55	1000	81	83	67	37
	F_{R_7}	0	58	32	25	45	33	91	1000	59	55	21
	F_{C_1}	0	28	40	95	57	48	63	65	987	28	12
	F_{C_2}	0	27	32	16	74	59	89	87	19	991	22
	F_{C_3}	0	37	31	24	66	88	81	88	34	47	993

especificidade de 96,59%. Para o caso sem falhas, obteve-se os melhores resultados para a acurácia, precisão, sensibilidade e especificidade: 98,39%, 74,70%, 100,00% e 98,31%, respectivamente.

Tabela 84: Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós T_1 – T_3 e T_5 no Circuito Butterworth usando o PSO.

	SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}	Global
A	98,39	93,81	93,96	93,53	92,46	93,98	92,50	93,77	94,24	94,12	94,85	93,71
P	74,70	69,01	69,11	62,91	65,85	69,82	61,43	70,47	69,36	69,99	66,69	67,29
S	100,00	65,57	66,49	67,94	59,89	65,85	64,43	64,02	67,70	66,42	75,98	66,52
E	98,31	96,84	96,86	96,05	96,32	96,97	95,57	97,05	96,95	97,02	96,56	96,59

Na Tabela 85 é apresentada a matriz de confusão para o circuito 2 utilizando a combinação dos nós T_1 , T_2 , T_4 e T_5 . Na Tabela 86 são apresentados os valores das métricas de desempenho referentes a este caso.

Tabela 85: Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós T_1 , T_2 , T_4 e T_5 no Circuito Butterworth usando o PSO.

		Valores Obtidos										
		SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}
Valores Esperados	SF	749	26	27	25	52	32	23	23	21	17	5
	F_{R_1}	0	1000	85	39	58	47	39	47	51	60	21
	F_{R_2}	0	84	989	46	75	47	43	55	39	73	11
	F_{R_3}	0	64	64	991	63	33	53	60	95	31	26
	F_{R_4}	1	74	79	51	999	48	25	33	47	94	22
	F_{R_5}	1	39	42	38	85	999	41	38	40	57	79
	F_{R_6}	1	75	72	83	83	57	998	91	85	68	35
	F_{R_7}	0	42	34	28	59	44	88	996	21	92	26
	F_{C_1}	3	35	51	95	71	57	33	44	991	58	23
	F_{C_2}	0	33	34	25	83	62	76	87	28	997	23
F_{C_3}	0	47	56	54	94	89	46	50	49	72	994	

Tabela 86: Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós T_1 , T_2 , T_4 e T_5 no Circuito Butterworth usando o PSO.

	SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}	Global
A	98,38	93,91	93,59	93,86	92,45	93,85	92,96	93,93	94,03	93,23	94,78	93,63
P	74,90	69,11	67,65	66,96	67,82	68,47	60,56	69,65	67,83	68,85	64,09	66,88
S	99,21	65,83	64,51	67,19	58,01	65,94	68,12	65,35	67,55	61,58	78,58	66,32
E	98,34	96,88	96,70	96,60	96,65	96,79	95,48	96,97	96,73	96,83	96,18	96,55

Quando é utilizada a combinação dos nós T_1 , T_2 , T_4 e T_5 , observa-se os valores médios da acurácia de 93,63%, da precisão de 66,88%, da sensibilidade de 66,32% e da especificidade de 96,55%. Para o caso sem falhas, obteve-se os melhores resultados para

a acurácia, precisão, sensibilidade e especificidade: 98,38%, 74,90%, 99,21% e 98,34%, respectivamente.

Na Tabela 87 é apresentada a matriz de confusão para o circuito 2 utilizando a combinação dos nós T_1 , $T_3 - T_5$. Na Tabela 88 são apresentados os valores das métricas de desempenho referentes a este caso.

Tabela 87: Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós T_1 , $T_3 - T_5$ no Circuito Butterworth usando o PSO.

		Valores Obtidos										
		SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}
Valores Esperados	SF	680	56	48	32	40	25	22	21	43	27	6
	F_{R_1}	0	1000	86	63	85	52	46	49	65	94	20
	F_{R_2}	0	87	980	56	81	46	36	48	49	92	23
	F_{R_3}	0	57	55	986	62	43	38	36	93	42	35
	F_{R_4}	0	68	81	36	996	37	26	28	39	67	25
	F_{R_5}	0	55	50	66	77	998	30	35	63	58	70
	F_{R_6}	0	90	73	91	87	49	998	93	90	67	27
	F_{R_7}	0	44	43	30	39	26	89	998	44	53	17
	F_{C_1}	0	62	62	95	70	40	33	27	992	42	36
	F_{C_2}	0	72	87	37	73	27	30	40	26	993	17
	F_{C_3}	0	61	59	74	84	88	40	39	76	60	997

Tabela 88: Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós T_1 , $T_3 - T_5$ no Circuito Butterworth usando o PSO.

	SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}	Global
A	97,99	92,38	92,69	93,45	93,05	94,11	93,35	94,96	93,36	93,64	94,61	93,69
P	68,00	64,10	65,42	68,14	70,99	66,44	59,94	72,16	67,99	70,83	63,18	67,23
S	100,00	60,53	60,34	62,96	58,80	69,74	71,90	70,58	62,78	62,26	78,32	66,41
E	97,90	96,07	96,37	96,78	97,13	96,52	95,40	97,34	96,74	97,14	96,03	96,61

Quando é utilizada a combinação dos nós T_1 e $T_3 - T_5$, observa-se os valores médios da acurácia de 93,69%, da precisão de 67,23%, da sensibilidade de 66,41% e da especificidade de 96,61%. Para o caso sem falhas, obteve-se os melhores resultados para a acurácia, sensibilidade e especificidade: 97,99%, 100,00% e 97,90%, respectivamente. O caso de falha no resistor R_7 teve a melhor medida de precisão com 72,16%.

Na Tabela 89 é apresentada a matriz de confusão para o circuito 2 utilizando a combinação dos nós $T_2 - T_5$. Na Tabela 90 são apresentados os valores das métricas de desempenho referentes a este caso.

Tabela 89: Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós $T_2 - T_5$ no Circuito Butterworth usando o PSO.

		Valores Obtidos										
		SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}
Valores Esperados	SF	761	29	35	30	42	23	19	19	22	14	6
	F_{R_1}	0	1000	87	54	67	44	34	43	52	61	12
	F_{R_2}	0	87	1000	47	71	32	26	43	47	50	6
	F_{R_3}	8	54	61	951	84	76	54	51	89	52	78
	F_{R_4}	0	88	77	63	998	56	54	62	54	92	44
	F_{R_5}	0	54	64	70	95	988	41	50	63	67	68
	F_{R_6}	0	82	79	87	92	67	998	97	91	76	40
	F_{R_7}	0	46	61	53	65	58	91	1000	40	64	36
	F_{C_1}	0	49	67	98	77	58	50	52	994	49	48
	F_{C_2}	0	57	66	44	76	54	58	62	43	996	39
	F_{C_3}	0	63	75	76	84	92	55	56	79	62	996

Tabela 90: Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós $T_2 - T_5$ no Circuito Butterworth usando o PSO.

	SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}	Global
A	98,50	93,54	93,44	92,54	91,84	93,13	92,76	93,63	93,15	93,40	93,81	93,08
P	76,10	68,78	70,97	61,04	62,85	63,33	58,40	66,05	64,46	66,62	60,81	63,84
S	98,96	62,15	59,81	60,46	57,00	63,82	67,43	65,15	63,15	62,92	72,54	63,59
E	98,48	96,94	97,24	95,92	95,99	96,17	95,26	96,56	96,32	96,65	95,75	96,20

Quando é utilizada a combinação dos nós $T_2 - T_5$, observa-se os valores médios da acurácia de 93,08%, da precisão de 63,84%, da sensibilidade de 63,59% e da especificidade de 96,20%. Para o caso sem falhas, obteve-se os melhores resultados para a acurácia, precisão, sensibilidade e especificidade: 98,50%, 76,10%, 98,96% e 98,48%, respectivamente.

Na Tabela 91 é apresentada a matriz de confusão para o circuito 2 utilizando a combinação dos nós $T_1 - T_5$. Na Tabela 92 são apresentados os valores das métricas de desempenho referentes a este caso.

Quando é utilizada a combinação dos nós $T_1 - T_5$, observa-se os valores médios da acurácia de 94,07%, da precisão de 69,11%, da sensibilidade de 68,28% e da especificidade de 96,79%. Para o caso sem falhas, obteve-se os melhores resultados para a acurácia, precisão, sensibilidade e especificidade com 98,43%, 76,00%, 99,61% e 98,37%, respectivamente.

As Figuras 13 – 17 permite a comparação das métricas globais de desempenho analisando os nós acessíveis do circuito e suas combinações.

Tabela 91: Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós $T_1 - T_5$ no Circuito Butterworth usando o PSO.

		Valores Obtidos										
		SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}
Valores Esperados	SF	760	24	32	30	30	27	20	17	29	21	10
	F_{R_1}	0	1000	76	52	73	49	34	41	56	60	19
	F_{R_2}	0	89	999	44	73	35	35	35	34	58	12
	F_{R_3}	3	54	43	967	84	71	49	42	80	33	83
	F_{R_4}	0	91	76	47	999	36	42	43	41	95	28
	F_{R_5}	0	40	47	44	79	999	27	34	43	40	62
	F_{R_6}	0	66	58	80	82	47	1000	89	79	63	28
	F_{R_7}	0	38	41	28	43	43	91	999	31	43	20
	F_{C_1}	0	38	50	94	60	41	43	26	996	27	28
	F_{C_2}	0	37	52	20	65	29	37	40	27	1000	17
	F_{C_3}	0	50	44	52	72	78	36	30	58	48	999

Tabela 92: Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós $T_1 - T_5$ no Circuito Butterworth usando o PSO.

	SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}	Global
A	98,43	93,62	93,96	93,32	92,50	94,36	93,49	94,99	94,28	94,75	94,99	94,07
P	76,00	68,49	70,65	64,08	66,69	70,60	62,81	72,55	70,99	75,53	68,10	69,11
S	99,61	65,49	65,81	66,32	60,18	68,66	70,72	71,56	67,57	67,20	76,49	68,28
E	98,37	96,70	97,02	96,13	96,38	97,03	95,78	97,31	97,09	97,68	96,69	96,79

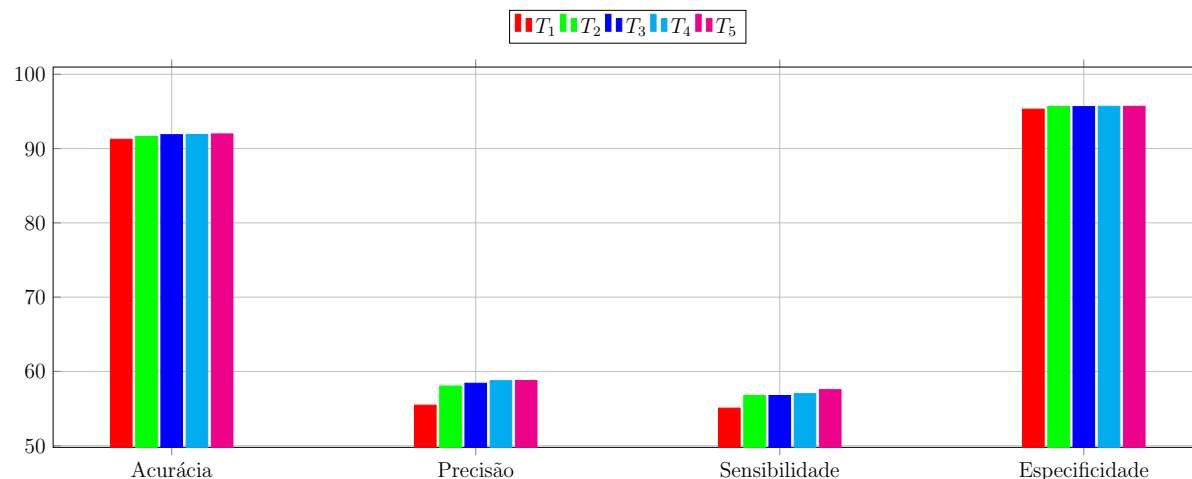


Figura 13: Métricas de avaliação do Circuito Butterworth usando o PSO analisando os nós individualmente.

A partir do gráfico da Figura 18, observa-se que com o incremento da utilização dos nós acessíveis na análise do circuito há uma melhora nos valores das métricas consideradas. Observa-se que a configuração com melhor desempenho é a que considera os cinco nós

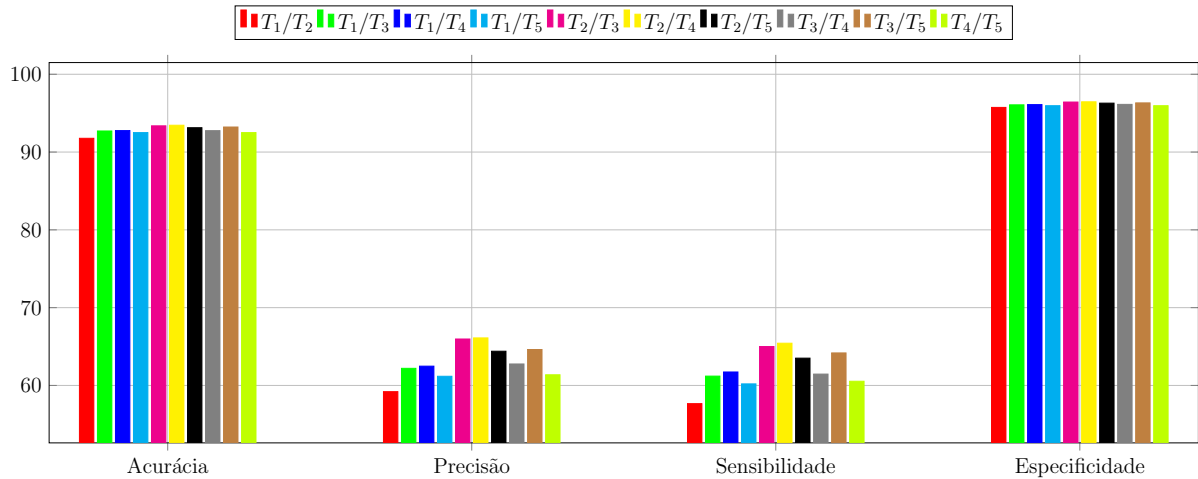


Figura 14: Métricas de avaliação do Circuito Butterworth usando o PSO analisando 2 nós combinados.

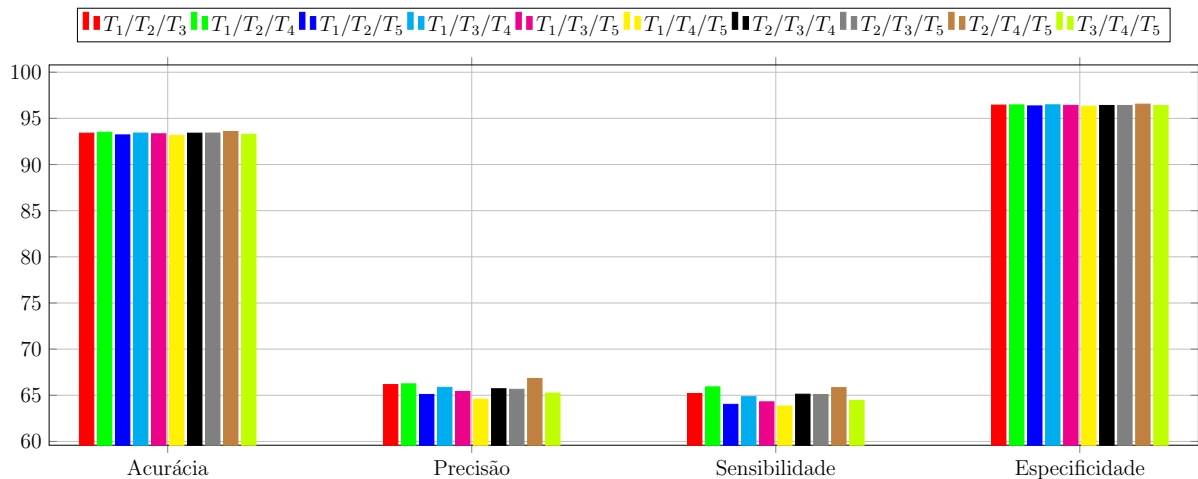


Figura 15: Métricas de avaliação do Circuito Butterworth usando o PSO analisando 3 nós combinados.

acessíveis no cálculo da otimização, principalmente quando se leva em consideração as métricas de precisão e de sensibilidade.

5.3.3 Desempenho do PSO

O desempenho do PSO é avaliado baseando-se nos valores das métricas definidas e comparando-se os dois estudos de casos desenvolvidos nesta dissertação. Ressalta-se que os parâmetros utilizados para a técnica do PSO nos dois circuitos estudados são os mesmos, diferenciando apenas na quantidade de componentes possíveis de apresentar falhas, onde no

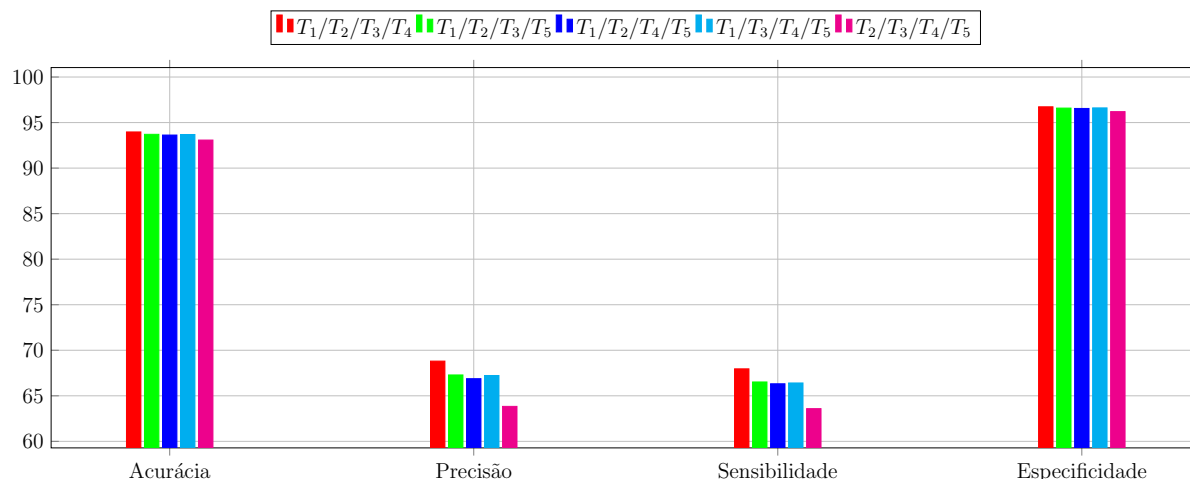


Figura 16: Métricas de avaliação do Circuito Butterworth usando o PSO analisando 4 nós combinados.

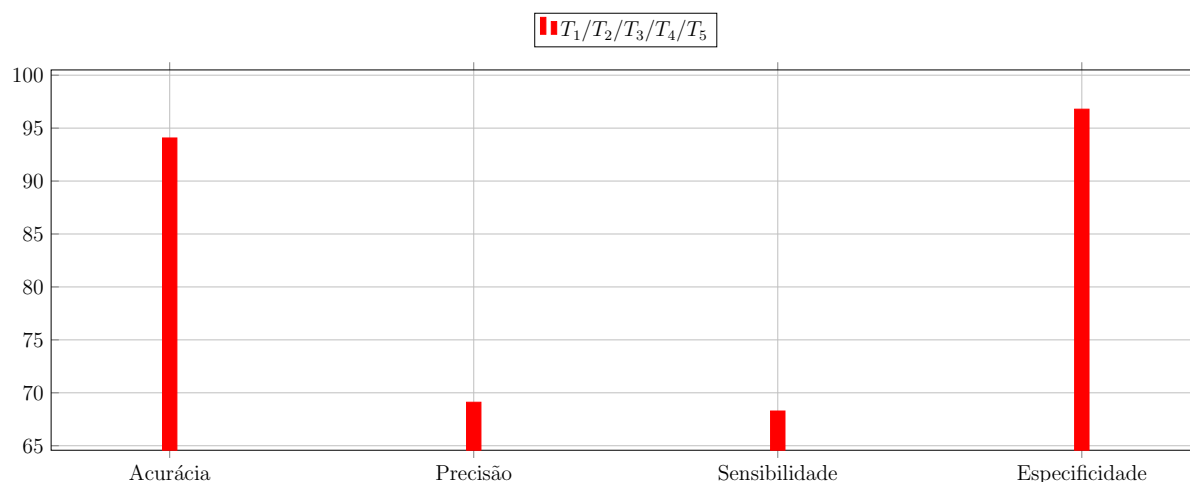


Figura 17: Métricas de avaliação do Circuito Butterworth usando o PSO analisando os 5 nós combinados.

primeiro circuito há 8 componentes enquanto que no segundo são 10, e a quantidade de nós acessíveis, sendo 3 nós para o primeiro circuito e 5 nós para o segundo.

A Tabela 93 apresenta as métricas de avaliação globais em relação ao incremento do uso dos nós acessíveis dos circuitos, utilizando como base as Tabelas 14 e 30. Os valores foram obtidos a partir das médias aritméticas das métricas considerando o número de nós utilizados em todos os casos.

Na Figura 19 são apresentadas, graficamente, as métricas globais de desempenho analisando a quantidade de nós que estão sendo analisados, a partir dos dados numéricos apresentados nas Tabelas 93.

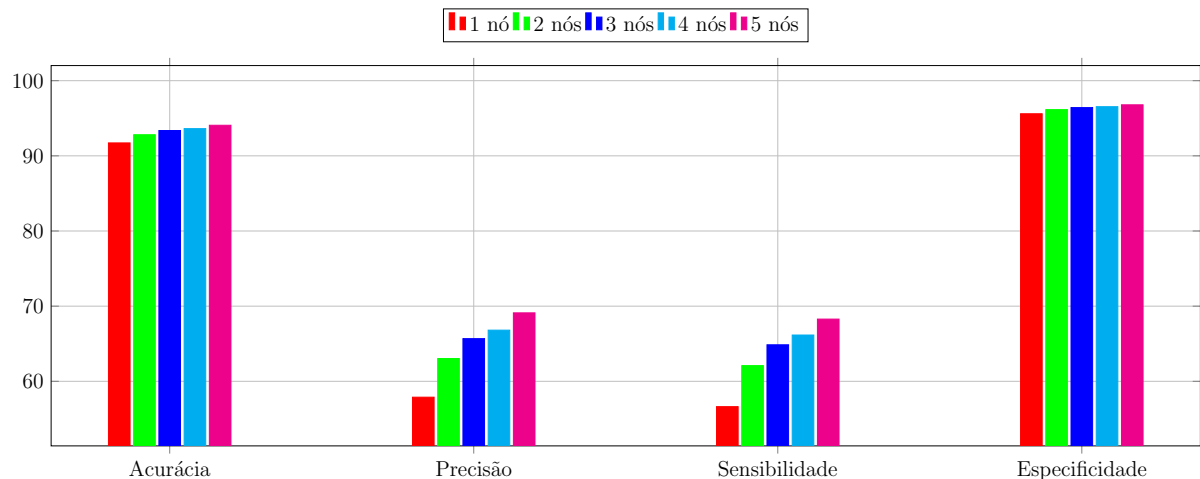


Figura 18: Métricas de avaliação do Circuito Butterworth usando o PSO analisando os nós individualmente.

Tabela 93: Métricas de avaliação pela quantidade de nós acessíveis usando o PSO.

		Número de nós acessíveis				
		1	2	3	4	5
Circuito 1	A	91,18	92,69	93,90	-	-
	P	60,21	67,32	72,84	-	-
	S	63,54	69,80	74,60	-	-
	E	95,02	95,88	96,56	-	-
Circuito 2	A	91,72	92,81	93,37	93,62	94,07
	P	57,89	63,03	65,68	66,81	69,11
	S	56,63	62,09	64,86	66,16	68,28
	E	95,60	96,15	96,42	96,54	96,79

Observa-se que, com o incremento dos usos das combinações dos nós, há um aumento no valor das métricas de avaliação analisadas nesta dissertação. Na Figura 19, as métricas apresentam semelhanças nas curvas de aumento. O destaque deste aumento é com relação à precisão e à sensibilidade em ambos os circuitos, conforme Figura 5.19(b) e 5.19(c).

No caso do circuito 1, ao utilizar três nós acessíveis, a métrica de precisão teve um aumento de 12,63% em relação ao experimento utilizando um nó individualmente. Na sensibilidade, o aumento foi de 11,06% no valor da métrica utilizando os três nós combinados em relação a utilização de um nó individual.

No circuito 2, o aumento da métrica de precisão foi de 11,22% entre as análises utilizando a combinação dos cinco nós em relação a um nó individualmente. Enquanto

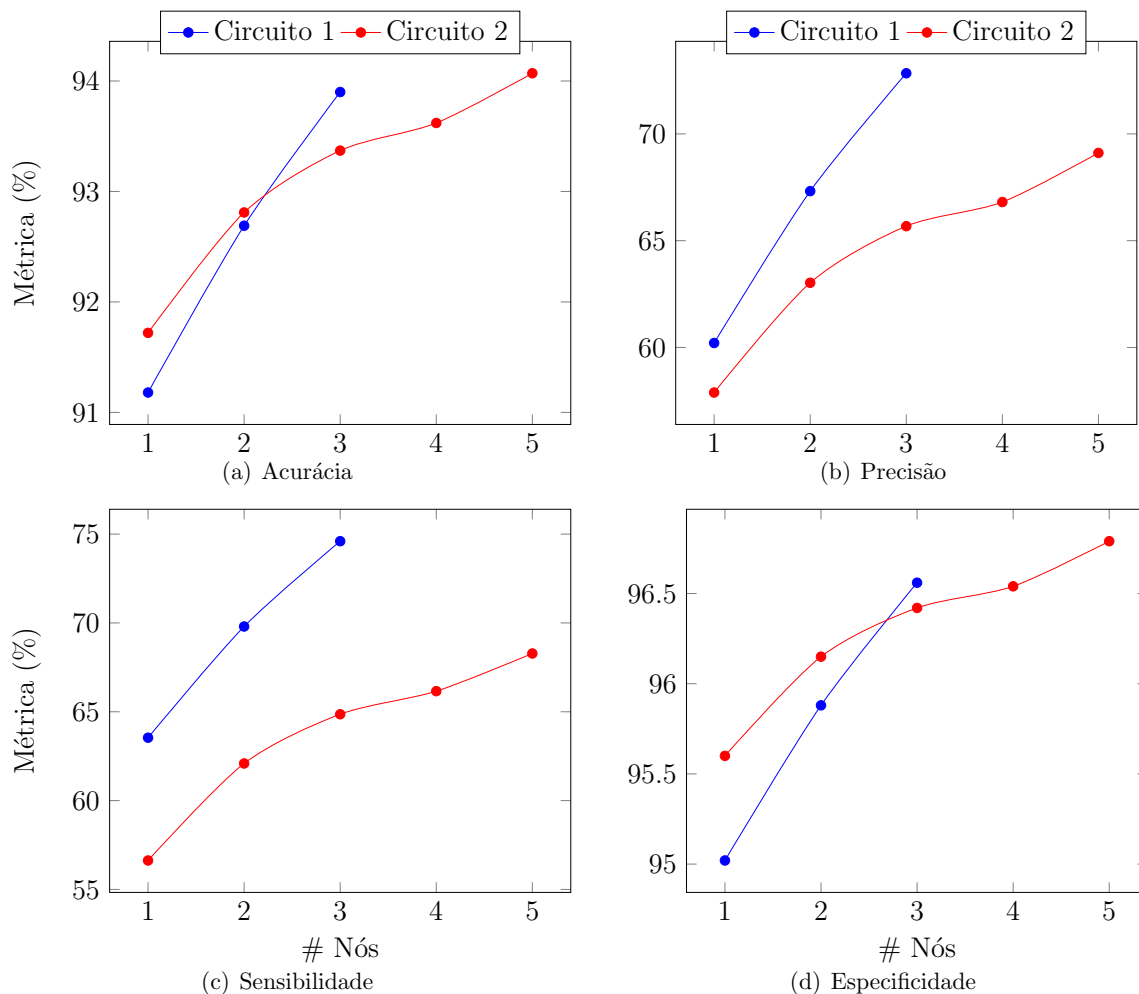


Figura 19: Comparação das métricas de avaliação dos circuitos usando o PSO.

que para a sensibilidade, o aumento foi de 11,65% da utilização dos cinco nós combinados em relação ao uso individual dos nós.

5.4 Resultado Utilizando BA

O BA foi implementado em *Python*, sem a utilização de bibliotecas específicas. Para permitir a comparação dos resultados, todas as otimizações realizadas tiveram parâmetros fixos, conforme Tabela 94, onde K representa o número de componentes do circuito sob análise. Vale ressaltar que o circuito 1 incluí 8 componentes e o circuito 2 incluí 10 componentes possíveis de haver falhas. Este algoritmo pode utilizar o comprimento de onda ou a frequência como parâmetros da implementação. Quanto maior a frequência utilizada menor o comprimento de onda, resultando em menores distâncias a serem percorridas para encontrar a ótima localização.

Tabela 94: Parâmetros do BA.

Parâmetros	Valores	Parâmetros	Valores	Parâmetros	Valores
# Dimensões	K	Alfa	0,5	f_{min}	0Hz
# Iterações	1000	Beta	0,5	f_{max}	500kHz
# População	30	Taxa de pulso inicial	0,1		

Os resultados preliminares para a técnica do BA, utilizando o circuito Biquad de Two-Thomas, podem ser encontrados em (GALINDO; NEDJAH; MOURELLE, 2022b).

5.4.1 Circuito Biquad de Tow-Thomas

Com o *software Circuit Maker*TM foram realizadas as análises do circuito sob testes, de acordo com a alteração nos valores dos componentes, sendo possível testá-lo sob diferentes circunstâncias. Os casos desse estudo constam na Tabela 13. São apresentados os nove casos diferentes e os valores de tensão medidos em cada nó acessível do circuito. Os componentes têm como valores ideais $10k\Omega$ para os Resistores e $10nF$ para os Capacitores. Foram utilizadas as combinações de nós conforme Tabela 14. Os resultados obtidos dos processos de otimização caso a caso, utilizando o BA, são apresentados no Apêndice A.

Na Tabela 95 é apresentada a matriz de confusão para o circuito 1 utilizando o nó T_1 individualmente. Na Tabela 96 são apresentados os valores das métricas de desempenho referentes a este caso.

Tabela 95: Matriz de confusão dos resultados do nó T_1 no Circuito Biquad de Tow-Thomas usando BA.

		Valores Obtidos								
		SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{C_1}	F_{C_2}
Valores Esperados	SF	476	15	29	31	48	42	45	72	42
	F_{R_1}	1	799	68	76	69	70	70	84	61
	F_{R_2}	0	41	795	57	69	52	48	64	59
	F_{R_3}	0	46	59	794	69	83	75	79	71
	F_{R_4}	0	41	66	48	792	59	67	88	58
	F_{R_5}	0	55	54	53	71	799	80	72	67
	F_{R_6}	0	51	48	37	83	69	784	73	64
	F_{C_1}	1	36	47	60	51	58	54	796	39
	F_{C_2}	0	62	63	57	58	45	39	67	787

Quando é utilizado o nó T_1 do circuito, observa-se os valores médios da acurácia de 92,14%, da precisão de 64,51%, da sensibilidade de 67,19% e da especificidade de 95,57%.

Tabela 96: Resultados para as métricas consideradas para o nó T_1 no Circuito Biquad de Tow-Thomas usando BA.

	SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{C_1}	F_{C_2}	Global
A	96,91	91,99	92,20	91,47	91,05	91,19	91,45	91,05	91,93	92,14
P	59,50	61,56	67,09	62,23	64,97	63,87	64,85	69,70	66,81	64,51
S	99,58	69,72	64,69	65,46	60,46	62,57	62,12	57,06	63,06	67,19
E	96,79	94,70	95,82	94,84	95,38	95,13	95,43	96,22	95,80	95,57

Para o caso sem falhas, obteve-se os melhores resultados para a acurácia, sensibilidade e especificidade: 96,91%, 99,58% e 96,79%, respectivamente. O caso de falha no capacitor C_1 teve a melhor medida de precisão com 69,70%.

Na Tabela 97 é apresentada a matriz de confusão para o circuito 1 utilizando o nó T_2 individualmente. Na Tabela 98 são apresentados os valores das métricas de desempenho referentes a este caso.

Tabela 97: Matriz de confusão dos resultados do nó T_2 no Circuito Biquad de Tow-Thomas usando BA.

		Valores Obtido								
		SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{C_1}	F_{C_2}
Valores Esperados	SF	509	29	33	32	25	32	35	69	36
	F_{R_1}	0	796	51	60	64	65	67	89	54
	F_{R_2}	0	51	799	45	63	46	55	67	79
	F_{R_3}	0	41	50	793	62	59	65	82	68
	F_{R_4}	1	42	64	34	791	50	59	87	60
	F_{R_5}	0	59	55	50	64	799	72	71	55
	F_{R_6}	0	48	51	40	75	68	793	70	53
	F_{C_1}	3	37	50	60	46	54	61	785	49
	F_{C_2}	0	66	64	53	52	42	47	68	792

Tabela 98: Resultados para as métricas consideradas para o nó T_2 no Circuito Biquad de Tow-Thomas usando BA.

	SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{C_1}	F_{C_2}	Global
A	97,17	92,09	92,09	92,31	91,85	91,91	91,68	90,75	91,87	92,41
P	63,63	63,88	66,31	65,00	66,58	65,22	66,19	68,56	66,89	65,81
S	99,22	68,09	65,65	67,95	63,69	65,76	63,24	56,56	63,56	68,19
E	97,06	95,13	95,58	95,38	95,67	95,37	95,58	96,01	95,72	95,72

Quando é utilizado o nó T_2 do circuito, observa-se os valores médios da acurácia de 92,41%, da precisão de 65,81%, da sensibilidade de 68,19% e da especificidade de 95,72%.

Para o caso sem falhas, obteve-se os melhores resultados para a acurácia, sensibilidade e especificidade: 97,17%, 99,22% e 97,06%, respectivamente. O caso de falha no capacitor C_1 teve a melhor medida de precisão com 68,56%.

Na Tabela 99 é apresentada a matriz de confusão para o circuito 1 utilizando o nó T_3 individualmente. Na Tabela 100 são apresentados os valores das métricas de desempenho referentes a este caso.

Tabela 99: Matriz de confusão dos resultados do nó T_3 no Circuito Biquad de Tow-Thomas usando BA.

		Valores Obtidos								
		SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{C_1}	F_{C_2}
Valores Esperados	SF	499	17	32	20	49	38	39	66	40
	F_{R_1}	0	800	69	63	61	57	61	90	58
	F_{R_2}	1	52	796	38	68	50	41	58	61
	F_{R_3}	0	42	51	800	54	58	58	72	50
	F_{R_4}	4	39	66	31	795	58	68	92	62
	F_{R_5}	0	56	50	46	58	796	70	60	65
	F_{R_6}	0	44	32	25	81	77	789	68	50
	F_{C_1}	1	42	43	61	48	50	49	794	47
	F_{C_2}	1	55	61	48	55	49	41	64	796

Tabela 100: Resultados para as métricas consideradas para o nó T_3 no Circuito Biquad de Tow-Thomas usando BA.

	SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{C_1}	F_{C_2}	Global
A	97,01	92,17	92,49	93,04	91,32	91,82	92,19	91,15	92,16	92,59
P	62,38	63,54	68,33	67,51	65,43	66,28	67,67	69,96	68,03	66,57
S	98,62	69,75	66,33	70,67	62,65	64,56	64,88	58,21	64,77	68,94
E	96,93	94,98	95,94	95,80	95,35	95,53	95,85	96,18	95,88	95,83

Quando é utilizado o nó T_3 , observa-se os valores médios da acurácia de 92,59%, da precisão de 66,57%, da sensibilidade de 68,94% e da especificidade de 95,83%. Para o caso sem falhas, obteve-se os melhores resultados para a acurácia, sensibilidade e especificidade: 97,01%, 98,62% e 96,93%, respectivamente. O caso de falha no capacitor C_1 teve a melhor medida de precisão com 69,96%.

Na Tabela 101 é apresentada a matriz de confusão para o circuito 1 utilizando a combinação dos nós T_1 e T_2 . Na Tabela 102 são apresentados os valores das métricas de desempenho referentes a este caso.

Tabela 101: Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós T_1 e T_2 no Circuito Biquad de Tow-Thomas usando BA.

		Valores Obtidos								
		SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{C_1}	F_{C_2}
Valores Esperados	SF	601	14	9	26	18	25	26	60	21
	F_{R_1}	0	798	58	47	50	45	27	84	37
	F_{R_2}	1	52	799	21	45	37	33	60	48
	F_{R_3}	0	39	36	795	32	51	31	59	37
	F_{R_4}	0	28	47	32	800	49	45	83	54
	F_{R_5}	0	48	33	42	37	799	49	55	34
	F_{R_6}	0	33	38	17	40	66	794	56	40
	F_{C_1}	2	41	27	55	37	36	38	798	35
	F_{C_2}	0	42	38	33	41	23	32	61	797

Tabela 102: Resultados para as métricas consideradas para a combinação dos nós T_1 e T_2 no Circuito Biquad de Tow-Thomas usando BA.

	SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{C_1}	F_{C_2}	Global
A	97,89	93,27	93,91	94,17	93,34	93,42	94,04	91,76	93,99	93,98
P	75,13	69,63	72,90	73,61	70,30	72,84	73,25	74,65	74,70	73,00
S	99,50	72,88	73,64	74,44	72,73	70,65	73,86	60,64	72,26	74,51
E	97,78	95,90	96,50	96,65	96,01	96,47	96,59	96,72	96,81	96,60

Quando é utilizada a combinação dos nós T_1 e T_2 , observa-se os valores médios da acurácia de 93,98%, da precisão de 73,00%, da sensibilidade de 74,51% e da especificidade de 96,60%. Para o caso sem falhas, obteve-se os melhores resultados para a acurácia, precisão, sensibilidade e especificidade com valores 97,89%, 75,13%, 99,50% e 97,78%, respectivamente.

Na Tabela 103 é apresentada a matriz de confusão para o circuito 1 utilizando a combinação dos nós T_1 e T_3 . Na Tabela 104 são apresentados os valores das métricas de desempenho referentes a este caso.

Quando é utilizada a combinação dos nós T_1 e T_3 , observa-se os valores médios da acurácia de 94,08%, da precisão de 73,45%, da sensibilidade de 75,04% e da especificidade de 96,67%. Para o caso sem falhas, obteve-se os melhores resultados para a acurácia, sensibilidade e especificidade: 97,83%, 99,67% e 97,71%, respectivamente. O caso de falha no capacitor C_2 teve a melhor medida de precisão com 75,55%.

Tabela 103: Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós T_1 e T_3 no Circuito Biquad de Tow-Thomas usando BA.

		Valores Obtidos								
		SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{C_1}	F_{C_2}
Valores Esperados	SF	596	11	10	8	20	28	41	61	25
	F_{R_1}	0	800	50	34	41	47	36	77	45
	F_{R_2}	0	47	800	15	40	42	35	57	58
	F_{R_3}	0	35	33	800	37	52	34	57	41
	F_{R_4}	2	29	45	18	796	37	48	81	58
	F_{R_5}	0	45	38	33	43	797	61	48	42
	F_{R_6}	0	22	30	12	46	65	793	50	41
	F_{C_1}	0	37	31	58	31	37	31	797	37
	F_{C_2}	0	34	33	24	43	28	31	65	797

Tabela 104: Resultados para as métricas consideradas para a combinação dos nós T_1 e T_3 no Circuito Biquad de Tow-Thomas usando BA.

	SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{C_1}	F_{C_2}	Global
A	97,83	93,79	94,07	94,84	93,49	93,21	93,87	92,03	93,64	94,08
P	74,50	70,80	73,13	73,46	71,45	72,00	74,88	75,26	75,55	73,45
S	99,67	75,47	74,77	79,84	72,56	70,34	71,44	61,64	69,67	75,04
E	97,71	96,09	96,52	96,60	96,22	96,30	96,83	96,81	96,91	96,67

Na Tabela 105 é apresentada a matriz de confusão para o circuito 1 utilizando a combinação dos nós T_2 e T_3 . Na Tabela 106 são apresentados os valores das métricas de desempenho referentes a este caso.

Tabela 105: Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós T_2 e T_3 no Circuito Biquad de Tow-Thomas usando BA.

		Valores Obtidos								
		SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{C_1}	F_{C_2}
Valores Esperados	SF	620	15	30	10	21	14	20	42	28
	F_{R_1}	0	800	51	38	45	28	22	78	45
	F_{R_2}	1	41	798	19	35	31	28	50	53
	F_{R_3}	0	42	39	800	35	41	27	61	32
	F_{R_4}	0	25	34	15	798	25	37	86	58
	F_{R_5}	0	32	35	26	27	800	55	42	28
	F_{R_6}	0	18	31	13	31	61	800	51	32
	F_{C_1}	0	27	29	60	31	29	25	798	34
	F_{C_2}	0	38	36	27	40	25	23	48	798

Tabela 106: Resultados para as métricas consideradas para a combinação dos nós T_2 e T_3 no Circuito Biquad de Tow-Thomas usando BA.

	SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{C_1}	F_{C_2}	Global
A	98,05	94,12	94,14	94,77	94,12	94,62	94,89	92,52	94,10	94,59
P	77,50	72,27	75,57	74,28	74,03	76,56	77,15	77,25	77,10	75,74
S	99,84	77,07	73,68	79,37	75,07	75,90	77,15	63,54	72,02	77,07
E	97,92	96,27	96,85	96,65	96,59	97,02	97,12	97,07	97,10	96,95

Quando é utilizada a combinação dos nós T_2 e T_3 , observa-se os valores médios da acurácia de 94,59%, da precisão de 75,74%, da sensibilidade de 77,07% e da especificidade de 96,95%. Para o caso sem falhas, obteve-se os melhores resultados para a acurácia, precisão, sensibilidade e especificidade com valores 98,05%, 77,50%, 99,84% e 97,92%, respectivamente.

Na Tabela 107 é apresentada a matriz de confusão para o circuito 1 utilizando a combinação dos nós $T_1 - T_3$. Na Tabela 108 são apresentados os valores das métricas de desempenho referentes a este caso.

Tabela 107: Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós $T_1 - T_3$ no Circuito Biquad de Tow-Thomas usando BA.

		Valores Obtidos								
		SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{C_1}	F_{C_2}
Valores Esperados	SF	700	5	10	7	14	10	16	28	10
	F_{R_1}	0	800	32	18	30	22	21	52	23
	F_{R_2}	0	46	800	11	24	28	17	45	25
	F_{R_3}	0	29	25	800	21	26	27	58	16
	F_{R_4}	1	12	25	17	794	22	24	62	57
	F_{R_5}	1	19	21	15	18	798	47	39	15
	F_{R_6}	7	11	23	5	29	52	800	57	18
	F_{C_1}	2	15	11	43	25	21	17	794	25
	F_{C_2}	0	23	28	17	31	22	15	42	798

Quando é utilizada a combinação dos nós $T_1 - T_3$, observa-se os valores médios da acurácia de 95,84%, da precisão de 81,45%, da sensibilidade de 82,16% e da especificidade de 97,66%. Para o caso sem falhas, obteve-se os melhores resultados para a acurácia, precisão, sensibilidade e especificidade com 98,73%, 87,50%, 98,45% e 98,75%, respectivamente

Tabela 108: Resultados para as métricas consideradas para a combinação dos nós $T_1 - T_3$ no Circuito Biquad de Tow-Thomas usando BA.

	SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{C_1}	F_{C_2}	Global
A	98,73	95,89	95,74	96,16	95,27	95,66	95,57	93,78	95,79	95,84
P	87,50	80,16	80,32	79,84	78,30	82,01	79,84	83,32	81,76	81,45
S	98,45	83,33	82,05	85,74	80,53	79,72	81,30	67,46	80,85	82,16
E	98,75	97,45	97,47	97,40	97,15	97,73	97,39	97,89	97,70	97,66

A Figura 20 permite a comparação das métricas globais de desempenho analisando os respectivos nós acessíveis do circuito.

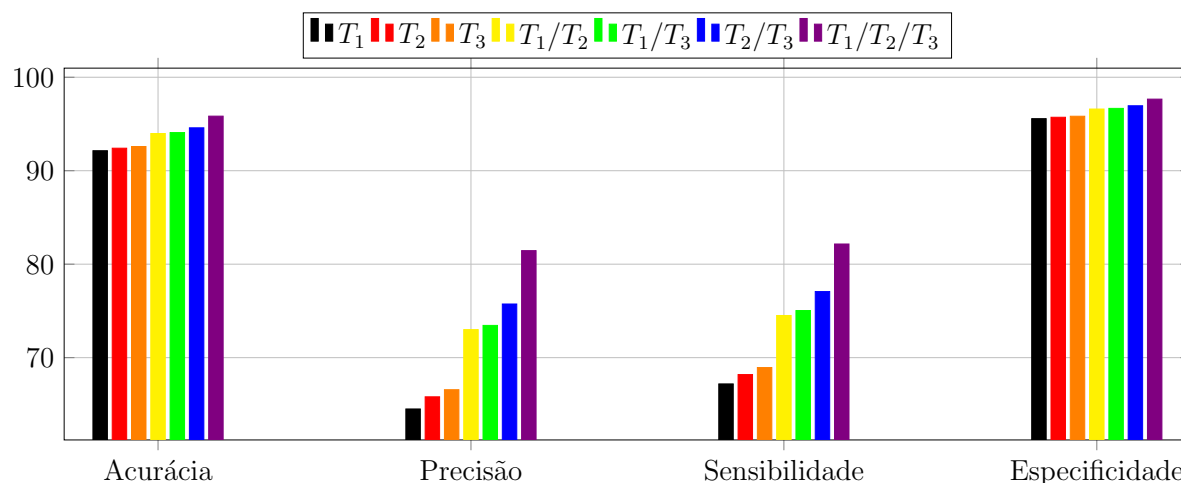


Figura 20: Comparação das métricas de avaliação para o Circuito Biquad de Tow-Thomas usando BA.

A partir do gráfico da Figura 20, observa-se que com o incremento da utilização dos nós acessíveis na análise do circuito há uma melhora nos valores das métricas consideradas. Apesar de ser observada um menor incremento na acurácia e especificidade, observa-se um maior incremento na precisão e na sensibilidade quando da utilização dos 3 nós acessíveis combinados.

5.4.2 Circuito de Butterworth

Com o *software Circuit Maker*TM foram realizadas as análises do circuito sob teste, de acordo com a alteração nos valores dos componentes, sendo possível testá-lo sob diferentes circunstâncias. Os casos desse estudo constam na Tabela 13. São apresentados os 11 casos diferentes e os valores de tensão medidos em cada nó acessível do circuito. Os

componentes têm como valores ideais $10k\Omega$ para os resistores e $10nF$ para os capacitores. Foram utilizadas as combinações de nós conforme a Tabela 30. Os resultados obtidos dos processos de otimização caso a caso, utilizando o BA, são apresentados no Apêndice B.

Na Tabela 109 é apresentada a matriz de confusão para o circuito 2 utilizando o nó T_3 individualmente. Na Tabela 110 são apresentados os valores das métricas de desempenho referentes a este caso.

Tabela 109: Matriz de confusão dos resultados do nó T_1 no Circuito Butterworth usando o BA.

		Valores Obtidos										
		SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}
Valores Esperados	SF	153	97	97	34	98	97	97	93	37	99	98
	F_{R_1}	8	965	92	26	95	98	98	97	32	98	96
	F_{R_2}	6	97	968	28	99	97	96	98	36	100	99
	F_{R_3}	1	99	100	986	98	97	97	99	86	95	97
	F_{R_4}	10	98	95	36	968	98	97	96	29	99	98
	F_{R_5}	6	96	94	36	98	977	97	99	29	94	95
	F_{R_6}	7	99	97	33	96	97	970	99	34	96	99
	F_{R_7}	4	98	96	36	96	99	100	975	18	96	98
	F_{C_1}	75	99	100	92	98	99	98	99	985	98	97
	F_{C_2}	9	99	95	30	97	97	100	98	25	968	98
F_{C_3}	7	97	97	31	96	97	97	97	25	98	975	

Tabela 110: Resultados referentes às métricas consideradas para o nó T_1 no Circuito Butterworth usando o BA.

	SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}	Global
A	94,72	90,73	90,73	93,25	90,69	90,73	90,65	90,75	92,96	90,72	90,74	91,25
P	15,30	56,60	56,15	53,15	56,15	56,77	56,17	56,82	50,77	56,41	56,79	55,46
S	53,50	49,64	50,13	72,08	49,92	50,03	49,82	50,00	73,73	49,87	50,00	55,06
E	95,36	95,54	95,45	94,94	95,45	95,52	95,44	95,53	94,45	95,50	95,53	95,31

Quando é utilizado o nó T_1 , observa-se os valores médios da acurácia de 91,25%, da precisão de 55,46%, da sensibilidade de 55,06% e da especificidade de 95,31%. Obteve-se o melhor resultado para a acurácia no caso sem falhas com valor de 94,72%. O melhor resultado de precisão foi obtido para o caso de falha em C_2 com valor de 56,79%. O caso com falha em C_1 apresentou o melhor resultado da sensibilidade com 73,73%. E o caso de falha em R_1 teve o melhor desempenho na especificidade com resultado de 95,54%.

Na Tabela 111 é apresentada a matriz de confusão para o circuito 2 utilizando o nó T_3 individualmente. Na Tabela 112 são apresentados os valores das métricas de desempenho referentes a este caso.

Tabela 111: Matriz de confusão dos resultados do nó T_2 no Circuito Butterworth usando o BA.

		Valores Obtidos										
		SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}
Valores Esperados	SF	356	7	14	16	97	98	96	99	19	99	99
	F_{R_1}	0	999	84	32	96	95	100	99	39	98	98
	F_{R_2}	0	82	1000	33	97	99	98	96	39	99	99
	F_{R_3}	84	96	82	561	97	98	97	99	64	100	98
	F_{R_4}	7	99	86	57	961	97	99	97	57	99	98
	F_{R_5}	9	19	21	20	100	972	98	95	20	97	95
	F_{R_6}	10	12	9	17	97	95	975	98	17	99	95
	F_{R_7}	14	15	19	19	96	98	98	978	12	95	98
	F_{C_1}	0	40	33	92	98	99	99	98	988	98	100
	F_{C_2}	17	16	18	19	97	97	98	99	20	960	96
	F_{C_3}	10	20	15	24	96	97	97	99	17	99	973

Tabela 112: Resultados referentes às métricas consideradas para o nó T_2 no Circuito Butterworth usando o BA.

	SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}	Global
A	95,37	93,31	93,45	92,75	89,70	90,98	91,09	91,01	93,82	90,91	90,97	91,63
P	35,60	57,41	57,41	38,01	54,70	62,87	63,98	63,42	56,62	62,46	62,90	58,04
S	70,22	71,10	72,41	63,03	49,74	49,97	49,87	49,97	76,47	49,41	49,92	56,76
E	96,13	95,30	95,30	94,37	94,77	96,23	96,39	96,29	95,23	96,21	96,23	95,67

Quando é utilizado o nó T_2 , observa-se os valores médios da acurácia de 91,63%, da precisão de 58,04%, da sensibilidade de 56,76% e da especificidade de 95,67%. Obteve-se o melhor resultado para a acurácia no caso sem falhas com valor de 95,37%. O caso de falha no resistor R_6 apresentou os melhores desempenhos nas métricas de precisão e especificidade com valores de 63,98% e 96,39%, respectivamente. O caso com falha em C_1 apresentou o melhor resultado da sensibilidade com 76,47%.

Na Tabela 113 é apresentada a matriz de confusão para o circuito 2 utilizando o nó T_3 individualmente. Na Tabela 114 são apresentados os valores das métricas de desempenho referentes a este caso.

Quando é utilizado o nó T_3 , observa-se os valores médios da acurácia de 92,81%, da precisão de 63,43%, da sensibilidade de 61,19% e da especificidade de 96,20%. Para o

Tabela 113: Matriz de confusão dos resultados do nó T_3 no Circuito Butterworth usando o BA.

		Valores Obtidos										
		SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}
Valores Esperados	SF	505	52	46	59	46	61	42	49	58	42	40
	F_{R_1}	0	1000	87	79	88	69	69	75	83	95	42
	F_{R_2}	1	72	998	61	85	79	72	71	68	83	48
	F_{R_3}	1	87	54	997	73	81	76	88	89	52	76
	F_{R_4}	0	81	76	65	1000	88	78	84	58	77	51
	F_{R_5}	3	87	73	75	88	994	70	61	59	77	59
	F_{R_6}	1	48	49	59	41	39	1000	56	59	48	50
	F_{R_7}	0	65	63	59	64	73	65	997	52	48	44
	F_{C_1}	1	64	61	71	63	55	58	65	997	55	58
	F_{C_2}	0	67	51	55	63	71	61	58	57	999	62
	F_{C_3}	1	55	51	48	63	53	62	45	61	66	999

Tabela 114: Resultados referentes às métricas consideradas para o nó T_3 no Circuito Butterworth usando o BA.

	SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}	Global
A	97,02	91,91	92,59	92,25	92,11	92,17	93,47	92,98	92,92	92,96	93,87	92,81
P	50,50	59,28	60,93	59,56	60,31	60,39	68,97	65,16	64,41	64,70	66,42	63,43
S	98,44	59,59	62,03	61,24	59,74	59,77	60,50	60,46	60,76	60,84	65,34	61,19
E	96,98	95,48	95,81	95,56	95,67	95,72	97,04	96,50	96,38	96,42	96,71	96,20

caso sem falhas, obteve-se os melhores resultados para a acurácia e sensibilidade: 97,02% e 98,44%, respectivamente. O caso de falha no resistor R_6 obteve as melhores medida para as métricas de precisão e especificidade com valores de 68,97% e 97,04%, respectivamente.

Na Tabela 115 é apresentada a matriz de confusão para o circuito 2 utilizando o nó T_4 individualmente. Na Tabela 116 são apresentados os valores das métricas de desempenho referentes a este caso.

Quando é utilizado o nó T_4 , observa-se um valor médio da acurácia de 92,97%, uma precisão de 64,18%, uma sensibilidade de 61,97% e uma especificidade de 96,29%. Para o caso sem falhas, obteve-se os melhores resultados para a acurácia e sensibilidade: 97,21% e 98,72%, respectivamente. O caso de falha no resistor R_6 obteve as melhores medida para as métricas de precisão e especificidade com valores de 70,72% e 97,25%, respectivamente.

Na Tabela 117 é apresentada a matriz de confusão para o circuito 2 utilizando o nó T_5 individualmente. Na Tabela 118 são apresentados os valores das métricas de desempenho referentes a este caso.

Tabela 115: Matriz de confusão dos resultados do nó T_4 no Circuito Butterworth usando o BA.

		Valores Obtidos										
		SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}
Valores Esperados	SF	540	53	45	50	52	51	33	50	66	28	32
	F_{R_1}	0	1000	82	74	79	81	76	80	81	92	38
	F_{R_2}	1	86	999	82	81	69	75	82	79	84	38
	F_{R_3}	1	67	62	999	76	61	65	78	83	55	70
	F_{R_4}	1	71	63	66	998	68	71	80	58	66	48
	F_{R_5}	0	75	62	72	68	1000	63	61	75	65	61
	F_{R_6}	1	51	41	52	38	37	1000	49	53	47	45
	F_{R_7}	1	68	65	71	61	79	76	997	61	51	52
	F_{C_1}	1	62	57	68	58	57	55	59	997	56	62
	F_{C_2}	1	65	48	59	62	63	65	63	51	997	48
	F_{C_3}	0	57	48	51	67	51	56	48	59	61	997

Tabela 116: Resultados referentes às métricas consideradas para o nó T_4 no Circuito Butterworth usando o BA.

	SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}	Global
A	97,21	91,99	92,52	92,44	92,62	92,71	93,72	92,61	92,81	93,24	94,06	92,97
P	54,00	59,42	59,61	61,78	62,77	62,42	70,72	63,02	65,08	65,51	66,69	64,18
S	98,72	60,42	63,55	60,77	60,85	61,84	61,16	60,53	59,95	62,23	66,87	61,97
E	97,15	95,46	95,53	95,90	96,07	96,01	97,25	96,12	96,45	96,53	96,73	96,29

Tabela 117: Matriz de confusão dos resultados do nó T_5 no Circuito Butterworth usando o BA.

		Valores Obtidos										
		SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}
Valores Esperados	SF	556	47	52	58	51	43	39	41	51	36	26
	F_{R_1}	1	999	83	80	81	53	75	81	74	91	34
	F_{R_2}	0	79	999	62	81	51	54	72	76	81	37
	F_{R_3}	2	71	68	998	78	64	65	51	83	67	75
	F_{R_4}	1	74	61	61	999	70	59	71	59	71	44
	F_{R_5}	0	64	62	71	79	999	59	56	74	75	62
	F_{R_6}	0	52	47	51	65	42	1000	54	56	49	41
	F_{R_7}	0	61	59	65	60	72	63	999	54	47	48
	F_{C_1}	0	59	48	74	61	51	48	57	998	57	63
	F_{C_2}	1	69	42	51	67	66	59	62	50	995	57
	F_{C_3}	4	51	57	55	59	49	51	50	53	62	994

Quando é utilizado o nó T_5 , observa-se os valores médios da acurácia de 93,10%, da precisão de 64,73%, da sensibilidade de 62,65% e da especificidade de 96,35%. Para o caso sem falhas, obteve-se os melhores resultados para a acurácia, precisão, sensibilidade

Tabela 118: Resultados referentes às métricas consideradas para o nó T_5 no Circuito Butterworth usando o BA.

	SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}	Global
A	97,26	92,26	92,92	92,43	92,43	92,97	93,78	93,21	93,06	92,99	94,09	93,10
P	55,60	60,47	62,75	61,53	63,63	62,40	68,63	65,38	65,83	65,50	66,94	64,73
S	98,41	61,44	63,31	61,38	59,43	64,04	63,61	62,67	61,30	61,01	67,12	62,65
E	97,22	95,62	96,04	95,82	96,16	95,98	96,95	96,46	96,53	96,49	96,74	96,35

e especificidade: 97,26%, 98,41% e 97,22%, respectivamente. O caso de falha no resistor R_6 teve a melhor medida de precisão com 68,63%.

Na Tabela 119 é apresentada a matriz de confusão para o circuito 2 utilizando a combinação dos nós T_1 e T_2 . Na Tabela 120 são apresentados os valores das métricas de desempenho referentes a este caso.

Tabela 119: Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós T_1 e T_2 no Circuito Butterworth usando o BA.

		Valores Obtidos										
		SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}
Valores Esperados	SF	359	17	12	19	99	98	97	94	10	96	99
	F_{R_1}	0	1000	84	35	96	98	98	95	42	98	97
	F_{R_2}	0	88	1000	35	99	99	100	97	31	100	99
	F_{R_3}	17	96	79	881	98	95	99	97	61	95	100
	F_{R_4}	8	100	88	62	971	97	99	97	56	98	98
	F_{R_5}	17	15	24	26	99	960	96	99	22	98	95
	F_{R_6}	16	19	17	21	98	96	969	96	15	93	97
	F_{R_7}	18	15	20	27	98	96	99	974	22	98	98
	F_{C_1}	0	40	38	93	96	99	98	100	989	99	99
	F_{C_2}	12	24	18	16	94	97	100	97	20	975	100
F_{C_3}	12	13	18	22	99	96	95	98	19	98	978	

Tabela 120: Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós T_1 e T_2 no Circuito Butterworth usando o BA.

	SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}	Global
A	95,76	93,31	93,45	93,18	89,83	91,07	91,14	91,07	93,94	91,13	91,13	91,77
P	35,90	57,37	57,21	51,28	54,74	61,90	63,04	62,24	56,48	62,78	63,18	59,20
S	78,21	70,08	71,53	71,22	49,87	49,72	49,69	50,10	76,85	50,05	49,90	57,66
E	96,24	95,37	95,35	94,85	94,83	96,20	96,34	96,20	95,30	96,28	96,33	95,74

Quando é utilizada a combinação dos nós T_1 e T_2 , observa-se os valores médios da acurácia de 91,77%, da precisão de 59,20%, da sensibilidade de 57,66% e da especificidade de 95,74%. Para o caso sem falhas, obteve-se os melhores resultados para a acurácia e

sensibilidade: 95,76% e 78,21%, respectivamente. O caso de falha no resistor C_3 obteve os melhores desempenhos para as métricas de precisão e especificidade com valores de 63,18% e 96,33%, respectivamente.

Na Tabela 121 é apresentada a matriz de confusão para o circuito 2 utilizando a combinação dos nós T_1 e T_3 . Na Tabela 122 são apresentados os valores das métricas de desempenho referentes a este caso.

Tabela 121: Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós T_1 e T_3 no Circuito Butterworth usando o BA.

		Valores Obtidos										
		SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}
Valores Esperados	SF	624	49	46	32	40	49	40	57	30	22	11
	F_{R_1}	0	999	86	60	78	90	70	88	61	88	32
	F_{R_2}	0	86	981	38	82	83	60	71	44	97	30
	F_{R_3}	0	67	59	985	67	74	61	74	89	47	33
	F_{R_4}	0	59	66	29	999	94	68	74	29	84	53
	F_{R_5}	0	80	71	40	91	991	55	61	45	58	44
	F_{R_6}	0	87	76	82	90	71	991	93	91	72	80
	F_{R_7}	0	79	70	37	53	89	90	998	29	60	98
	F_{C_1}	0	66	63	94	72	68	56	76	996	49	50
	F_{C_2}	0	84	82	28	66	99	84	86	24	991	69
	F_{C_3}	0	84	67	54	86	82	66	77	46	57	1000

Tabela 122: Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós T_1 e T_3 no Circuito Butterworth usando o BA.

	SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}	Global
A	97,79	91,81	92,50	93,75	92,48	92,11	91,83	92,00	93,65	92,62	93,43	92,71
P	62,40	60,47	62,40	63,30	64,24	64,52	57,18	62,26	62,64	61,44	61,77	62,20
S	100,00	57,41	58,85	66,60	57,95	55,36	60,39	56,87	67,12	60,98	66,67	61,20
E	97,71	95,73	96,15	96,33	96,37	96,42	95,18	96,04	96,18	95,96	96,01	96,07

Quando é utilizada a combinação dos nós T_1 e T_3 , observa-se os valores médios da acurácia de 92,71%, da precisão de 62,20%, da sensibilidade de 61,20% e da especificidade de 96,07%. Para o caso sem falhas, obteve-se os melhores resultados para a acurácia, sensibilidade e especificidade: 97,79%, 100,00% e 97,71%, respectivamente. O caso de falha no resistor R_5 teve a melhor medida de precisão com 64,52%.

Na Tabela 123 é apresentada a matriz de confusão para o circuito 2 utilizando a combinação dos nós T_1 e T_4 . Na Tabela 124 são apresentados os valores das métricas de desempenho referentes a este caso.

Tabela 123: Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós T_1 e T_4 no Circuito Butterworth usando o BA.

		Valores Obtidos										
		SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}
Valores Esperados	SF	634	36	40	21	43	42	49	67	32	23	13
	F_{R_1}	0	999	82	71	84	53	69	88	51	94	22
	F_{R_2}	0	88	988	39	87	65	76	86	44	93	14
	F_{R_3}	1	72	46	984	65	62	65	79	86	42	30
	F_{R_4}	0	72	77	43	994	60	81	90	41	86	22
	F_{R_5}	0	72	58	54	84	993	63	76	51	65	68
	F_{R_6}	0	81	79	84	76	82	984	92	83	74	78
	F_{R_7}	0	75	71	28	68	71	90	995	26	69	59
	F_{C_1}	0	66	57	95	66	58	65	76	992	41	27
	F_{C_2}	0	82	90	27	92	68	92	93	28	994	27
	F_{C_3}	0	67	50	48	76	94	74	89	60	75	997

Tabela 124: Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós T_1 e T_4 no Circuito Butterworth usando o BA.

	SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}	Global
A	97,83	92,16	92,65	93,74	92,23	92,63	91,41	91,76	93,77	92,54	94,13	92,76
P	63,40	61,93	62,53	64,23	63,47	62,69	57,44	64,11	64,29	62,40	61,17	62,48
S	99,84	58,42	60,32	65,86	57,29	60,25	57,61	54,34	66,40	60,02	73,47	61,73
E	97,75	95,96	96,12	96,44	96,23	96,13	95,20	96,31	96,42	96,07	95,93	96,10

Quando é utilizada a combinação dos nós T_1 e T_4 , observa-se os valores médios da acurácia de 92,76%, da precisão de 62,48%, da sensibilidade de 61,73% e da especificidade de 96,10%. Para o caso sem falhas, obteve-se os melhores resultados para a acurácia, sensibilidade e especificidade: 97,83%, 99,84% e 97,75%, respectivamente. O caso de falha no resistor C_1 teve a melhor medida de precisão com 64,29%.

Na Tabela 125 é apresentada a matriz de confusão para o circuito 2 utilizando a combinação dos nós T_1 e T_5 . Na Tabela 126 são apresentados os valores das métricas de desempenho referentes a este caso.

Quando é utilizada a combinação dos nós T_1 e T_5 , observa-se os valores médios da acurácia de 92,50%, da precisão de 61,18%, da sensibilidade de 60,20% e da especificidade de 95,96%. Para o caso sem falhas, obteve-se os melhores resultados para a acurácia, sensibilidade e especificidade: 97,42%, 99,47% e 97,35%, respectivamente. O caso de falha no resistor R_4 teve a melhor medida de precisão com 63,22%.

Tabela 125: Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós T_1 e T_5 no Circuito Butterworth usando o BA.

		Valores Obtidos										
		SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}
Valores Esperados	SF	559	59	62	42	53	42	41	39	43	48	12
	F_{R_1}	0	999	84	83	89	70	70	83	76	93	24
	F_{R_2}	1	89	985	62	88	66	59	77	55	93	25
	F_{R_3}	1	76	72	980	80	63	58	40	92	63	57
	F_{R_4}	0	81	82	54	990	68	65	63	45	87	31
	F_{R_5}	0	75	66	70	95	985	46	54	69	85	73
	F_{R_6}	1	94	83	89	93	71	996	92	91	95	46
	F_{R_7}	0	86	89	42	76	59	89	992	46	91	47
	F_{C_1}	0	72	75	97	68	76	46	53	990	65	50
	F_{C_2}	0	89	83	42	90	64	82	82	39	985	18
	F_{C_3}	0	77	71	68	91	92	50	60	76	77	995

Tabela 126: Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós T_1 e T_5 no Circuito Butterworth usando o BA.

	SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}	Global
A	97,42	91,47	91,98	92,74	91,88	92,43	92,10	92,64	92,84	91,95	93,93	92,50
P	55,90	59,78	61,56	61,95	63,22	60,88	56,88	61,35	62,19	62,58	60,05	61,18
S	99,47	55,59	56,22	60,16	54,61	59,48	62,17	60,67	61,04	55,27	72,21	60,20
E	97,35	95,65	96,03	96,14	96,26	95,94	95,17	95,99	96,14	96,19	95,82	95,96

Na Tabela 127 é apresentada a matriz de confusão para o circuito 2 utilizando a combinação dos nós T_2 e T_3 . Na Tabela 128 são apresentados os valores das métricas de desempenho referentes a este caso.

Tabela 127: Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós T_2 e T_3 no Circuito Butterworth usando o BA.

		Valores Obtidos										
		SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}
Valores Esperados	SF	722	16	30	29	34	46	38	46	12	12	15
	F_{R_1}	0	1000	87	35	66	58	54	66	36	17	22
	F_{R_2}	0	87	1000	25	54	71	45	59	28	24	27
	F_{R_3}	33	68	50	825	95	96	90	78	74	43	100
	F_{R_4}	0	92	81	47	996	93	85	96	48	99	82
	F_{R_5}	0	30	27	24	86	985	38	48	27	34	55
	F_{R_6}	0	50	47	66	71	61	998	86	59	65	61
	F_{R_7}	0	16	25	21	49	82	88	999	25	46	74
	F_{C_1}	0	27	29	94	67	70	54	55	989	19	23
	F_{C_2}	0	19	24	19	52	98	80	89	22	1000	63
	F_{C_3}	0	37	39	31	79	80	73	68	31	32	999

Tabela 128: Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós T_2 e T_3 no Circuito Butterworth usando o BA.

	SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}	Global
A	98,04	94,42	94,58	92,94	91,31	92,90	92,35	92,95	94,95	94,59	93,74	93,37
P	72,20	69,40	70,42	53,16	57,94	72,75	63,81	70,11	69,31	68,21	68,01	65,97
S	95,63	69,35	69,49	67,85	60,40	56,61	60,74	59,11	73,21	71,89	65,68	65,00
E	98,16	96,94	97,08	95,03	94,90	97,38	96,01	96,99	96,98	96,77	96,72	96,43

Quando é utilizada a combinação dos nós T_2 e T_3 , observa-se os valores médios da acurácia de 93,37%, da precisão de 65,97%, da sensibilidade de 65,00% e da especificidade de 96,43%. Para o caso sem falhas, obteve-se os melhores resultados para a acurácia, sensibilidade e especificidade: 98,04%, 95,63% e 98,16%, respectivamente. O caso de falha no resistor R_5 teve a melhor medida de precisão com 72,75%.

Na Tabela 129 é apresentada a matriz de confusão para o circuito 2 utilizando a combinação dos nós T_2 e T_4 . Na Tabela 130 são apresentados os valores das métricas de desempenho referentes a este caso.

Tabela 129: Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós T_2 e T_4 no Circuito Butterworth usando o BA.

		Valores Obtidos										
		SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}
Valores Esperados	SF	730	18	23	14	42	33	47	55	19	14	5
	F_{R_1}	0	999	82	33	72	49	58	74	33	31	18
	F_{R_2}	0	86	980	28	65	47	53	65	34	26	15
	F_{R_3}	58	73	60	780	85	96	88	76	68	62	93
	F_{R_4}	0	99	90	53	999	64	82	93	48	98	41
	F_{R_5}	0	29	28	30	82	995	62	73	26	33	62
	F_{R_6}	0	49	47	53	68	72	994	88	55	60	69
	F_{R_7}	0	25	17	21	60	51	85	999	19	52	59
	F_{C_1}	0	31	29	93	54	50	62	69	994	28	17
	F_{C_2}	0	18	22	19	82	62	83	90	21	1000	15
	F_{C_3}	0	34	37	31	58	81	73	83	35	40	997

Tabela 130: Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós T_2 e T_4 no Circuito Butterworth usando o BA.

	SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}	Global
A	97,91	94,20	94,57	92,79	91,50	93,45	92,03	92,66	94,97	94,56	94,49	93,45
P	73,00	68,94	70,05	50,68	59,93	70,07	63,92	71,97	69,66	70,82	67,87	66,11
S	92,64	68,38	69,26	67,53	59,93	62,19	58,92	56,60	73,52	69,25	71,68	65,43
E	98,19	96,85	97,07	94,79	95,25	96,99	96,00	97,21	96,99	97,12	96,71	96,46

Quando é utilizada a combinação dos nós T_2 e T_4 , observa-se os valores médios da acurácia de 93,45%, da precisão de 66,11%, da sensibilidade de 65,43% e da especificidade de 96,46%. Para o caso sem falhas, obteve-se os melhores resultados para a acurácia, precisão, sensibilidade e especificidade: 97,91%, 73,00%, 92,64% e 98,19%, respectivamente.

Na Tabela 131 é apresentada a matriz de confusão para o circuito 2 utilizando a combinação dos nós T_2 e T_5 . Na Tabela 132 são apresentados os valores das métricas de desempenho referentes a este caso.

Tabela 131: Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós T_2 e T_5 no Circuito Butterworth usando o BA.

		Valores Obtidos										
		SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}
Valores Esperados	SF	699	26	32	25	58	29	27	32	26	39	7
	F_{R_1}	0	999	82	55	75	46	49	41	63	68	25
	F_{R_2}	0	88	988	43	73	58	56	48	46	67	18
	F_{R_3}	28	69	52	874	86	96	52	41	76	60	87
	F_{R_4}	0	97	74	57	999	58	61	73	51	94	39
	F_{R_5}	0	39	51	50	90	988	35	40	48	73	74
	F_{R_6}	0	77	72	83	95	57	997	91	83	68	66
	F_{R_7}	0	33	39	32	62	44	91	995	31	92	33
	F_{C_1}	0	44	44	95	64	59	42	38	997	58	21
	F_{C_2}	0	37	38	33	85	62	84	81	32	990	18
	F_{C_3}	0	46	45	68	90	94	36	54	63	80	995

Tabela 132: Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós T_2 e T_5 no Circuito Butterworth usando o BA.

	SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}	Global
A	97,97	93,47	93,68	92,68	91,49	93,21	92,45	93,86	93,94	92,80	94,06	93,13
P	69,90	66,47	66,53	57,46	62,32	66,40	59,03	68,53	68,19	67,81	63,34	64,40
S	96,15	64,24	65,13	61,77	56,22	62,10	65,16	64,86	65,77	58,61	71,95	63,51
E	98,06	96,57	96,62	95,63	95,82	96,59	95,29	96,89	96,84	96,77	96,12	96,29

Quando é utilizada a combinação dos nós T_2 e T_5 , observa-se os valores médios da acurácia de 93,13%, da precisão de 64,40%, da sensibilidade de 63,51% e da especificidade de 96,29%. Para o caso sem falhas, obteve-se os melhores resultados para a acurácia, precisão, sensibilidade e especificidade: 97,97%, 69,90%, 96,15% e 98,06%, respectivamente.

Na Tabela 133 é apresentada a matriz de confusão para o circuito 2 utilizando a combinação dos nós T_3 e T_4 . Na Tabela 134 são apresentados os valores das métricas de desempenho referentes a este caso.

Tabela 133: Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós T_3 e T_4 no Circuito Butterworth usando o BA.

		Valores Obtidos										
		SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}
Valores Esperados	SF	607	47	44	43	38	29	48	53	50	29	12
	F_{R_1}	0	1000	72	59	74	61	58	73	71	88	25
	F_{R_2}	0	61	997	58	68	35	51	67	71	68	28
	F_{R_3}	2	71	48	997	58	45	68	54	75	45	47
	F_{R_4}	0	68	72	65	1000	55	48	68	53	74	35
	F_{R_5}	0	53	48	72	73	998	55	61	69	68	59
	F_{R_6}	0	38	41	56	39	29	991	49	53	42	35
	F_{R_7}	0	54	59	43	51	37	44	996	46	51	37
	F_{C_1}	0	51	57	68	58	41	45	57	1000	43	48
	F_{C_2}	3	59	45	49	51	48	55	60	48	995	38
	F_{C_3}	0	48	44	51	46	47	59	49	45	50	998

Tabela 134: Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós T_3 e T_4 no Circuito Butterworth usando o BA.

	SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}	Global
A	97,49	92,86	93,45	93,20	93,09	93,78	94,23	93,60	93,38	93,60	94,93	93,70
P	60,70	63,25	66,29	66,03	65,02	64,14	72,18	70,24	68,12	68,57	69,45	67,78
S	99,18	64,52	65,29	63,87	64,27	70,04	65,11	62,76	63,25	64,07	73,27	65,77
E	97,42	95,93	96,46	96,41	96,23	96,13	97,33	97,04	96,72	96,81	96,97	96,68

Quando é utilizada a combinação dos nós T_3 e T_4 , observa-se os valores médios da acurácia de 93,70%, da precisão de 67,78%, da sensibilidade de 65,77% e da especificidade de 96,68%. Para o caso sem falhas, obteve-se os melhores resultados para a acurácia, sensibilidade e especificidade: 97,49%, 99,18% e 97,42%, respectivamente. O caso de falha no resistor R_6 teve a melhor medida de precisão com 72,18%.

Na Tabela 135 é apresentada a matriz de confusão para o circuito 2 utilizando a combinação dos nós T_3 e T_5 . Na Tabela 136 são apresentados os valores das métricas de desempenho referentes a este caso.

Quando é utilizada a combinação dos nós T_3 e T_5 , observa-se os valores médios da acurácia de 93,85%, da precisão de 68,25%, da sensibilidade de 66,77% e da especificidade de 96,72%. Para o caso sem falhas, obteve-se os melhores resultados para a acurácia, sensibilidade e especificidade: 96,94%, 88,24% e 97,34%, respectivamente. O caso de falha no resistor R_6 teve a melhor medida de precisão com 72,50%.

Tabela 135: Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós T_3 e T_5 no Circuito Butterworth usando o BA.

		Valores Obtidos										
		SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}
Valores Esperados	SF	600	50	39	66	43	31	32	29	61	24	25
	F_{R_1}	1	999	74	65	74	44	57	68	48	73	27
	F_{R_2}	72	70	999	58	72	42	48	71	62	54	21
	F_{R_3}	3	73	54	997	64	48	55	48	65	48	41
	F_{R_4}	1	61	73	55	999	58	41	58	42	77	40
	F_{R_5}	0	52	41	76	80	998	48	49	51	52	58
	F_{R_6}	0	36	43	48	51	31	999	48	51	38	33
	F_{R_7}	0	51	48	49	43	47	50	1000	51	49	34
	F_{C_1}	1	52	55	65	52	48	41	52	998	42	47
	F_{C_2}	2	57	53	48	52	42	49	57	45	994	34
	F_{C_3}	0	49	37	55	41	44	55	41	47	51	998

Tabela 136: Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós T_3 e T_5 no Circuito Butterworth usando o BA.

	SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}	Global
A	96,94	93,11	93,08	93,10	93,14	94,00	94,56	94,00	93,77	93,97	95,03	93,85
P	60,00	65,29	63,67	66,64	66,38	66,31	72,50	70,32	68,69	69,36	70,38	68,25
S	88,24	64,45	65,90	63,02	63,59	69,64	67,73	65,75	65,61	66,18	73,49	66,77
E	97,34	96,25	95,98	96,47	96,42	96,45	97,34	97,03	96,79	96,91	97,07	96,72

Na Tabela 137 é apresentada a matriz de confusão para o circuito 2 utilizando a combinação dos nós T_4 e T_5 . Na Tabela 138 são apresentados os valores das métricas de desempenho referentes a este caso.

Tabela 137: Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós T_4 e T_5 no Circuito Butterworth usando o BA.

		Valores Obtidos										
		SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}
Valores Esperados	SF	611	48	58	49	42	40	26	24	55	26	21
	F_{R_1}	0	999	69	71	75	41	48	51	75	81	17
	F_{R_2}	1	75	999	64	71	49	38	54	76	78	27
	F_{R_3}	2	68	55	998	63	41	53	38	72	50	44
	F_{R_4}	1	61	71	53	998	49	47	59	45	71	36
	F_{R_5}	0	57	45	68	61	998	44	39	54	59	51
	F_{R_6}	1	39	45	41	46	26	997	39	45	37	36
	F_{R_7}	0	49	41	50	39	48	42	1000	49	41	29
	F_{C_1}	3	48	51	66	57	42	39	51	997	48	45
	F_{C_2}	2	54	51	43	48	51	43	51	47	996	37
	F_{C_3}	2	47	50	51	44	47	49	47	44	42	997

Tabela 138: Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós T_4 e T_5 no Circuito Butterworth usando o BA.

	SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}	Global
A	97,42	93,09	93,12	93,29	93,31	94,13	94,95	94,59	93,49	93,82	95,07	93,98
P	61,10	65,42	65,21	67,25	66,93	67,62	73,74	72,05	68,90	69,99	70,21	69,10
S	98,07	64,66	65,08	64,22	64,64	69,69	69,92	68,82	63,95	65,14	74,40	67,32
E	97,39	96,23	96,19	96,53	96,48	96,61	97,48	97,25	96,78	96,95	97,02	96,81

Quando é utilizada a combinação dos nós T_4 e T_5 , observa-se os valores médios da acurácia de 93,98%, da precisão de 69,10%, da sensibilidade de 67,32% e da especificidade de 96,81%. Para o caso sem falhas, obteve-se os melhores resultados para a acurácia e sensibilidade: 97,42% e 98,07%, respectivamente. O caso de falha no resistor R_6 obteve as melhores medidas de desempenho para as métricas de precisão e especificidade com 73,74% e 97,48%, respectivamente.

Na Tabela 139 é apresentada a matriz de confusão para o circuito 2 utilizando a combinação dos nós T_1 , T_2 e T_3 . Na Tabela 140 são apresentados os valores das métricas de desempenho referentes a este caso.

Tabela 139: Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós T_1 , T_2 e T_3 no Circuito Butterworth usando o BA.

		Valores Obtidos										
		SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}
Valores Esperados	SF	728	19	19	13	36	53	45	49	16	10	12
	F_{R_1}	0	1000	89	45	56	71	41	57	27	30	22
	F_{R_2}	0	89	1000	20	53	67	39	50	27	24	25
	F_{R_3}	9	70	55	930	96	97	91	69	71	46	99
	F_{R_4}	0	98	79	51	997	97	79	97	52	94	69
	F_{R_5}	0	35	33	29	92	987	32	52	31	39	45
	F_{R_6}	0	55	53	52	63	66	996	86	57	61	66
	F_{R_7}	0	24	26	21	45	89	92	1000	24	68	74
	F_{C_1}	0	21	25	95	43	70	49	60	994	65	49
	F_{C_2}	0	17	29	23	51	99	76	87	14	1000	65
	F_{C_3}	0	34	42	28	74	81	69	73	34	28	1000

Quando é utilizada a combinação dos nós T_1 , T_2 e T_3 , observa-se os valores médios da acurácia de 93,40%, da precisão de 66,16%, da sensibilidade de 65,19% e da especificidade de 96,44%. Para o caso sem falhas, obteve-se os melhores resultados para a acurácia, precisão, sensibilidade e especificidade: 98,24%, 72,80%, 98,78% e 98,21%, respectivamente.

Tabela 140: Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós T_1 , T_2 e T_3 no Circuito Butterworth usando o BA.

	SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}	Global
A	98,24	94,36	94,71	93,24	91,70	92,62	92,66	92,84	94,80	94,20	93,81	93,40
P	72,80	69,54	71,74	56,95	58,20	71,78	64,05	68,35	67,57	68,45	68,35	66,16
S	98,78	68,40	68,97	71,16	62,08	55,54	61,90	59,52	73,79	68,26	65,53	65,19
E	98,21	96,98	97,29	95,20	95,01	97,27	96,11	96,76	96,74	96,82	96,79	96,44

Na Tabela 141 é apresentada a matriz de confusão para o circuito 2 utilizando a combinação dos nós T_1 , T_2 e T_4 . Na Tabela 142 são apresentados os valores das métricas de desempenho referentes a este caso.

Tabela 141: Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós T_1 , T_2 e T_4 no Circuito Butterworth usando o BA.

		Valores Obtidos										
		SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}
Valores Esperados	SF	730	23	20	16	43	37	45	51	14	15	6
	F_{R_1}	0	998	83	39	64	49	64	67	31	33	16
	F_{R_2}	72	89	1000	21	59	38	55	72	21	27	17
	F_{R_3}	16	83	58	906	93	99	82	72	74	49	91
	F_{R_4}	0	97	85	51	1000	62	86	94	44	97	40
	F_{R_5}	0	26	26	30	83	994	59	73	31	27	64
	F_{R_6}	0	47	49	58	53	73	994	92	52	62	64
	F_{R_7}	0	29	24	21	56	45	92	998	22	58	57
	F_{C_1}	0	28	40	95	57	48	63	65	987	28	12
	F_{C_2}	0	27	32	16	74	59	89	87	19	991	22
	F_{C_3}	0	37	31	24	66	88	81	88	34	47	993

Tabela 142: Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós T_1 , T_2 e T_4 no Circuito Butterworth usando o BA.

	SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}	Global
A	97,75	94,13	94,21	93,15	91,79	93,60	92,03	92,66	95,10	94,53	94,43	93,50
P	73,00	69,11	67,98	55,82	60,39	70,35	64,38	71,18	69,36	69,99	66,69	66,24
S	89,24	67,25	69,06	70,95	60,68	62,44	58,13	56,74	74,27	69,11	71,85	65,91
E	98,21	96,90	96,74	95,09	95,39	97,07	96,12	97,14	97,00	97,06	96,58	96,46

Quando é utilizada a combinação dos nós T_1 , T_2 e T_4 , observa-se os valores médios da acurácia de 93,50%, da precisão de 66,24%, da sensibilidade de 65,91% e da especificidade de 96,46%. Para o caso sem falhas, obteve-se os melhores resultados para a acurácia, precisão, sensibilidade e especificidade: 97,75%, 73,00%, 89,24% e 98,21%, respectivamente.

Na Tabela 143 é apresentada a matriz de confusão para o circuito 2 utilizando a combinação dos nós T_1 , T_2 e T_5 . Na Tabela 144 são apresentados os valores das métricas de desempenho referentes a este caso.

Tabela 143: Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós T_1 , T_2 e T_5 no Circuito Butterworth usando o BA.

		Valores Obtidos										
		SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}
Valores Esperados	SF	688	25	26	31	55	41	32	27	26	42	7
	F_{R_1}	0	999	87	58	73	53	42	59	52	74	14
	F_{R_2}	0	84	989	46	75	47	43	55	39	73	11
	F_{R_3}	9	59	47	952	95	93	62	41	74	73	85
	F_{R_4}	0	94	75	51	996	61	73	79	60	96	39
	F_{R_5}	0	39	42	38	85	994	41	42	40	78	79
	F_{R_6}	0	74	73	81	95	58	1000	84	84	96	41
	F_{R_7}	0	42	34	28	59	44	88	996	21	92	26
	F_{C_1}	3	35	51	95	71	57	33	44	991	58	23
	F_{C_2}	0	33	34	25	83	62	76	87	28	997	23
	F_{C_3}	0	47	56	54	94	89	46	50	49	72	994

Tabela 144: Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós T_1 , T_2 e T_5 no Circuito Butterworth usando o BA.

	SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}	Global
A	98,01	93,57	93,86	92,95	91,30	93,29	92,48	93,83	94,19	92,58	94,43	93,21
P	68,80	66,12	67,65	59,87	61,33	67,25	59,31	69,65	67,83	68,85	64,09	65,09
S	98,29	65,25	65,32	65,25	55,92	62,16	65,10	63,68	67,69	56,94	74,07	64,02
E	97,99	96,52	96,79	95,68	95,66	96,69	95,33	97,04	96,82	96,89	96,26	96,35

Quando é utilizada a combinação dos nós T_1 , T_2 e T_5 , observa-se os valores médios da acurácia de 93,21%, da precisão de 65,09%, da sensibilidade de 64,02% e da especificidade de 96,35%. Para o caso sem falhas, obteve-se os melhores resultados para a acurácia, sensibilidade e especificidade: 98,01%, 98,29% e 97,99%, respectivamente. O caso de falha no capacitor R_7 teve a melhor medida de precisão com 69,65%.

Na Tabela 145 é apresentada a matriz de confusão para o circuito 2 utilizando a combinação dos nós T_1 , T_3 e T_4 . Na Tabela 146 são apresentados os valores das métricas de desempenho referentes a este caso.

Quando é utilizada a combinação dos nós T_1 , T_3 e T_4 , observa-se os valores médios da acurácia de 93,41%, da precisão de 65,86%, da sensibilidade de 64,85% e da especificidade de 96,47%. Para o caso sem falhas, obteve-se os melhores resultados para a acurácia,

Tabela 145: Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós T_1 , T_3 e T_4 no Circuito Butterworth usando o BA.

		Valores Obtidos										
		SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}
Valores Esperados	SF	679	41	42	31	24	17	38	48	35	35	10
	F_{R_1}	0	999	86	58	83	47	54	79	65	94	29
	F_{R_2}	0	94	988	45	86	42	59	72	46	91	12
	F_{R_3}	1	64	64	986	63	33	53	60	95	31	26
	F_{R_4}	0	68	73	31	998	22	67	74	28	75	21
	F_{R_5}	0	38	46	43	75	999	40	63	54	50	51
	F_{R_6}	0	69	69	90	66	56	997	90	90	69	53
	F_{R_7}	0	62	66	36	43	26	91	998	34	51	46
	F_{C_1}	0	61	62	98	64	37	61	77	993	42	32
	F_{C_2}	0	78	84	19	64	22	82	82	20	992	30
	F_{C_3}	0	57	53	66	82	79	62	71	61	53	998

Tabela 146: Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós T_1 , T_3 e T_4 no Circuito Butterworth usando o BA.

	SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}	Global
A	98,01	92,43	92,64	93,79	93,16	94,81	92,23	92,77	93,45	93,38	94,48	93,41
P	67,90	62,67	64,36	66,80	68,50	68,47	60,46	68,69	65,03	67,35	63,08	65,86
S	99,85	61,25	60,50	65,60	60,56	72,39	62,16	58,23	65,29	62,67	76,30	64,85
E	97,93	95,92	96,25	96,67	96,85	96,90	95,53	96,86	96,36	96,71	96,08	96,47

sensibilidade e especificidade: 98,01%, 99,85% e 97,93%, respectivamente. O caso de falha no capacitor R_7 teve a melhor medida de precisão com 68,69%.

Na Tabela 147 é apresentada a matriz de confusão para o circuito 2 utilizando a combinação dos nós T_1 , T_3 e T_5 . Na Tabela 148 são apresentados os valores das métricas de desempenho referentes a este caso.

Quando é utilizada a combinação dos nós T_1 , T_3 e T_5 , observa-se os valores médios da acurácia de 93,33%, da precisão de 65,41%, da sensibilidade de 64,29% e da especificidade de 96,41%. Para o caso sem falhas, obteve-se os melhores resultados para a acurácia, sensibilidade e especificidade: 98,12%, 99,57% e 98,05%, respectivamente. O caso de falha no capacitor R_2 teve a melhor medida de precisão com 70,11%.

Na Tabela 149 é apresentada a matriz de confusão para o circuito 2 utilizando a combinação dos nós T_1 , T_4 e T_5 . Na Tabela 150 são apresentados os valores das métricas de desempenho referentes a este caso.

Quando é utilizada a combinação dos nós T_1 , T_4 e T_5 , observa-se os valores médios da acurácia de 94,41%, da precisão de 71,21%, da sensibilidade de 69,61% e da especifici-

Tabela 147: Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós T_1 , T_3 e T_5 no Circuito Butterworth usando o BA.

		Valores Obtidos										
		SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}
Valores Esperados	SF	696	50	50	41	40	17	14	17	43	26	6
	F_{R_1}	0	999	84	65	85	48	54	64	73	95	21
	F_{R_2}	0	86	983	28	65	47	53	65	34	26	15
	F_{R_3}	0	67	59	996	67	74	61	74	89	47	33
	F_{R_4}	1	99	90	53	999	64	82	93	48	74	41
	F_{R_5}	1	47	54	40	91	997	55	61	58	58	55
	F_{R_6}	1	49	47	53	68	62	999	89	55	71	41
	F_{R_7}	0	61	70	37	53	87	90	999	29	58	97
	F_{C_1}	0	66	63	94	72	58	50	54	998	49	50
	F_{C_2}	0	69	79	28	82	44	52	61	24	1000	28
	F_{C_3}	0	34	37	31	58	81	73	83	35	40	997

Tabela 148: Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós T_1 , T_3 e T_5 no Circuito Butterworth usando o BA.

	SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}	Global
A	98,12	92,54	93,56	93,62	91,88	93,25	93,14	92,39	93,60	93,81	94,74	93,33
P	69,60	62,91	70,11	63,56	60,77	65,72	65,08	63,19	64,22	68,17	67,87	65,41
S	99,57	61,40	60,83	67,94	59,46	63,14	63,11	60,18	67,16	64,77	72,04	64,29
E	98,05	95,99	97,15	96,16	95,60	96,47	96,36	96,03	96,25	96,84	96,84	96,41

Tabela 149: Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós T_1 , T_4 e T_5 no Circuito Butterworth usando o BA.

		Valores Obtidos										
		SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}
Valores Esperados	SF	650	57	53	45	52	28	26	20	38	26	5
	F_{R_1}	0	999	70	62	73	51	44	47	61	54	15
	F_{R_2}	1	68	998	50	71	42	38	67	50	78	20
	F_{R_3}	1	57	51	998	61	52	35	35	67	50	42
	F_{R_4}	1	58	61	44	999	47	38	42	44	72	28
	F_{R_5}	0	48	55	65	55	997	43	38	61	54	48
	F_{R_6}	0	44	32	39	37	29	999	48	42	39	26
	F_{R_7}	0	42	47	37	43	29	51	1000	36	43	28
	F_{C_1}	0	48	49	53	42	39	29	27	998	26	31
	F_{C_2}	0	49	50	36	45	49	46	49	36	998	29
	F_{C_3}	2	44	38	47	49	38	51	41	37	40	997

dade de 97,03%. Para o caso sem falhas, obteve-se os melhores resultados para a acurácia, sensibilidade e especificidade: 97,65%, 99,24% e 97,58%, respectivamente. O caso de falha no capacitor R_6 teve a melhor medida de precisão com 74,83%.

Tabela 150: Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós T_1 , T_4 e T_5 no Circuito Butterworth usando o BA.

	SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}	Global
A	97,65	93,43	93,44	93,85	93,63	94,24	95,12	94,90	94,60	94,24	95,64	94,41
P	65,00	67,68	67,30	68,88	69,67	68,10	74,83	73,75	74,37	71,95	72,04	71,21
S	99,24	65,98	66,36	67,62	65,42	71,16	71,36	70,72	67,89	67,43	78,57	69,61
E	97,58	96,49	96,44	96,69	96,80	96,59	97,55	97,40	97,48	97,15	97,20	97,03

Na Tabela 151 é apresentada a matriz de confusão para o circuito 2 utilizando a combinação dos nós T_2 , T_3 e T_4 . Na Tabela 152 são apresentados os valores das métricas de desempenho referentes a este caso.

Tabela 151: Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós T_2 , T_3 e T_4 no Circuito Butterworth usando o BA.

		Valores Obtidos										
		SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}
Valores Esperados	SF	756	28	29	17	37	14	42	36	21	12	8
	F_{R_1}	0	999	86	47	49	45	48	63	43	40	16
	F_{R_2}	0	83	1000	29	59	36	51	58	43	34	10
	F_{R_3}	25	67	40	881	96	81	92	67	77	42	94
	F_{R_4}	0	95	80	45	1000	59	74	98	44	95	41
	F_{R_5}	0	33	38	41	77	1000	51	56	32	35	60
	F_{R_6}	0	50	47	66	71	61	998	86	59	65	61
	F_{R_7}	0	28	26	21	45	61	81	1000	24	51	18
	F_{C_1}	0	29	25	75	43	61	49	58	994	31	49
	F_{C_2}	0	83	85	38	76	30	81	94	35	991	28
F_{C_3}	0	58	56	85	86	82	66	78	83	73	995	

Tabela 152: Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós T_2 , T_3 e T_4 no Circuito Butterworth usando o BA.

	SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}	Global
A	98,32	93,80	94,28	92,84	92,06	94,04	92,49	93,44	94,49	93,57	93,42	93,40
P	75,60	69,57	71,28	56,40	61,31	70,27	63,81	73,80	70,30	64,31	59,87	65,71
S	96,80	64,33	66,14	65,50	61,01	65,36	61,11	59,03	68,32	67,46	72,10	65,12
E	98,40	96,97	97,22	95,35	95,60	97,07	96,06	97,52	97,11	96,21	95,43	96,40

Quando é utilizada a combinação dos nós T_2 , T_3 e T_4 , observa-se os valores médios da acurácia de 93,40%, da precisão de 65,71%, da sensibilidade de 65,12% e da especificidade de 96,40%. Para o caso sem falhas, obteve-se os melhores resultados para a acurácia, precisão, sensibilidade e especificidade: 98,32%, 75,60%, 96,80% e 98,40%, respectivamente.

Na Tabela 153 é apresentada a matriz de confusão para o circuito 2 utilizando a combinação dos nós T_2 , T_3 e T_5 . Na Tabela 154 são apresentados os valores das métricas de desempenho referentes a este caso.

Tabela 153: Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós T_2 , T_3 e T_5 no Circuito Butterworth usando o BA.

		Valores Obtidos										
		SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}
Valores Esperados	SF	746	29	32	26	44	24	22	24	28	16	9
	F_{R_1}	0	1000	85	49	56	44	49	58	52	58	18
	F_{R_2}	0	89	1000	21	59	38	55	72	21	27	17
	F_{R_3}	5	63	70	982	61	80	41	38	90	50	65
	F_{R_4}	1	94	75	51	996	61	73	79	60	96	39
	F_{R_5}	0	37	44	70	75	1000	35	40	50	38	66
	F_{R_6}	1	71	83	89	93	61	999	84	91	95	40
	F_{R_7}	1	25	35	21	60	51	85	999	25	52	29
	F_{C_1}	0	60	63	97	75	46	43	35	998	49	56
	F_{C_2}	0	85	87	48	73	42	43	46	44	991	22
	F_{C_3}	0	62	60	88	81	83	38	38	83	64	998

Tabela 154: Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós T_2 , T_3 e T_5 no Circuito Butterworth usando o BA.

	SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}	Global
A	98,38	93,30	93,62	93,06	91,93	93,91	92,63	94,45	93,40	93,60	94,08	93,41
P	74,60	68,07	71,48	63,56	61,29	68,73	58,52	72,23	65,57	66,91	62,57	65,65
S	98,94	61,92	61,20	63,68	59,53	65,36	67,36	66,03	64,72	64,52	73,44	65,09
E	98,35	96,78	97,26	96,15	95,66	96,89	95,18	97,38	96,42	96,65	95,97	96,40

Quando é utilizada a combinação dos nós T_2 , T_3 e T_5 , observa-se os valores médios da acurácia de 93,41%, da precisão de 65,65%, da sensibilidade de 65,09% e da especificidade de 96,40%. Para o caso sem falhas, obteve-se os melhores resultados para a acurácia, precisão, sensibilidade e especificidade: 98,38%, 74,60%, 98,94% e 98,35%, respectivamente.

Na Tabela 155 é apresentada a matriz de confusão para o circuito 2 utilizando a combinação dos nós T_2 , T_4 e T_5 . Na Tabela 156 são apresentados os valores das métricas de desempenho referentes a este caso.

Quando é utilizada a combinação dos nós T_2 , T_4 e T_5 , observa-se os valores médios da acurácia de 94,46%, da precisão de 71,51%, da sensibilidade de 69,86% e da especificidade de 97,06%. Para o caso sem falhas, obteve-se os melhores resultados para a acurácia,

Tabela 155: Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós T_2 , T_4 e T_5 no Circuito Butterworth usando o BA.

		Valores Obtidos										
		SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}
Valores Esperados	SF	688	22	41	33	42	32	32	30	35	31	14
	F_{R_1}	0	1000	74	58	63	52	39	43	57	61	21
	F_{R_2}	0	70	1000	49	62	54	34	38	51	66	15
	F_{R_3}	0	49	35	1000	78	85	42	59	68	52	45
	F_{R_4}	2	65	63	41	998	52	39	41	48	71	27
	F_{R_5}	0	43	61	48	37	996	35	41	58	50	47
	F_{R_6}	0	36	39	41	48	35	999	44	31	26	27
	F_{R_7}	0	48	37	44	53	38	44	998	32	48	25
	F_{C_1}	0	51	46	61	39	37	35	31	996	31	28
	F_{C_2}	0	48	41	39	51	42	41	45	31	1000	27
	F_{C_3}	0	38	39	44	41	35	42	39	41	39	999

Tabela 156: Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós T_2 , T_4 e T_5 no Circuito Butterworth usando o BA.

	SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}	Global
A	97,91	93,77	93,92	93,55	93,60	94,14	95,28	94,82	94,61	94,42	95,79	94,46
P	68,80	68,12	69,49	66,09	68,97	70,34	75,34	73,01	73,51	73,26	73,62	71,51
S	99,71	68,03	67,75	68,59	66,01	68,31	72,29	70,83	68,78	67,80	78,35	69,86
E	97,83	96,55	96,77	96,23	96,68	96,91	97,61	97,30	97,36	97,31	97,40	97,06

sensibilidade e especificidade: 97,91%, 99,71% e 97,83%, respectivamente. O caso de falha no capacitor R_6 teve a melhor medida de precisão com 75,34%.

Na Tabela 157 é apresentada a matriz de confusão para o circuito 2 utilizando a combinação dos nós T_3 , T_4 e T_5 . Na Tabela 158 são apresentados os valores das métricas de desempenho referentes a este caso.

Quando é utilizada a combinação dos nós $T_3 - T_5$, observa-se os valores médios da acurácia de 94,52%, da precisão de 71,74%, da sensibilidade de 70,32% e da especificidade de 97,08%. Para o caso sem falhas, obteve-se os melhores resultados para a acurácia, sensibilidade e especificidade: 97,87%, 99,85% e 97,77%, respectivamente. O caso de falha no resistor R_6 teve a melhor medida de precisão com 75,34%.

Na Tabela 159 é apresentada a matriz de confusão para o circuito 2 utilizando a combinação dos nós $T_1 - T_4$. Na Tabela 160 são apresentados os valores das métricas de desempenho referentes a este caso.

Quando é utilizada a combinação dos nós $T_1 - T_4$, observa-se os valores médios da acurácia de 93,97%, da precisão de 68,81%, da sensibilidade de 67,96% e da especificidade

Tabela 157: Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós $T_3 - T_5$ no Circuito Butterworth usando o BA.

		Valores Obtidos										
		SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}
Valores Esperados	SF	682	40	41	45	36	28	20	25	45	25	13
	F_{R_1}	0	1000	61	43	58	47	41	48	53	62	18
	F_{R_2}	1	72	996	70	61	35	48	41	68	81	16
	F_{R_3}	0	48	51	1000	52	47	29	38	68	47	49
	F_{R_4}	0	57	58	43	1000	44	41	38	49	78	30
	F_{R_5}	0	47	58	51	41	998	28	36	59	48	41
	F_{R_6}	0	41	46	53	40	28	999	42	31	25	21
	F_{R_7}	0	41	45	45	49	31	43	999	35	42	26
	F_{C_1}	0	49	51	59	41	38	36	29	995	27	33
	F_{C_2}	0	43	48	35	48	41	44	39	37	999	25
	F_{C_3}	0	36	42	46	47	39	47	37	40	44	998

Tabela 158: Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós $T_3 - T_5$ no Circuito Butterworth usando o BA.

	SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}	Global
A	97,87	93,95	93,36	93,86	93,91	94,74	95,30	95,12	94,33	94,40	95,66	94,52
P	68,20	69,88	66,89	69,98	69,54	70,93	75,34	73,67	73,27	73,51	72,53	71,74
S	99,85	67,84	66,53	67,11	67,89	72,53	72,60	72,81	67,23	67,59	78,58	70,32
E	97,77	96,81	96,34	96,82	96,75	96,99	97,59	97,37	97,31	97,33	97,24	97,08

Tabela 159: Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós $T_1 - T_4$ no Circuito Butterworth usando o BA.

		Valores Obtidos										
		SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}
Valores Esperados	SF	781	28	17	23	20	13	41	43	17	11	6
	F_{R_1}	0	999	87	35	56	37	36	60	46	32	19
	F_{R_2}	0	84	1000	30	60	36	49	54	19	27	14
	F_{R_3}	6	60	47	945	89	78	90	67	78	38	85
	F_{R_4}	0	98	80	45	1000	48	79	96	44	95	33
	F_{R_5}	0	33	29	31	68	1000	48	51	29	35	62
	F_{R_6}	0	54	52	70	59	60	997	88	67	57	65
	F_{R_7}	0	20	29	23	47	30	88	999	23	42	47
	F_{C_1}	0	22	30	97	51	37	50	54	1000	20	26
	F_{C_2}	0	24	36	20	49	26	76	83	13	1000	16
	F_{C_3}	0	43	38	30	61	80	62	62	34	47	1000

de 96,73%. Para o caso sem falhas, obteve-se os melhores resultados para a acurácia, precisão, sensibilidade e especificidade: 98,55%, 78,10%, 99,24% e 98,51%, respectivamente.

Tabela 160: Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós $T_1 - T_4$ no Circuito Butterworth usando o BA.

	SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}	Global
A	98,55	94,35	94,71	93,26	92,39	94,63	92,30	93,49	95,11	95,17	94,64	93,97
P	78,10	71,00	72,83	59,70	61,80	72,15	63,54	74,11	72,10	74,46	68,63	68,81
S	99,24	68,19	69,20	70,05	64,10	69,20	61,70	60,29	72,99	71,23	72,83	67,96
E	98,51	97,09	97,34	95,48	95,56	97,25	95,87	97,47	97,26	97,56	96,76	96,73

Na Tabela 161 é apresentada a matriz de confusão para o circuito 2 utilizando a combinação dos nós $T_1 - T_3$ e T_5 . Na Tabela 162 são apresentados os valores das métricas de desempenho referentes a este caso.

Tabela 161: Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós $T_1 - T_3$ e T_5 no Circuito Butterworth usando o BA.

		Valores Obtidos										
		SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}
Valores Esperados	SF	747	27	34	36	36	24	27	24	27	13	5
	F_{R_1}	0	1000	86	48	65	50	47	35	49	50	19
	F_{R_2}	0	87	1000	42	73	45	38	51	39	55	17
	F_{R_3}	0	66	50	960	87	62	47	47	82	42	83
	F_{R_4}	0	87	79	47	999	53	37	55	39	94	27
	F_{R_5}	0	40	39	46	84	997	32	29	40	50	71
	F_{R_6}	0	68	81	74	82	55	1000	81	83	67	37
	F_{R_7}	0	58	32	25	45	33	91	1000	59	55	21
	F_{C_1}	0	28	40	95	57	48	63	65	987	28	12
	F_{C_2}	0	27	32	16	74	59	89	87	19	991	22
F_{C_3}	0	37	31	24	66	88	81	88	34	47	993	

Tabela 162: Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós $T_1 - T_3$ e T_5 no Circuito Butterworth usando o BA.

	SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}	Global
A	98,39	93,81	93,96	93,53	92,46	93,98	92,50	93,77	94,24	94,12	94,85	93,71
P	74,70	69,01	69,11	62,91	65,85	69,82	61,43	70,47	69,36	69,99	66,69	67,29
S	100,00	65,57	66,49	67,94	59,89	65,85	64,43	64,02	67,70	66,42	75,98	66,52
E	98,31	96,84	96,86	96,05	96,32	96,97	95,57	97,05	96,95	97,02	96,56	96,59

Quando é utilizada a combinação dos nós $T_1 - T_3$ e T_5 , observa-se os valores médios da acurácia de 93,71%, da precisão de 67,29%, da sensibilidade de 66,52% e da especificidade de 96,59%. Para o caso sem falhas, obteve-se os melhores resultados para

a acurácia, precisão, sensibilidade e especificidade: 98,39%, 74,70%, 100,00% e 98,31%, respectivamente.

Na Tabela 163 é apresentada a matriz de confusão para o circuito 2 utilizando a combinação dos nós T_1 , T_2 , T_4 e T_5 . Na Tabela 164 são apresentados os valores das métricas de desempenho referentes a este caso.

Tabela 163: Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós T_1 , T_2 , T_4 e T_5 no Circuito Butterworth usando o BA.

		Valores Obtidos										
		SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}
Valores Esperados	SF	749	26	27	25	52	32	23	23	21	17	5
	F_{R_1}	0	1000	85	39	58	47	39	47	51	60	21
	F_{R_2}	0	84	989	46	75	47	43	55	39	73	11
	F_{R_3}	0	64	64	991	63	33	53	60	95	31	26
	F_{R_4}	1	74	79	51	999	48	25	33	47	94	22
	F_{R_5}	1	39	42	38	85	999	41	38	40	57	79
	F_{R_6}	1	75	72	83	83	57	998	91	85	68	35
	F_{R_7}	0	42	34	28	59	44	88	996	21	92	26
	F_{C_1}	3	35	51	95	71	57	33	44	991	58	23
	F_{C_2}	0	33	34	25	83	62	76	87	28	997	23
F_{C_3}	0	47	56	54	94	89	46	50	49	72	994	

Tabela 164: Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós T_1 , T_2 , T_4 e T_5 no Circuito Butterworth usando o BA.

	SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}	Global
A	98,38	93,91	93,59	93,86	92,45	93,85	92,96	93,93	94,03	93,23	94,78	93,63
P	74,90	69,11	67,65	66,96	67,82	68,47	60,56	69,65	67,83	68,85	64,09	66,88
S	99,21	65,83	64,51	67,19	58,01	65,94	68,12	65,35	67,55	61,58	78,58	66,32
E	98,34	96,88	96,70	96,60	96,65	96,79	95,48	96,97	96,73	96,83	96,18	96,55

Quando é utilizada a combinação dos nós T_1 , T_2 , T_4 e T_5 , observa-se os valores médios da acurácia de 93,63%, da precisão de 66,88%, da sensibilidade de 66,32% e da especificidade de 96,55%. Para o caso sem falhas, obteve-se os melhores resultados para a acurácia, precisão, sensibilidade e especificidade: 98,38%, 74,90%, 99,21% e 98,34%, respectivamente.

Na Tabela 165 é apresentada a matriz de confusão para o circuito 2 utilizando a combinação dos nós T_1 , $T_3 - T_5$. Na Tabela 166 são apresentados os valores das métricas de desempenho referentes a este caso.

Tabela 165: Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós $T_1, T_3 - T_5$ no Circuito Butterworth usando o BA.

		Valores Obtidos										
		SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}
Valores Esperados	SF	779	25	23	22	33	19	17	19	36	16	11
	F_{R_1}	0	1000	71	49	67	49	42	37	51	74	11
	F_{R_2}	3	68	991	41	72	41	37	43	51	81	15
	F_{R_3}	0	36	51	1000	48	27	48	33	58	51	48
	F_{R_4}	1	53	64	28	998	32	29	31	33	58	27
	F_{R_5}	1	42	51	48	59	998	28	23	45	47	51
	F_{R_6}	0	44	35	46	41	28	998	49	45	31	15
	F_{R_7}	0	26	28	34	27	19	45	998	29	31	15
	F_{C_1}	2	32	39	46	40	26	24	19	996	22	25
	F_{C_2}	0	38	41	19	38	18	30	32	24	997	18
	F_{C_3}	1	36	32	40	38	35	29	31	40	35	998

Tabela 166: Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós $T_1, T_3 - T_5$ no Circuito Butterworth usando o BA.

	SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}	Global
A	98,42	94,12	93,87	94,66	94,34	95,24	95,42	96,05	95,25	95,13	96,18	95,13
P	77,90	68,92	68,68	71,43	73,71	71,64	74,92	79,71	78,36	79,44	75,89	74,87
S	98,98	71,43	69,50	72,83	68,31	77,24	75,21	75,89	70,74	69,09	80,88	73,30
E	98,38	96,55	96,53	96,94	97,26	97,00	97,46	98,07	97,89	98,02	97,60	97,42

Quando é utilizada a combinação dos nós T_1 e $T_3 - T_5$, observa-se os valores médios da acurácia de 95,13%, da precisão de 74,87%, da sensibilidade de 73,30% e da especificidade de 97,42%. Para o caso sem falhas, obteve-se os melhores resultados para a acurácia, sensibilidade e especificidade: 98,42%, 98,98% e 98,38%, respectivamente. O caso de falha no resistor R_7 teve a melhor medida de precisão com 79,71%.

Na Tabela 167 é apresentada a matriz de confusão para o circuito 2 utilizando a combinação dos nós $T_2 - T_5$. Na Tabela 168 são apresentados os valores das métricas de desempenho referentes a este caso.

Quando é utilizada a combinação dos nós $T_2 - T_5$, observa-se os valores médios da acurácia de 95,33%, da precisão de 75,57%, da sensibilidade de 74,60% e da especificidade de 97,49%. Para o caso sem falhas, obteve-se os melhores resultados para a acurácia, precisão, sensibilidade e especificidade: 98,71%, 82,00%, 99,51% e 98,66%, respectivamente.

Na Tabela 169 é apresentada a matriz de confusão para o circuito 2 utilizando a combinação dos nós $T_1 - T_5$. Na Tabela 170 são apresentados os valores das métricas de desempenho referentes a este caso.

Tabela 167: Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós $T_2 - T_5$ no Circuito Butterworth usando o BA.

		Valores Obtidos										
		SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}
Valores Esperados	SF	820	17	21	13	29	17	12	24	29	11	7
	F_{R_1}	0	1000	67	49	51	39	37	35	47	42	15
	F_{R_2}	0	69	1000	38	61	33	24	38	35	48	12
	F_{R_3}	1	38	42	998	43	54	41	37	61	48	49
	F_{R_4}	0	55	61	32	1000	40	27	30	32	51	22
	F_{R_5}	2	44	48	41	53	997	27	25	41	51	43
	F_{R_6}	1	41	39	36	47	38	998	48	47	37	18
	F_{R_7}	0	31	35	24	23	27	48	1000	21	25	17
	F_{C_1}	0	36	34	47	31	29	21	24	998	26	22
	F_{C_2}	0	35	42	25	34	21	31	27	21	996	17
	F_{C_3}	0	34	28	35	37	41	28	25	42	31	996

Tabela 168: Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós $T_2 - T_5$ no Circuito Butterworth usando o BA.

	SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}	Global
A	98,71	94,53	94,58	94,72	94,69	95,00	95,47	96,05	95,48	95,64	96,34	95,33
P	82,00	72,36	73,64	70,68	74,07	72,67	73,93	79,94	78,71	79,74	76,79	75,57
S	99,51	71,43	70,57	74,59	70,97	74,63	77,13	76,16	72,63	72,91	81,77	74,60
E	98,66	97,04	97,22	96,80	97,28	97,10	97,29	98,07	97,91	98,04	97,70	97,49

Tabela 169: Matriz de confusão dos resultados na combinação dos nós $T_1 - T_5$ no Circuito Butterworth usando o BA.

		Valores Obtidos										
		SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}
Valores Esperados	SF	874	10	15	9	19	14	15	21	12	8	3
	F_{R_1}	0	1000	47	41	58	38	29	27	32	46	12
	F_{R_2}	0	68	999	35	72	28	24	33	27	47	11
	F_{R_3}	1	35	27	998	48	42	27	28	51	37	45
	F_{R_4}	0	44	42	31	999	25	38	32	37	51	24
	F_{R_5}	0	31	38	33	51	999	18	25	31	28	38
	F_{R_6}	0	34	29	41	45	33	1000	42	36	29	12
	F_{R_7}	0	29	31	19	25	26	43	999	21	27	11
	F_{C_1}	3	27	35	41	29	20	26	15	996	18	19
	F_{C_2}	0	26	32	11	29	14	28	25	16	1000	12
	F_{C_3}	1	28	24	34	27	33	17	19	24	21	999

Quando é utilizada a combinação dos nós $T_1 - T_5$, observa-se os valores médios da acurácia de 95,90%, da precisão de 78,44%, da sensibilidade de 77,64% e da especificidade de 97,79%. Para o caso sem falhas, obteve-se os melhores resultados para a

Tabela 170: Resultados referentes às métricas consideradas para a combinação dos nós $T_1 - T_5$ no Circuito Butterworth usando o BA.

	SF	F_{R_1}	F_{R_2}	F_{R_3}	F_{R_4}	F_{R_5}	F_{R_6}	F_{R_7}	F_{C_1}	F_{C_2}	F_{C_3}	Global
A	99,05	95,21	95,18	95,39	94,74	95,90	95,90	96,39	96,23	96,34	96,99	95,90
P	87,40	75,19	74,33	74,53	75,51	77,32	76,86	81,15	81,04	83,82	81,42	78,44
S	99,43	75,08	75,74	77,18	71,26	78,54	79,05	78,91	77,63	76,22	84,23	77,64
E	99,03	97,36	97,24	97,28	97,39	97,66	97,60	98,15	98,14	98,46	98,19	97,79

acurácia, precisão, sensibilidade e especificidade com 99,05%, 87,40%, 99,43% e 99,03%, respectivamente.

As Figuras 21 – 24 permite a comparação das métricas globais de desempenho analisando os nós acessíveis do circuito e suas combinações.

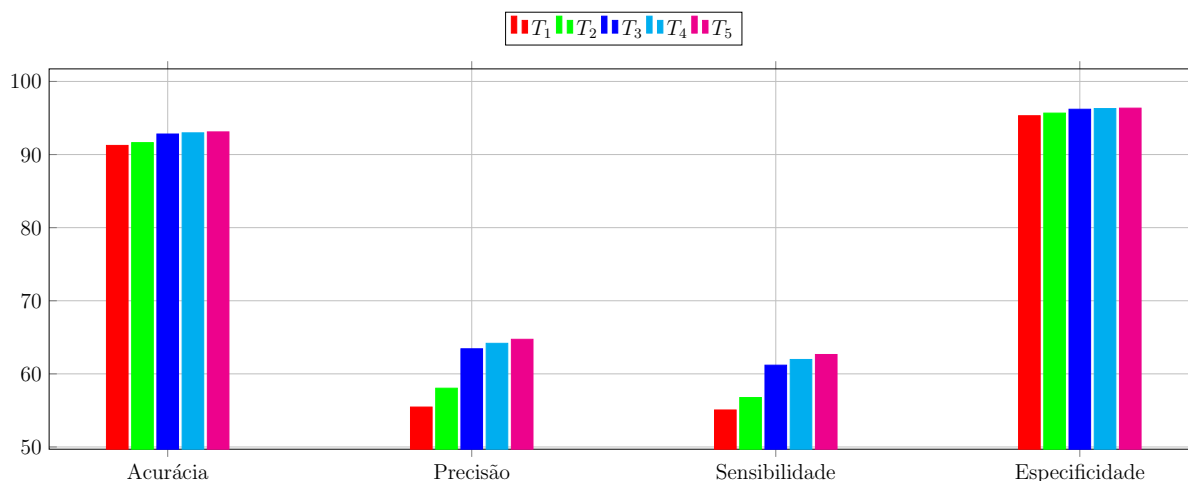


Figura 21: Métricas de avaliação do Circuito Butterworth usando o BA analisando os nós individualmente.

A partir do gráfico da Figura 25, observa-se que com o incremento da utilização dos nós acessíveis na análise do circuito há uma melhora nos valores das métricas consideradas. Observa-se que a configuração com melhor desempenho é a que considera os cinco nós acessíveis no cálculo da otimização, principalmente quando se leva em consideração as métricas de precisão e de sensibilidade.

5.4.3 Desempenho do BA

O desempenho do BA é avaliado baseando-se os valores das métricas definidas e comparando os dois estudos de caso desenvolvidos nesta dissertação. Os parâmetros utilizados para a técnica do PSO nos dois circuitos estudados são os mesmos utilizados para o BA.

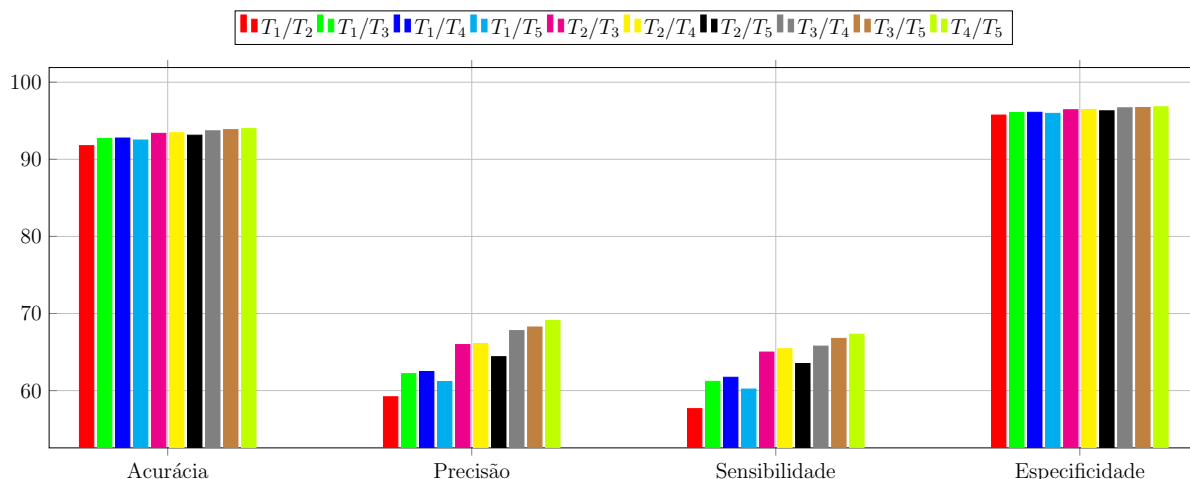


Figura 22: Métricas de avaliação do Circuito Butterworth usando o BA analisando 2 nós combinados.

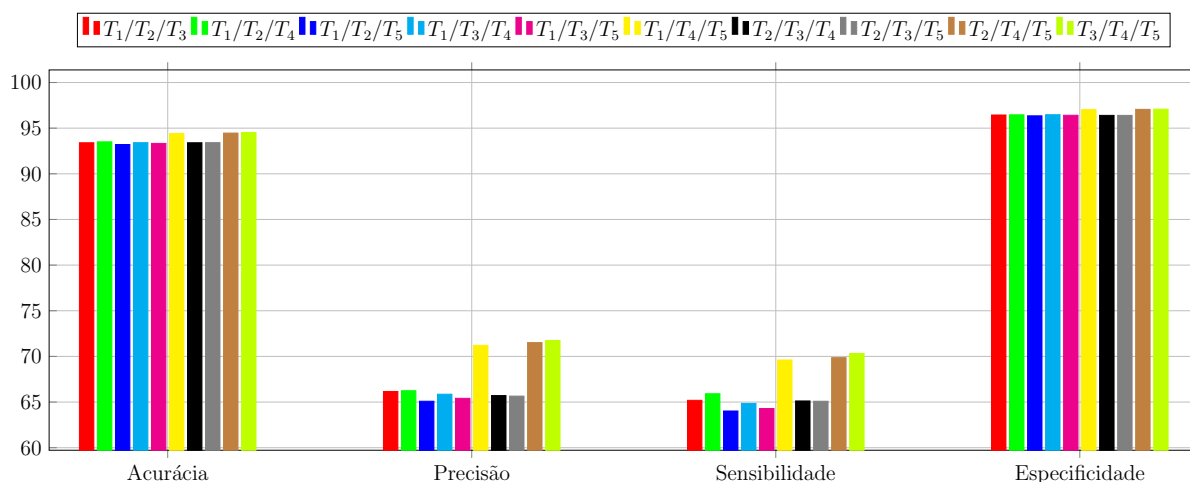


Figura 23: Métricas de avaliação do Circuito Butterworth usando o BA analisando 3 nós combinados.

Entre um circuito e outro há diferença na quantidade de componentes possíveis de apresentar falhas, onde no primeiro circuito há oito componentes enquanto que no segundo são são, e a quantidade de nós acessíveis, sendo três nós para o primeiro circuito e cinco nós para o segundo.

A Tabela 171 apresenta as médias das métricas de avaliação em relação ao incremento do uso dos nós acessíveis dos circuitos, utilizando como base as Tabelas 14 e 30. Os valores foram obtidos a partir das médias aritméticas das métricas considerando o número de nós utilizados em todos os casos.

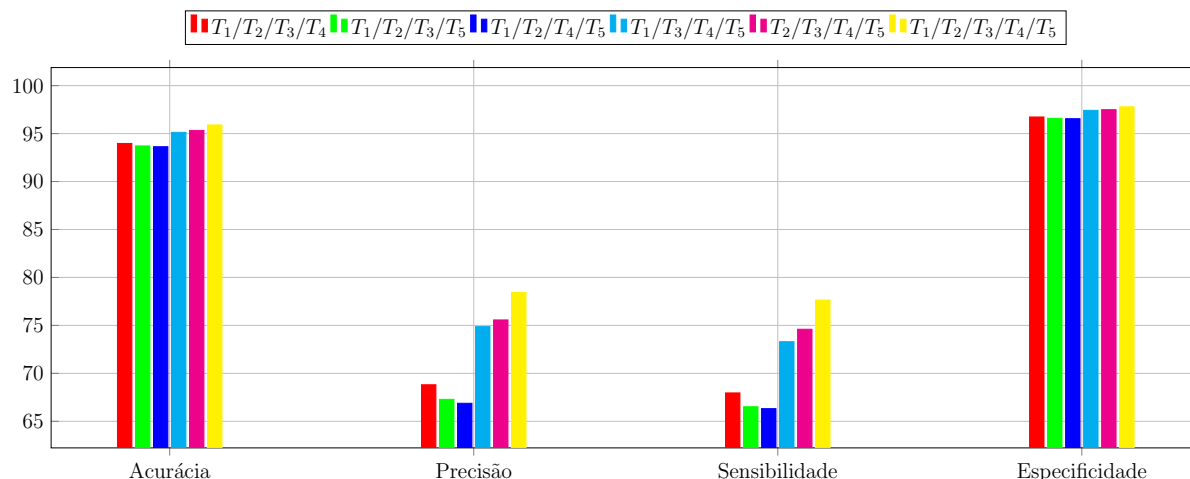


Figura 24: Métricas de avaliação do Circuito Butterworth usando o BA analisando 4 e 5 nós combinados.

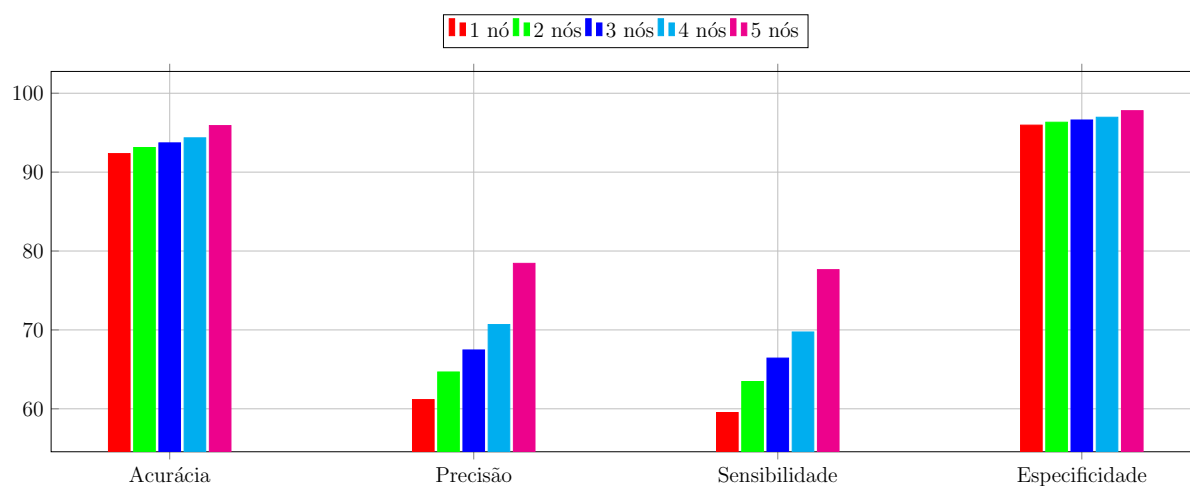


Figura 25: Métricas de avaliação do Circuito Butterworth usando o BA analisando os nós individualmente.

Tabela 171: Métricas de avaliação pela quantidade de nós acessíveis usando BA.

		Número de nós acessíveis				
		1	2	3	4	5
Circuito 1	A	92,38	94,22	95,84	-	-
	P	65,63	74,06	81,45	-	-
	S	68,11	75,54	82,16	-	-
	E	95,71	96,74	97,66	-	-
Circuito 2	A	92,35	93,12	93,71	94,35	95,90
	P	61,17	64,67	67,46	70,68	78,44
	S	59,53	63,46	66,43	69,74	77,64
	E	95,96	96,33	96,61	96,96	97,79

Na Figura 26 são apresentadas, graficamente, as métricas globais de desempenho analisando a quantidade de nós que estão sendo analisados, a partir dos dados numéricos apresentados na Tabela 171.

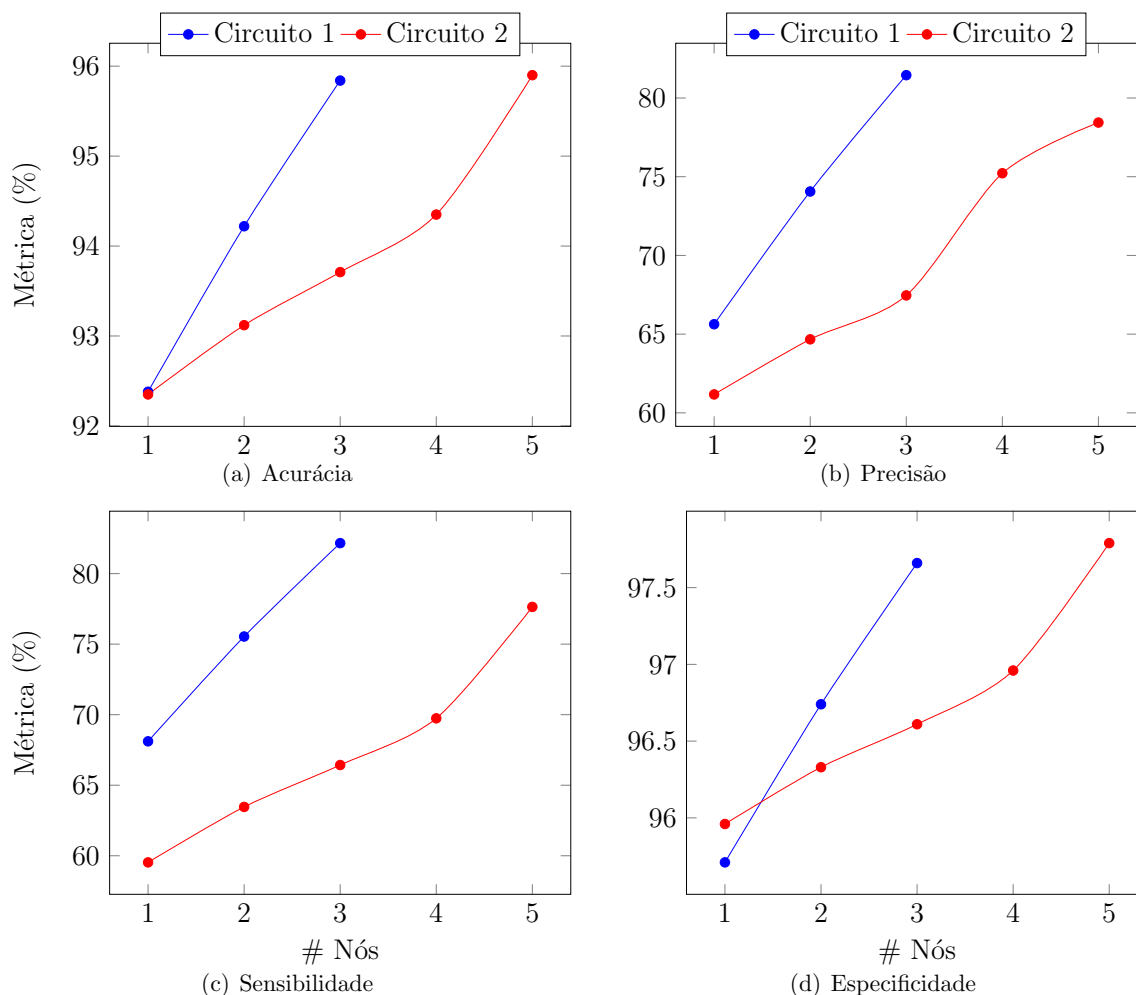


Figura 26: Comparação das métricas de avaliação dos circuitos usando BA variando a quantidade de nós.

Observa-se que, com o incremento dos usos das combinações dos nós, há um aumento no valor das métricas de avaliação analisadas nesta dissertação. Observa-se na Figura 26 que todas as métricas apresentaram similaridade nas curvas de aumento. O destaque deste aumento é com relação a precisão e a sensibilidade em ambos os circuitos, conforme Figura 5.26(b).

No caso do circuito 1, a métrica de precisão teve um aumento de 15,82% ao comparar o experimento em que foram usados três nós com o experimento utilizando um nó individualmente. Na sensibilidade, o aumento foi de 14,05% no valor da métrica utilizando os três nós combinados em relação a utilização de um nó individual.

Para o circuito 2, o aumento da métrica de precisão foi de 17,27% entre as análises utilizando a combinação dos cinco nós em relação a um nó individualmente. Enquanto que para a sensibilidade, o aumento foi de 18,11% da utilização dos cinco nós combinados em relação ao uso individual dos nós.

5.5 Comparação de Desempenho: PSO vs. BA

Nesta seção é realizada uma comparação do desempenho das duas técnicas de otimização utilizadas neste projeto. A comparação do desempenho será observada através dos valores médios obtidos para cada métrica de avaliação observada, por circuito, pela quantidade de nós e pelo tempo de execução das implementações

5.5.1 Por circuito

Os valores das métricas foram obtidos através da média aritmética de todas as F_{A_i} por nó do circuito. A Figura 27 apresenta a comparação dos dados obtidos para o circuito 1, utilizando os nós individualmente conforme Tabela 14. Observa-se que, comparando nó a nó, houve uma melhora no desempenho quando o BA é utilizado em relação ao PSO. Nota-se que a utilização do BA no nó T_3 apresentou melhores métricas em relação aos outros nós e outra técnica utilizada.

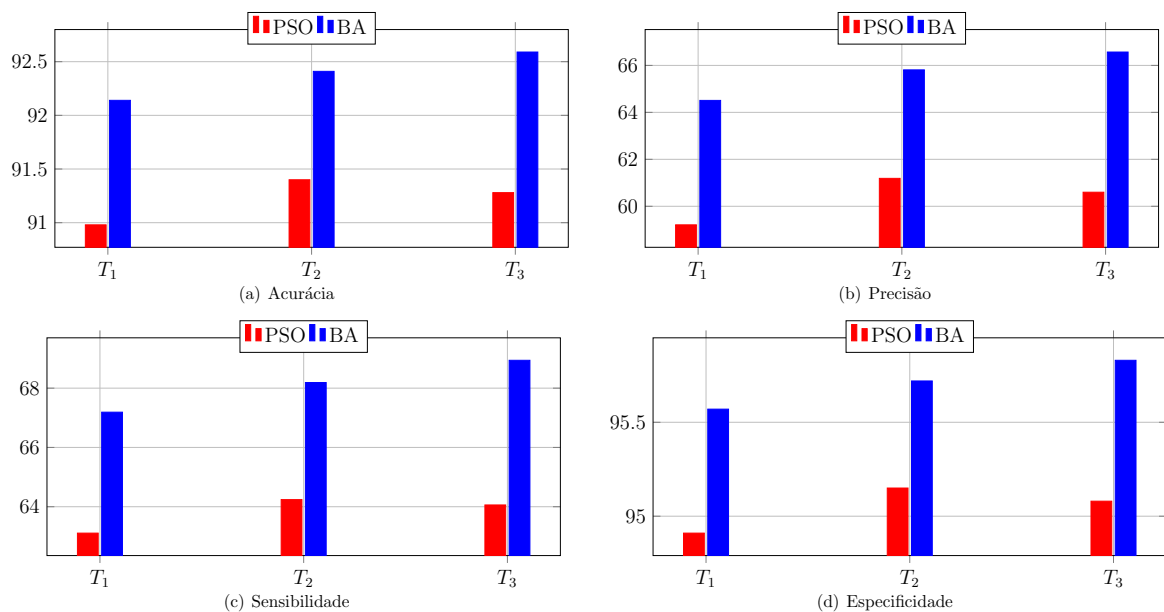


Figura 27: Comparação das métricas do circuito 1 utilizando os nós individuais.

A Figura 28 apresenta a comparação dos dados obtidos para o circuito 1, utilizando as combinações de dois nós conforme Tabela 14. Observa-se que, comparando as combinações de dois nós, houve uma melhora no desempenho quando o BA é utilizado em relação ao PSO. Nota-se que a utilização do BA na combinação dos nós T_2 e T_3 apresentou melhores métricas em relação às outras combinações de nós e técnica utilizada.

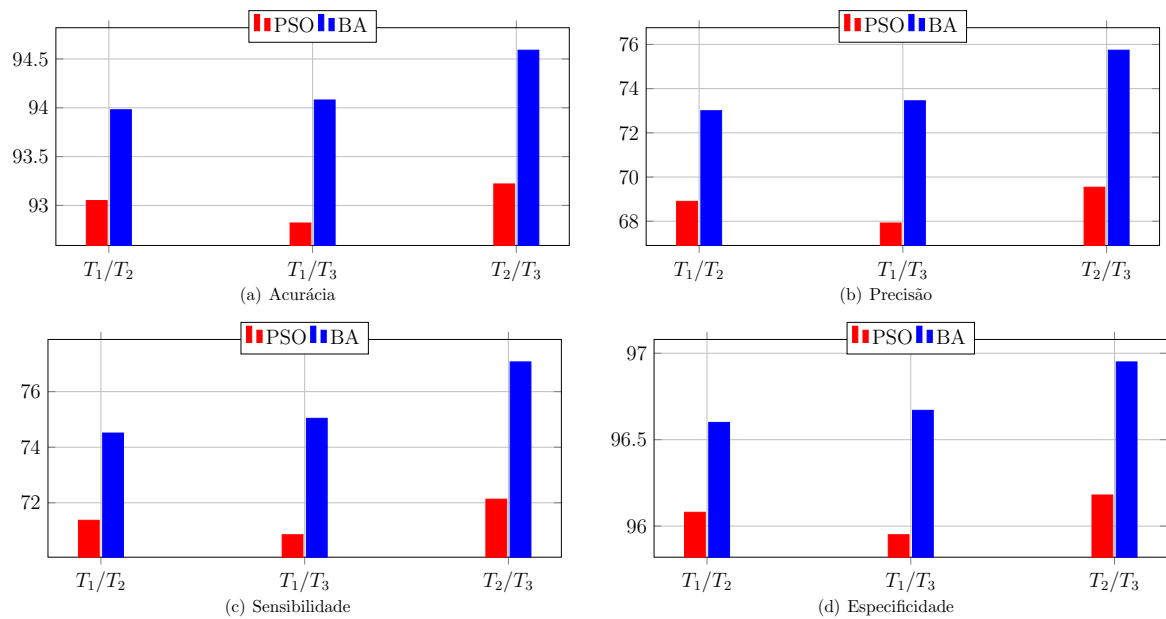


Figura 28: Comparação das métricas do circuito 1 utilizando a combinação de dois nós.

A Figura 29 apresenta a comparação dos dados obtidos para o circuito 1, utilizando as combinações dos três nós conforme Tabela 14. Observa-se que, para a combinação dos três nós, houve uma melhora no desempenho quando o BA é utilizado em relação ao PSO.

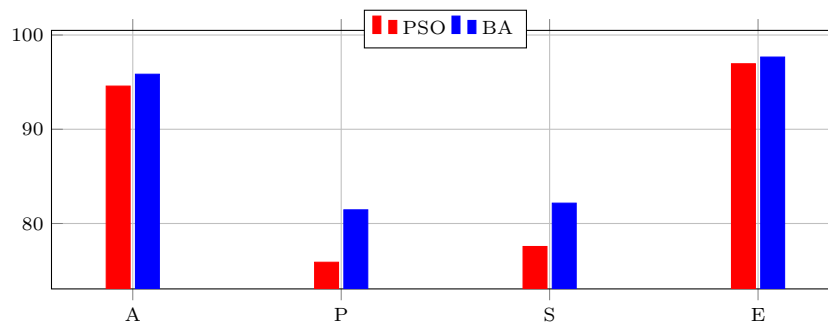


Figura 29: Comparação das métricas do circuito 1 utilizando a combinação dos três nós.

A Figura 30 apresenta a comparação das melhores métricas analisadas do circuito 1 utilizando a técnica do BA com um nó individualmente (T_3), com a combinação de

dois nós (T_2/T_3) e com a combinação dos três nós. Constatou-se que o melhor desempenho no circuito 1 para as métricas consideradas se deu com a utilização da técnica do BA utilizando a combinação dos três nós acessíveis, cujos valores de acurácia, precisão, sensibilidade e especificidade são: 95,84%, 81,45%, 82,16% e 97,66%, respectivamente.

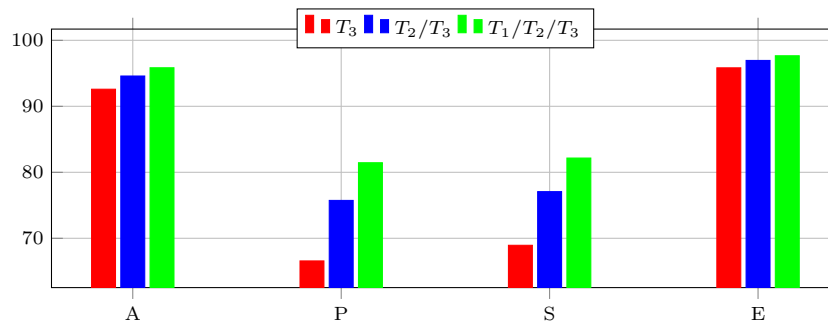


Figura 30: Comparação das métricas de avaliação do circuito 1 usando o BA.

A Figura 31 apresenta a comparação dos dados obtidos para o circuito 2, utilizando os nós individualmente conforme Tabela 30. Observa-se que, comparando nó a nó, houve uma melhora no desempenho quando o BA é utilizado em relação ao PSO. Nota-se que a utilização do BA no nó T_5 apresentou melhores métricas em relação aos outros nós e técnica utilizada.

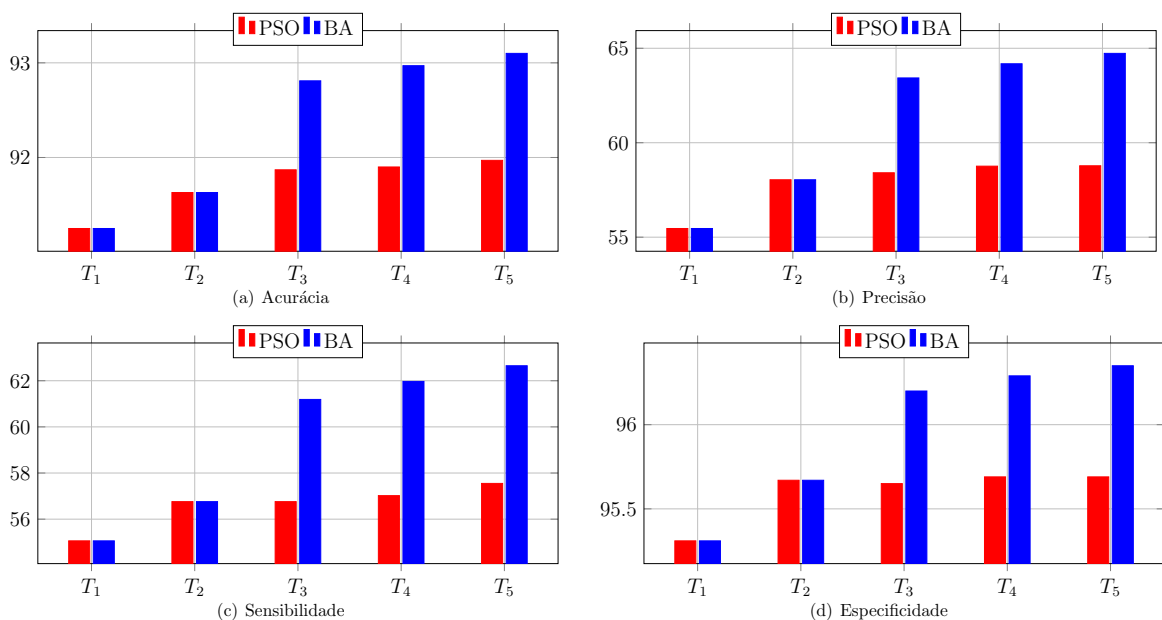


Figura 31: Comparação das métricas do circuito 2 utilizando os nós individuais.

A Figura 32 apresenta a comparação dos dados obtidos para o circuito 2, utilizando as combinações de dois nós. Observa-se que, comparando as combinações de dois nós, houve uma melhora no desempenho quando o BA é utilizado em relação ao PSO. Nota-se

que a utilização do BA na combinação dos nós T_4 e T_5 apresentou melhores métricas em relação às outras combinações de nós e técnica utilizada. Com relação ao PSO, o melhor desempenho foi obtido utilizando os nós T_2 e T_4 combinados.

A Figura 33 apresenta a comparação dos dados obtidos para o circuito 2, utilizando as combinações de três nós. Observa-se que, comparando as combinações de três nós, houve uma melhora no desempenho quando o BA é utilizado em relação ao PSO. Nota-se que a utilização do BA na combinação dos nós T_3 , T_4 e T_5 apresentou melhores métricas em relação às outras combinações de nós e técnica utilizada. Com relação ao PSO, o melhor desempenho foi obtido utilizando os nós T_2 , T_4 e T_5 combinados.

A Figura 34 apresenta a comparação dos dados obtidos para o circuito 2, utilizando as combinações de quatro nós. Observa-se que, comparando as combinações de quatro nós, houve uma melhora no desempenho quando o BA é utilizado em relação ao PSO. Nota-se que a utilização do BA na combinação dos nós $T_2 - T_5$ apresentou melhores métricas em relação às outras combinações de nós e técnica utilizada.

A Figura 35 apresenta a comparação dos dados obtidos para o circuito 2, utilizando a combinação dos cinco nós. Observa-se que, para a combinação dos cinco nós, houve uma melhora no desempenho quando o BA é utilizado em relação ao PSO.

A Figura 36 apresenta a comparação das melhores métricas analisadas do circuito 2 utilizando a técnica do BA com um nó individualmente (T_5), com a combinação de dois nós (T_4/T_5), com a combinação de três nós ($T_3/T_4/T_5$), com a combinação de quatro nós ($T_2/T_3/T_4/T_5$), e com a combinação dos cinco nós.

Constatou-se que o melhor desempenho no circuito 2 para as métricas consideradas se deu com a utilização da técnica do BA utilizando a combinação dos cinco nós acessíveis, cujos valores de acurácia, precisão, sensibilidade e especificidade são: 95,90%, 78,44%, 77,64% e 97,79%, respectivamente.

5.5.2 Pelo número de nós

Os valores das métricas para comparação pela quantidade de nós foram obtidos através da média aritmética das métricas obtidas no circuito 1 quando utilizado os nós individualmente, a combinação de dois nós e a combinação dos três nós. Para o caso do circuito 2, quando utilizado os nós individualmente, a combinação de dois nós, a combinação de três nós, a combinação de quatro nós e a combinação dos cinco nós.

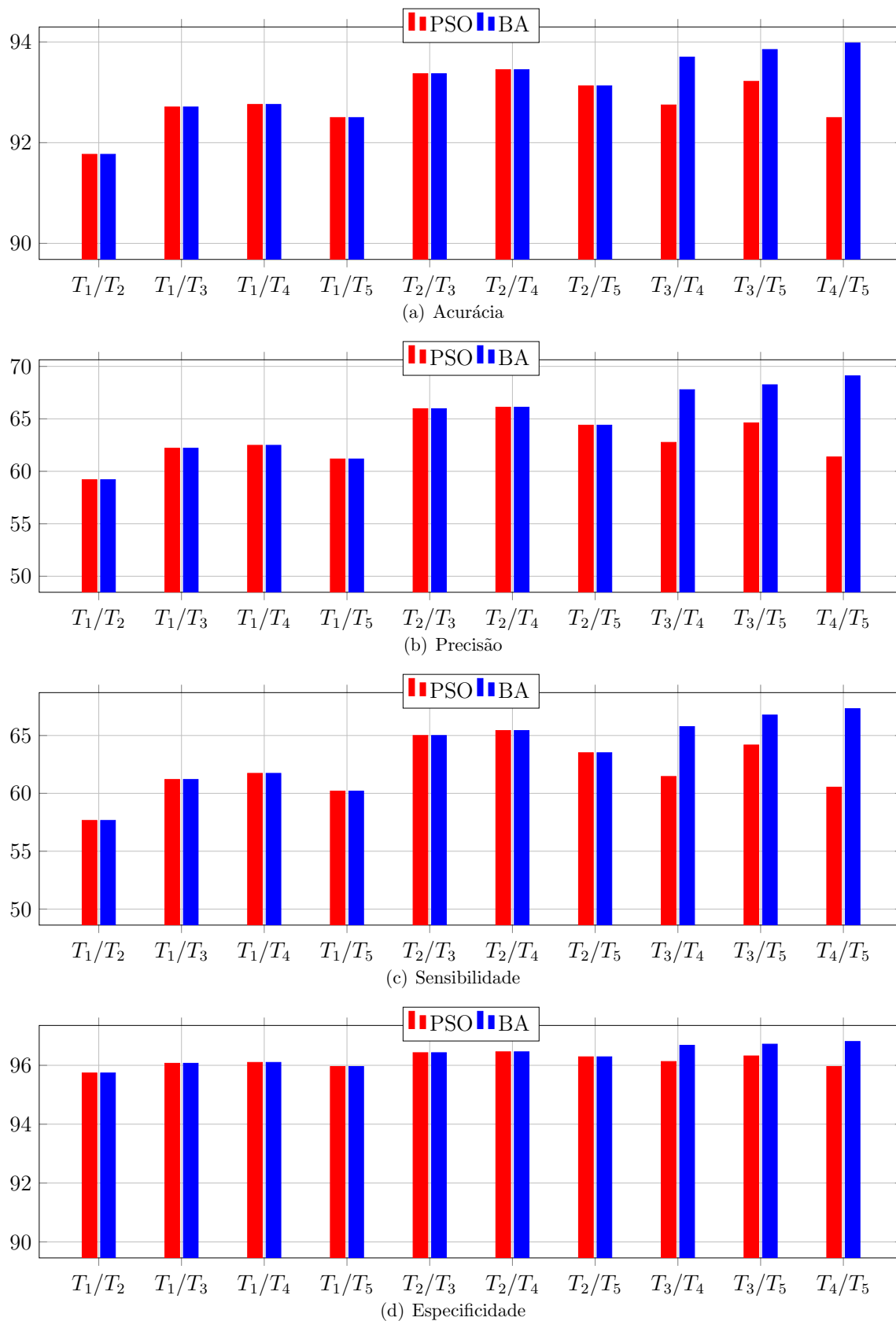


Figura 32: Comparação das métricas do circuito 2 utilizando a combinação de dois nós.

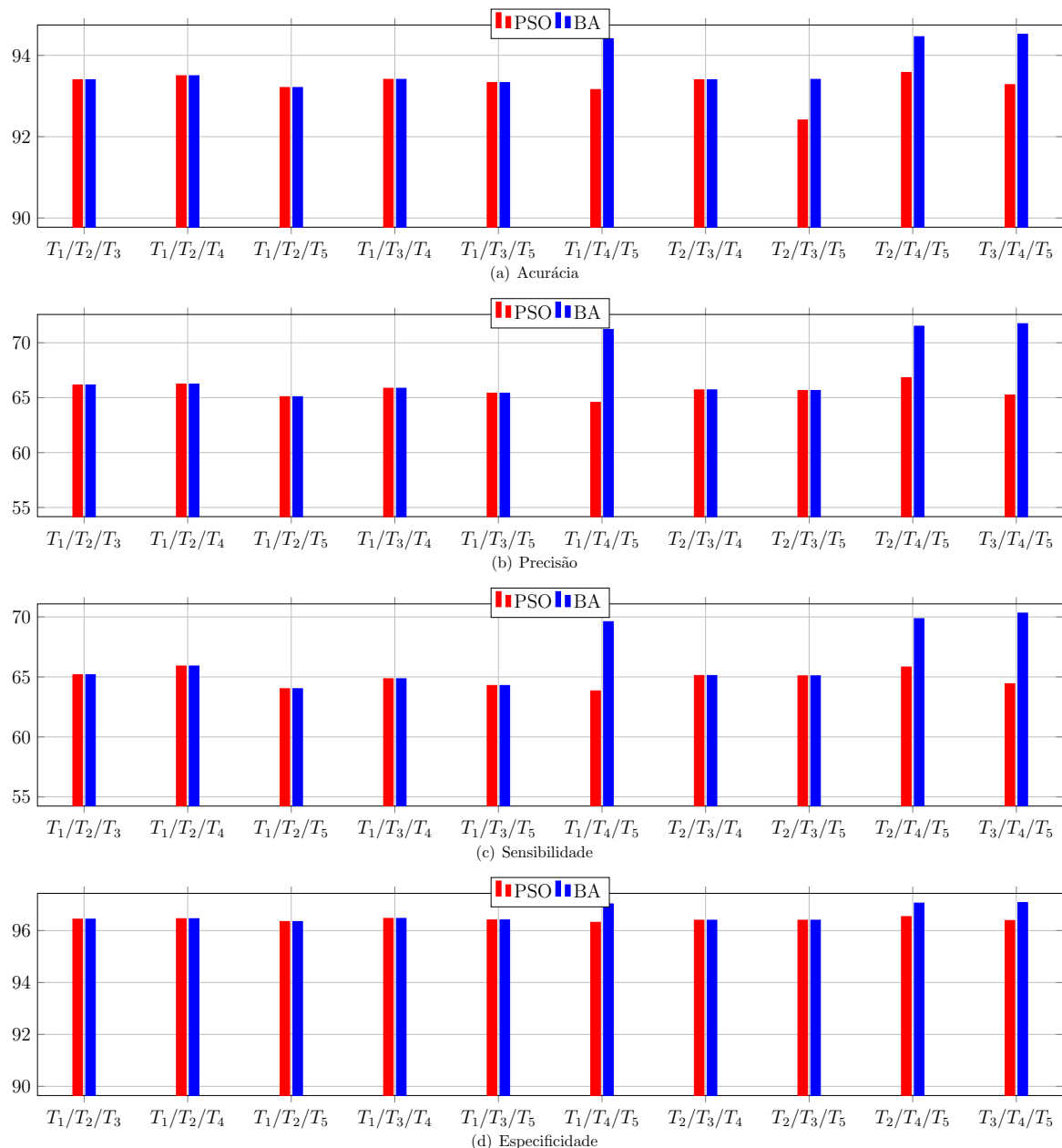


Figura 33: Comparação das métricas do circuito 2 utilizando a combinação de três nós.

A Tabela 172 apresenta a comparação dos dados obtidos para o circuito 1 pelo quantitativo de nós utilizados.

Tabela 172: Comparação das métricas de avaliação do circuito 1.

		1 nó		2 nós		3 nós	
		PSO	BA	PSO	BA	PSO	BA
Métricas avaliadas	A	91,22	92,38	93,03	94,22	94,58	95,84
	P	60,33	65,63	68,79	74,06	75,89	81,45
	S	63,80	68,11	71,45	75,54	77,56	82,16
	E	95,05	95,71	96,07	96,74	96,95	97,66

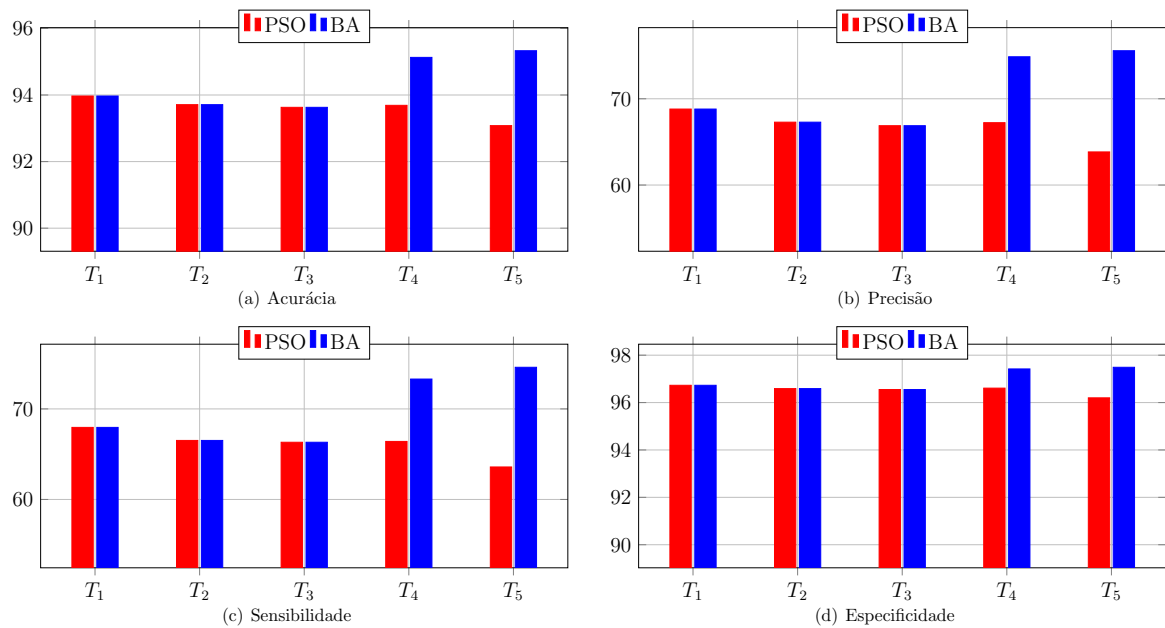


Figura 34: Comparação das métricas do circuito 2 utilizando a combinação de quatro nós.

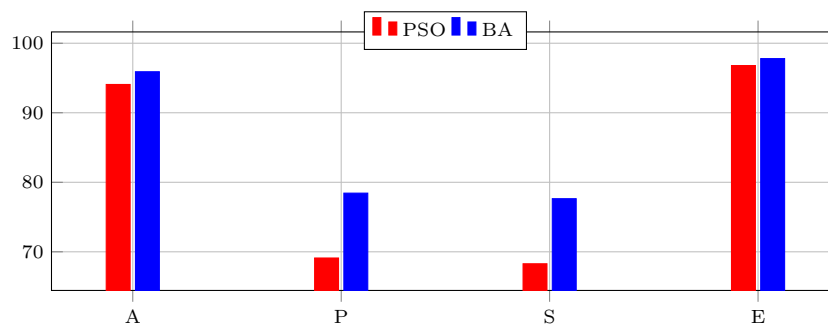


Figura 35: Comparação das métricas do circuito 2 utilizando a combinação dos cinco nós.

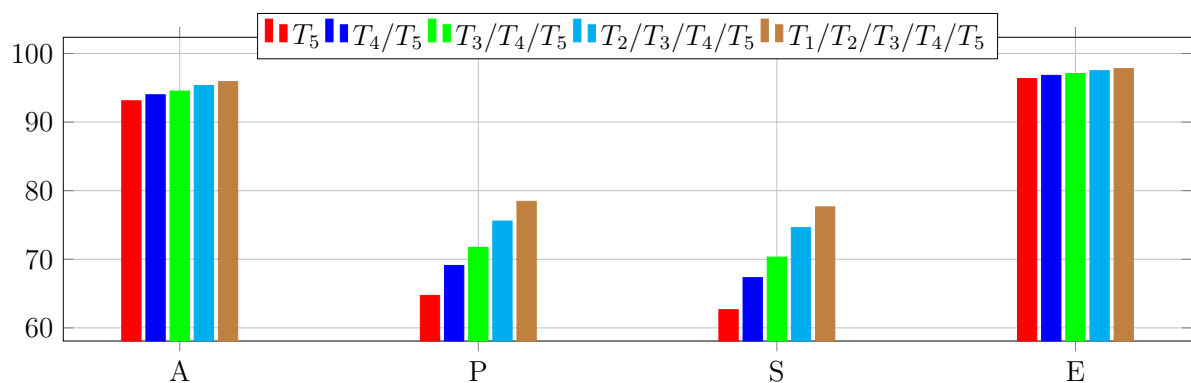


Figura 36: Comparação das métricas de avaliação do circuito 2 usando o BA.

Na Figura 37 são apresentadas, graficamente, as métricas globais de desempenho do PSO e do BA no circuito 1 analisando a quantidade de nós que estão sendo considerados para as implementações das duas técnicas, a partir dos dados numéricos apresentados nas Tabelas 172.

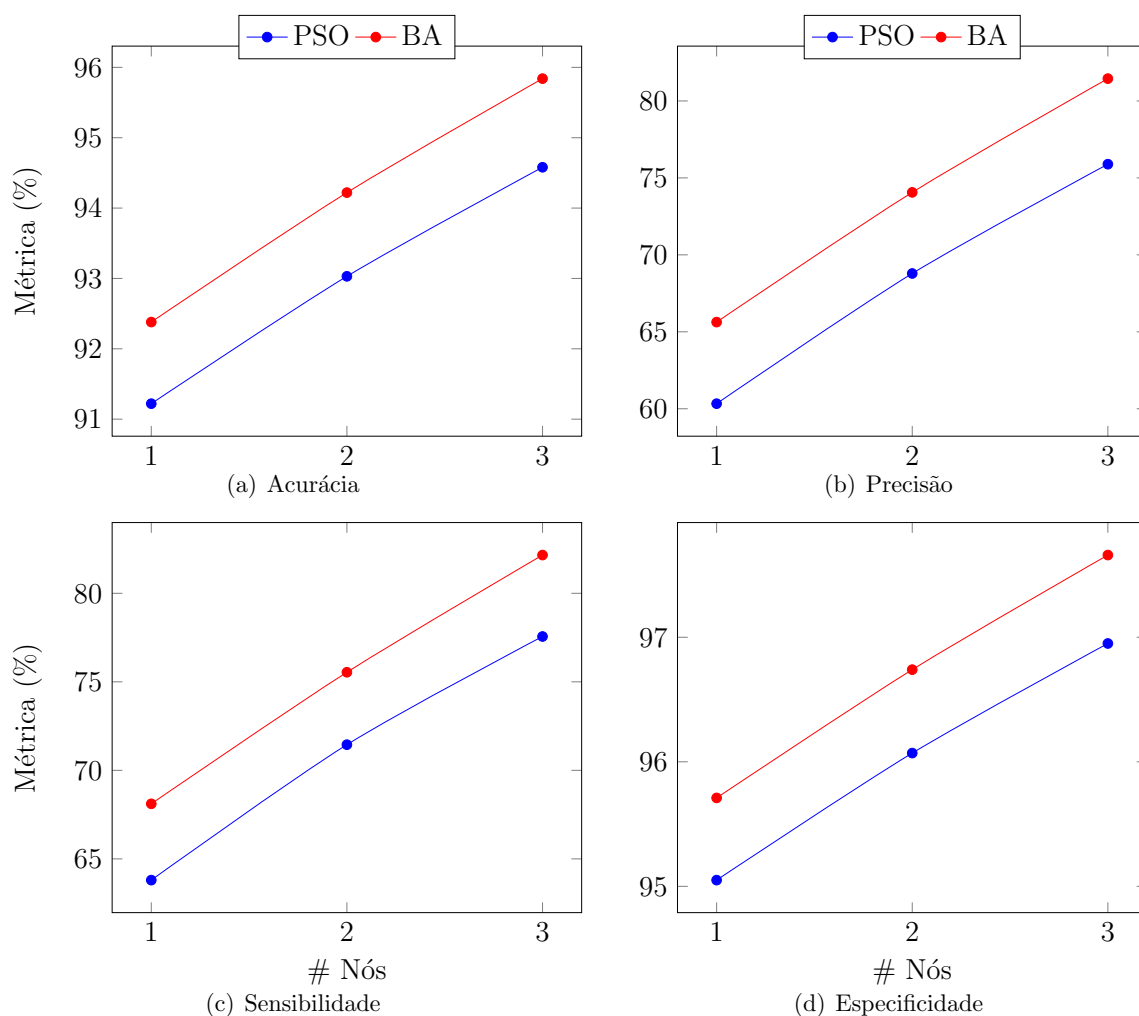


Figura 37: Comparação das métricas de avaliação do circuito 1 entre o PSO e o BA.

Constatou-se que o melhor desempenho no circuito 1 para as métricas consideradas se deu com a utilização da técnica do BA utilizando a combinação dos três nós, cujos valores de acurácia, precisão, sensibilidade e especificidade são: 95,84%, 81,45%, 82,16% e 97,66%, respectivamente.

A Tabela 173 apresenta a comparação dos dados obtidos para o circuito 2 pelo quantitativo de nós utilizados.

Tabela 173: Comparação das métricas de avaliação do circuito 2.

	1 nó		2 nós		3 nós		4 nós		5 nós		
	PSO	BA	PSO	BA	PSO	BA	PSO	BA	PSO	BA	
Métricas avaliadas	A	91,72	92,35	92,81	93,12	93,37	93,71	93,62	94,35	94,07	95,13
	P	57,89	61,17	63,03	64,67	65,68	67,46	66,81	70,68	69,11	74,87
	S	56,63	59,53	62,09	63,46	64,86	66,43	66,16	69,74	68,28	73,30
	E	95,60	95,96	96,15	96,33	96,42	96,61	96,54	96,96	96,79	97,42

Na Figura 38 são apresentadas, graficamente, as métricas globais de desempenho do PSO e do BA no circuito 2 analisando a quantidade de nós que estão sendo considerados, a partir dos dados numéricos apresentados nas Tabelas 173.

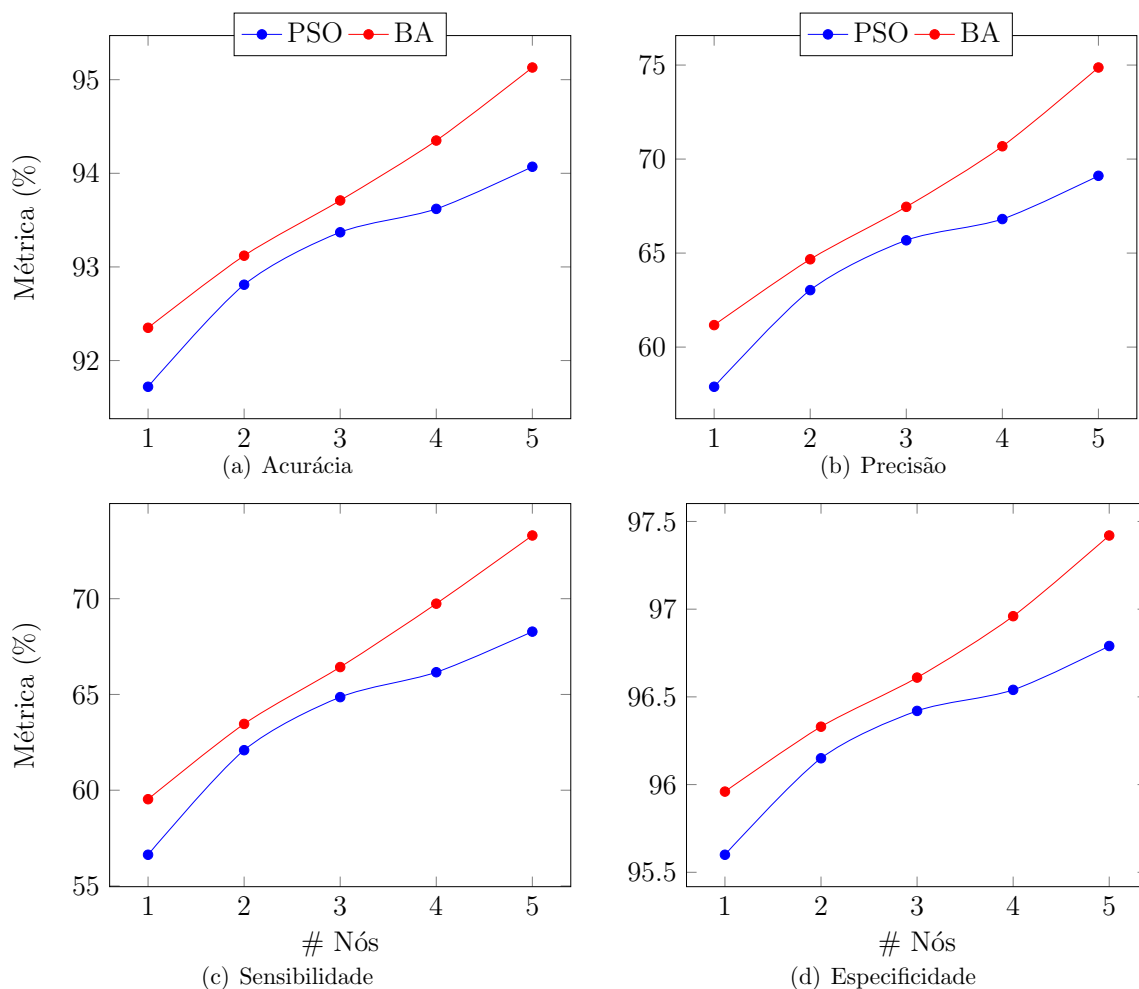


Figura 38: Comparação das métricas de avaliação do circuito 2 entre o PSO e o BA.

Constatou-se que o melhor desempenho no circuito 2 para as métricas consideradas se deu com a utilização da técnica do BA utilizando a combinação dos cinco nós, cujos valores de acurácia, precisão, sensibilidade e especificidade são: 95,13%, 74,87%, 73,30% e 97,42%, respectivamente.

5.5.3 Tempo de execução

Foram registrados os tempos médios de execução na implementação das técnicas de otimização para cada um dos circuitos, com e sem falhas. A Tabela 174 apresenta os tempos de execução para o PSO e o BA com relação ao número de nós utilizados nos dois estudos de caso, para os casos sem falha (SF) e com falha (CF).

Tabela 174: Tempo de execução da implementação pela quantidade de nós.

	Tempo (s)							
	Circuito 1				Circuito 2			
	SF		CF		SF		CF	
	PSO	BA	PSO	BA	PSO	BA	PSO	BA
1 nó	589	543	913	840	1.082	963	1.635	1.452
2 nós	890	818	1.200	1.104	1.474	1.297	1.933	1.701
3 nós	1.081	995	1.416	1.302	1.861	1.638	2.515	2.213
4 nós	–	–	–	–	2.311	2.011	2.662	2.467
5 nós	–	–	–	–	2.662	2.316	3.487	3.034

A Figura 39 apresenta a comparação dos tempos de execução das implementações para os estudos de caso analisando os casos sem falha e com falha. Observa-se que os tempos de execução no circuito 2 são maiores em relação ao circuito 1. Isso ocorre em virtude de uma maior complexidade do segundo circuito em relação ao primeiro, onde o circuito 2 tem mais componentes, é um filtro de terceira ordem e a função transferência tem uma maior complexidade matemática. Além disso, observa-se que em ambos os circuitos o tempo de execução da técnica do BA é menor que o tempo gasto na implementação do PSO.

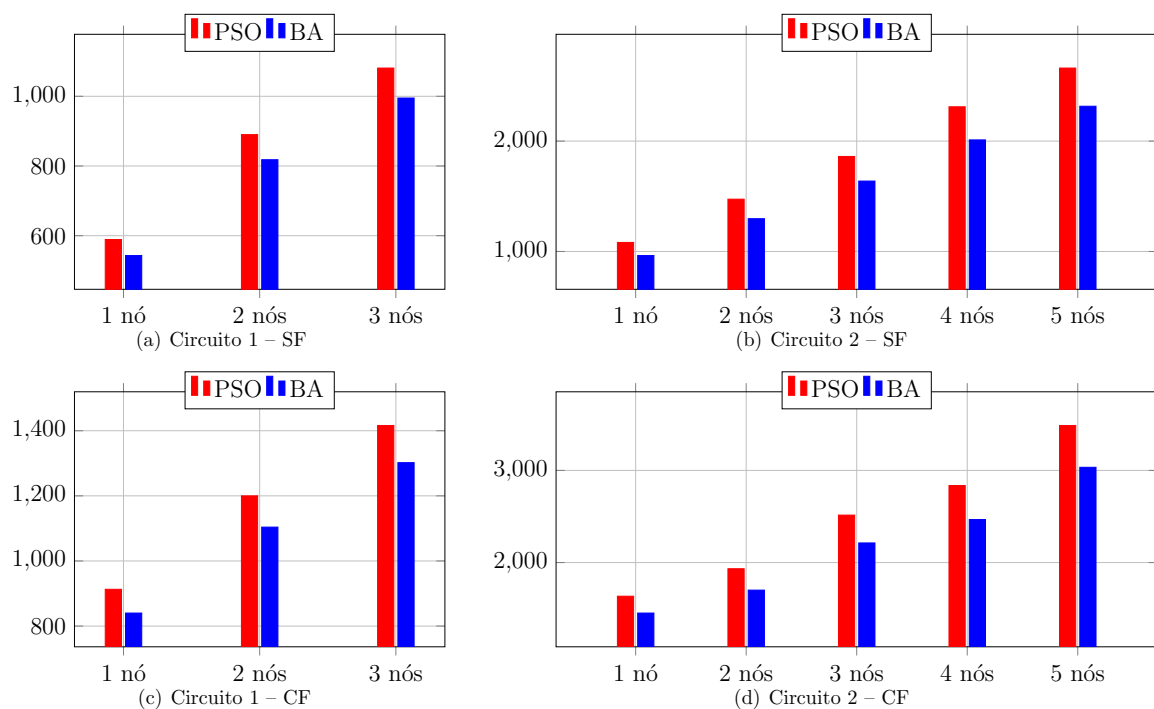


Figura 39: Comparação dos tempos de execução dos circuitos para os casos sem falha (SF) e com falha (CF).

5.6 Considerações Finais

Neste capítulo foi apresentada a metodologia utilizada para o diagnóstico de falhas, as métricas de avaliação consideradas nesse estudo e os resultados dos estudos de caso para as técnicas de otimização escolhidas no desenvolvimento desta dissertação. Os resultados indicam que a técnica baseada no comportamento dos morcegos tem um melhor desempenho para a aplicação de diagnóstico de falhas em circuitos eletrônicos analógicos em relação a técnica PSO, além de ser mais rápida no tempo de execução da implementação.

No capítulo seguinte, são apresentadas as conclusões relevantes ao desenvolvimento e resultados desta dissertação, assim como os trabalhos futuros relacionados à proposta de diagnósticos de falhas em circuitos eletrônicos analógicos.

Capítulo 6

CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

ESTE capítulo apresenta na Seção 6.1 as principais conclusões acerca das metodologias propostas para o diagnóstico de falhas em circuitos eletrônicos analógicos, apresentando uma comparação de desempenho entre as técnicas utilizadas. A Seção 6.2 elenca possíveis melhorias nas metodologias propostas e sugestões para trabalhos futuros.

6.1 Conclusões

Esta dissertação abordou o problema de diagnóstico de falhas em circuitos eletrônicos analógicos através da implementação de duas técnicas de otimização: PSO e BA.

Foram realizados dois estudos de caso para cada técnica de otimização utilizada. No primeiro estudo de caso, utilizou-se o Circuito Biquad de Tow-Thomas que é um filtro de segunda ordem, que utiliza dois integradores, muito utilizado na indústria em virtude da sua flexibilidade de uso. A depender dos parâmetros aplicados ao circuito, o filtro tem a opção de funcionar como passa-baixa, passa-alta, passa-banda ou passa tudo.

No segundo estudo de caso, foi utilizado o filtro de Butterworth. É um filtro de terceira ordem que possui características similares ao primeiro circuito, podendo trabalhar como passa-baixa, passa-alta, passa-banda ou passa tudo. Em ambos os estudos de caso, foram extraídas as 4 principais métricas de desempenho utilizadas em aplicações de otimização: a acurácia, a precisão, a sensibilidade e a especificidade.

A utilização de técnicas de otimização têm o objetivo de, dadas as funções transferências dos nós acessíveis do circuito, encontrar os parâmetros dos componentes do circuito e verificar se o valor ótimo encontrado condiz com os valores de funcionamento corretos do circuito. A primeira etapa das implementações é de verificação se há falha ou não. A

segunda etapa da metodologia desenvolvida é identificar os possíveis componentes com falha. Pelos resultados obtidos e apresentados no Capítulo 5, observou-se que em ambas as técnicas foi possível identificar os componentes defeituosos em alguns casos ou reduzir a quantidade de possíveis componentes em 75%.

No primeiro estudo de caso, obteve-se o melhor desempenho das métricas quando analisada a combinação dos três nós acessíveis do circuito. O PSO teve como métricas de acurácia, precisão, sensibilidade e especificidade os valores de 94,58%, 75,89%, 77,56% e 96,95%, respectivamente. Já para o BA, os valores das métricas globais de acurácia, precisão, sensibilidade e especificidade foram de 95,84%, 81,45%, 82,16% e 97,66%, respectivamente. Observa-se um melhor desempenho para o primeiro circuito quando é utilizada a técnica BA. Adicionalmente, a técnica BA também mostrou um desempenho melhor em termos de tempo de execução. Para os casos com falha, utilizando a combinação dos três nós acessíveis, o tempo para execução médio do BA foi de 761s, enquanto que o PSO teve um tempo de 818s, o que é 7,5% maior. Para o caso sem falhas, o melhor desempenho do BA ocorreu quando utilizada a combinação de dois nós acessíveis, com tempo de 451s, enquanto que o PSO teve um tempo médio de 496s, o que é 9,9% maior.

No segundo estudo de caso, obteve-se o melhor desempenho das métricas quando analisada a combinação dos cinco nós acessíveis do circuito. Nesta característica, o PSO teve como métricas de acurácia, precisão, sensibilidade e especificidade os valores de 94,06%, 69,11%, 68,24% e 96,79%, respectivamente. Já para o BA, os valores das métricas globais de acurácia, precisão, sensibilidade e especificidade foram de 95,90%, 78,44%, 77,64% e 97,79%, respectivamente. Assim como no primeiro estudo de caso, observa-se um melhor desempenho para o segundo circuito quando é utilizada a técnica BA. Adicionalmente, a técnica BA também mostrou um desempenho melhor em termos de tempo de execução. Para os casos com falha, utilizando a combinação de dois nós acessíveis, o tempo para execução médio do BA foi de 1.075s, enquanto que o PSO teve um tempo de 1.181s, que é 9,6% maior. Para o caso sem falhas, o melhor desempenho do BA ocorreu quando utilizado a combinação de 1 nós acessíveis, com tempo de 571s, enquanto que o PSO teve um tempo médio de 642s, que é 12,4% maior.

Desta forma, a partir dos resultados encontrados, as metodologias criadas para a detecção de falhas em circuitos eletrônicos atingiram o objetivo, uma vez que apresentaram bons desempenhos gerais, tendo a técnica de otimização inspirada nos morcegos

apresentado melhor desempenho nos dois estudos de caso realizados e, também, com redução no tempo de execução das implementações em relação aos tempos obtidos pela técnica do PSO.

6.2 Trabalhos Futuros

Nesta seção, são apresentadas sugestões para melhoria do desempenho da metodologia desenvolvida, assim como o aprofundamento das buscas por falhas múltiplas em circuitos analógicos.

A aplicação de outras técnicas de otimização, como por exemplo o algoritmo baseado no comportamento do lobo cinza (*Gray Wolf Algorithm - GWA*) e algoritmos genéticos, a fim de buscar melhorias de desempenho e diminuição do tempo de execução das implementações. A aplicação de outras técnicas bio inspiradas ou de modelos matemáticos podem alcançar melhores resultados.

O estudo de novas técnicas de análise de circuitos para incrementar as restrições do sistema e melhorar o desempenho da metodologia proposta. Em particular, a utilização da análise de sensibilidade dos circuitos com a identificação da influência de cada componente sobre os nós acessíveis do circuito para identificar variações além da faixa de operação pré-definida pelos fabricantes dos componentes. O aumento de restrições do sistema poderá influenciar na busca de falhas múltiplas nos circuitos.

REFERÊNCIAS

- AIZENBERG, I. et al. A neural network classifier with multi-valued neurons for analog circuit fault diagnosis. *Electronics*, v. 10, 2021.
- ALBUSTANI, H. Modelling methods for testability analysis of analog integrated circuits based on pole-zero analysis. In: . [S.l.: s.n.], 2004.
- ALEXANDER, C.; SADIKU, M. *Fundamentals of Electric Circuits*. 7th. ed. [S.l.]: McGraw Hill Higher Education, 2008.
- ALTMAN, D. G.; BLAND, J. M. Statistics notes: Diagnostic tests 1: sensitivity and specificity. *BMJ*, BMJ Publishing Group Ltd, v. 308, n. 6943, p. 1552, 1994.
- ARABI, A. et al. An accurate classifier based on adaptive neuro-fuzzy and features selection techniques for fault classification in analog circuits. *Integration*, p. 50–59, 2019.
- BERGH, F. V. D.; ENGELBRECHT, A. P. *An Analysis of Particle Swarm Optimizers*. Tese (Doutorado) — University of Pretoria, 2002.
- BHATTACHARYA, R.; RAGAMAI, S. H. M.; KUMAR, S. Sfg based fault simulation of linear analog circuits using fault classification and sensitivity analysis. In: . [S.l.: s.n.], 2017. p. 179 – 190.
- BILSKI, A.; WOJCIECHOWSKI, J. Automatic parametric fault detection in complex analog systems based on a method of minimum node selection. *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, v. 26, p. 655 – 668, 2016.
- BINU, D.; KARIYAPPA, B. A survey on fault diagnosis of analog circuits: Taxonomy and state of the art. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, v. 73, p. 68–83, 2017.

- BINU, D.; KARIYAPPA, B. Ridenn: A new rider optimization algorithm-based neural network for fault diagnosis in analog circuits. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, PP, p. 1–25, 2018.
- BUTTERWORTH, S. On the Theory of Filter Amplifiers. *Experimental Wireless & the Wireless Engineer*, v. 7, p. 536–541, out. 1930.
- CATELANI, M.; FORT, A.; ALIPPI, C. A fuzzy approach for soft fault detection in analog circuits. *Measurement*, v. 32, p. 73–83, 07 2002.
- CLAASEN, T. System on a chip: changing ic design today and in the future. *IEEE Micro*, v. 23, n. 3, p. 20–26, 2003.
- DENG, Y.; SHI, Y.; ZHOU, L. An approach of fault diagnosis in nonlinear circuits. In: *2010 International Conference on Communications, Circuits and Systems (ICCCAS)*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 796–799.
- DENG, Y.; ZHOU, Y. Fault diagnosis of an analog circuit based on hierarchical DVS. *Symmetry*, v. 12, 2020.
- DENNIS, B.; KARIYAPPA, B. S. Fault isolation in analog circuits using multi-support vector neural network. In: *2018 3rd International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 655–660.
- DING, S. X. *Model-Based Fault Diagnosis Techniques: Design Schemes, Algorithms, and Tools*. [S.l.]: Springer Publishing Company, Incorporated, 2008.
- DORIGO, M.; BIRATTARI, M. Swarm intelligence. *Scholarpedia*, v. 2, p. 1462, 2007.
- EBERHART, R.; SHI, Y. Tracking and optimizing dynamic systems with particle swarms. In: *Proc. IEEE CEC*. [S.l.: s.n.], 2001. v. 1:94-100.
- ENGELBRECHT, A. Computational intelligence: An introduction. *J. Artificial Societies and Social Simulation*, v. 7, 01 2004.
- ENGELBRECHT, A. *Fundamentals of Computational Swarm Intelligence*. [S.l.: s.n.], 2005.

- EVERS, G. I.; GHALIA, M. B. Regrouping particle swarm optimization: A new global optimization algorithm with improved performance consistency across benchmarks. In: *2009 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*. [S.l.: s.n.], 2009. p. 3901–3908.
- FENTON, W.; MCGINNITY, T.; MAGUIRE, L. Fault diagnosis of electronic systems using intelligent techniques: a review. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, v. 31, n. 3, p. 269–281, 2001.
- GALINDO, J. D. L. G.; NEDJAH, N.; MOURELLE, L. d. M. Diagnóstico de falhas em circuitos analógicos usando otimização por enxame de partículas. In: *Anais do XXIV Congresso Brasileiro de Automática*. Fortaleza, Brasil: [s.n.], 2022.
- GALINDO, J. D. L. G.; NEDJAH, N.; MOURELLE, L. d. M. Soft faults diagnosis in analog circuits using optimization inspired by bat behavior. In: . Foz do Iguacu, Brazil: [s.n.], 2022.
- GLAS, A. et al. The diagnostic odds ratio: A single indicator of test performance. *Journal of clinical epidemiology*, v. 56, p. 1129–35, 12 2003.
- GUO, Z.; SAVIR, J. Analog circuit test using transfer function coefficient estimates. In: *International Test Conference. Proceedings*. [S.l.: s.n.], 2003. p. 1155–1163.
- HAN, B. R.; LI, J. B. Analog circuit fault diagnosis based on particle swarm neural network hybrid algorithm. In: *Mechatronics, Robotics and Automation*. [S.l.: s.n.], 2013. v. 373, p. 1049–1052.
- HAYT, W.; KERMMERLY, J.; DURBIN, S. *Análise de Circuitos em Engenharia*. [S.l.]: Mc Graw Hill, 2008.
- HE, W. et al. Analog circuit fault diagnosis via joint cross-wavelet singular entropy and parametric t-SNE. *Entropy*, v. 20, 2018.
- JING, Z.; YING, L. Electronic circuit fault diagnosis based on SCA-SVM. In: *2018 10th International Conference on Communications, Circuits and Systems (ICCCAS)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 44–49.

- KARTHI, S. P.; SHANTHI, M.; BHUVANESWARI, M. C. Parametric fault diagnosis in analog circuit using genetic algorithm. In: *2014 International Conference on Green Computing Communication and Electrical Engineering*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 1–5.
- KAVITHAMANI, A.; MANIKANDAN, V.; DEVARAJAN, N. Analog circuit fault diagnosis based on bandwidth and fuzzy classifier. In: *TENCON 2009 - 2009 IEEE Region 10 Conference*. [S.l.: s.n.], 2009. p. 1–6.
- KENNEDY, J.; EBERHART, R. Particle swarm optimization. In: *Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks*. [S.l.: s.n.], 1995. v. 4, p. 1942–1948 vol.4.
- KIRKPATRICK, S.; GELATT, C. D.; VECCHI, M. P. Optimization by simulated annealing. *Science*, v. 220, n. 4598, p. 671–680, 1983.
- KORZYBSKI, M.; OSSOWSKI, M. The on-line evolutionary method for soft fault diagnosis in diode-transistor circuits. *International Journal of Electronics and Telecommunications*, Polish Academy of Sciences Committee of Electronics and Telecommunications, vol. 61, n. No 1, 2015.
- LEE, S.-Y.; CHENG, C.-J. Systematic design and modeling of a ota-c filter for portable ecg detection. *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, v. 3, n. 1, p. 53–64, 2009.
- LUO, H. et al. Module level fault diagnosis for analog circuits based on system identification and genetic algorithm. *Measurement*, v. 45, n. 4, p. 769–777, 2012.
- QIN, X.; HAN, B.; CUI, L. A kind integrated adaptive fuzzy neural network tolerance analog circuit fault diagnosis method. In: *2011 IEEE 2nd International Conference on Computing, Control and Industrial Engineering*. [S.l.: s.n.], 2011. v. 1, p. 180–183.
- RAO, S. S. Introduction to optimization. In: _____. *Engineering Optimization Theory and Practice*. [S.l.]: John Wiley and Sons, Ltd, 2019. cap. 1, p. 1–56.
- REN, Q. et al. Transient fault diagnosis algorithm based on feature classification and its application in high-power laser facility. In: *2020 Chinese Control And Decision Conference (CCDC)*. [S.l.: s.n.], 2020. p. 4705–4709.

- REYNOLDS, C. W. Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model. In: *Proceedings of the 14th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*. [S.l.]: Association for Computing Machinery, 1987. p. 25–34.
- SCHRICK, D. van. Remarks on terminology in the field of supervision, fault detection and diagnosis. *IFAC Proceedings Volumes*, v. 30, p. 959–964, 1997.
- SHI, J. et al. An adaptive new state recognition method based on density peak clustering and voting probabilistic neural network. *Applied Soft Computing*, v. 97, p. 106835, 2020.
- SHI, J. et al. A combined method for analog circuit fault diagnosis based on dependence matrices and intelligent classifiers. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v. 69, p. 782–793, 2020.
- SHI, J.; HE, Q.; WANG, Z. Gmm clustering-based decision trees considering fault rate and cluster validity for analog circuit fault diagnosis. *IEEE Access*, v. 7, p. 140637–140650, 2019.
- SHI, Y.; EBERHART, R. A modified particle swarm optimizer. In: *1998 IEEE International Conference on Evolutionary Computation Proceedings. IEEE World Congress on Computational Intelligence (Cat. No.98TH8360)*. [S.l.: s.n.], 1998. p. 69–73.
- SHI, Y.; EBERHART, R. C. Parameter selection in particle swarm optimization. In: PORTO, V. W. et al. (Ed.). *Evolutionary Programming VII*. [S.l.]: Springer Berlin Heidelberg, 1998. p. 591 – 600.
- SHI, Y.; EBERHART, R. C. Parameter selection in particle swarm optimization. In: PORTO, V. W. et al. (Ed.). *Evolutionary Programming VII*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1998. p. 591 – 600.
- TADEUSIEWICZ, M.; HALGAS, S. A method for multiple soft fault diagnosis of linear analog circuits. *Measurement*, v. 131, p. 714–722, 2019.
- TADEUSIEWICZ, M.; HALGAS, S. Soft fault diagnosis of linear circuits with the special attention paid to the circuits containing current conveyors. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, v. 115, p. 1530–1536, 2020.

- TADEUSIEWICZ, M.; HALGAS, S.; KORZYBSKI, M. An algorithm for soft-fault diagnosis of linear and nonlinear circuits. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, v. 49, p. 1648–1653, 2002.
- TADEUSIEWICZ, M.; KORZYBSKI, M. A method for fault diagnosis in linear electronic circuits. *International Journal of Circuit Theory and Applications*, v. 28, p. 245–262, 2000.
- VASAN, A. S. S.; LONG, B.; PECHT, M. Diagnostics and prognostics method for analog electronic circuits. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, p. 5277–5291, 2013.
- YANG, C. Genetic algorithm based faulty parameter identification for linear analog circuit. *IEEE Access*, v. 8, p. 213357–213369, 2020.
- YANG, C.; ZHEN, L.; HU, C. Fault diagnosis of analog filter circuit based on genetic algorithm. *IEEE Access*, v. 7, p. 54969–54980, 2019.
- YANG, X.-S. A new metaheuristic bat-inspired algorithm. In: _____. *Nature Inspired Cooperative Strategies for Optimization (NICSO 2010)*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010. p. 65–74.
- YANG, X.-S. Bat algorithm: Literature review and applications. *International Journal of Bio-Inspired Computation*, v. 5, 08 2013.
- YIGANG, H. et al. Feature extraction of analogue circuit fault signals via cross-wavelet transform and variational bayesian matrix factorisation. *IET Science, Measurement and Technology*, v. 13, 2018.
- YU, W.; HE, Y.; GAO, K. A compute method of analog circuit fault diagnosis via particle swarm optimization. *Journal of Automation and Control Engineering*, v. 4, p. 439–442, 2016.
- YU, W. E.; YU, S.; PALUGA, F. Practical treatise on the tow-thomas biquad active filter. *CE170 Communications Systems Laboratory*, 02 2002.
- YUAN, Z. et al. A diagnostics method for analog circuits based on improved kernel entropy component analysis. *J. Electron. Test.*, v. 33, p. 697–707, 2017.

ZHOU, L.; SHI, Y. Soft fault diagnosis of analog circuit based on particle swarm optimization. In: *2009 IEEE Circuits and Systems International Conference on Testing and Diagnosis*. [S.l.: s.n.], 2009. p. 1–4.

A.8.5 Nós T_1 e T_3

Tabela A.54: Resultados do Caso 8 referente aos nós T_1 e T_3 para o circuito 1.

	PSO								BA							
	S_{R_1}	S_{R_2}	S_{R_3}	S_{R_4}	S_{R_5}	S_{R_6}	S_{C_1}	S_{C_2}	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	1
F_{R_1}	37	0	0	0	0	0	0	0	19	0	0	0	0	0	0	0
F_{R_2}	0	31	0	0	0	0	0	0	0	17	0	0	0	0	0	0
F_{R_3}	0	0	58	0	0	0	0	0	0	0	64	0	0	0	0	0
F_{R_4}	0	0	0	31	0	0	0	0	0	0	0	48	0	0	0	0
F_{R_5}	0	0	0	0	37	0	0	0	0	0	0	0	41	0	0	0
F_{R_6}	0	0	0	0	0	31	0	0	0	0	0	0	0	45	0	0
F_{C_1}	100	100	97	100	100	100	100	100	100	100	96	100	100	100	100	100
F_{C_2}	0	0	0	0	0	0	0	37	0	0	0	0	0	0	0	34

A.8.6 Nós T_2 e T_3

Tabela A.55: Resultados do Caso 8 referente aos nós T_2 e T_3 para o circuito 1.

	PSO								BA							
	S_{R_1}	S_{R_2}	S_{R_3}	S_{R_4}	S_{R_5}	S_{R_6}	S_{C_1}	S_{C_2}	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
F_{R_1}	27	0	0	0	0	0	0	0	35	0	0	0	0	0	0	0
F_{R_2}	0	29	0	0	0	0	0	0	0	48	0	0	0	0	0	0
F_{R_3}	0	0	60	0	0	0	0	0	0	0	75	0	0	0	0	0
F_{R_4}	0	0	0	31	0	0	0	0	0	0	0	37	0	0	0	0
F_{R_5}	0	0	0	0	29	0	0	0	0	0	0	0	15	0	0	0
F_{R_6}	0	0	0	0	0	25	0	0	0	0	0	0	0	24	0	0
F_{C_1}	100	100	98	100	100	100	100	100	100	100	95	100	100	100	100	100
F_{C_2}	0	0	0	0	0	0	0	34	0	0	0	0	0	0	0	38

A.8.7 Nós T_1 , T_2 e T_3

Tabela A.56: Resultados do Caso 8 referente aos nós T_1 , T_2 e T_3 para o circuito 1.

	PSO								BA							
	S_{R_1}	S_{R_2}	S_{R_3}	S_{R_4}	S_{R_5}	S_{R_6}	S_{C_1}	S_{C_2}	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	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1
F_{R_1}	15	0	0	0	0	0	0	0	14	0	0	0	0	0	0	0
F_{R_2}	0	11	0	0	0	0	0	0	0	16	0	0	0	0	0	0
F_{R_3}	0	0	43	0	0	0	0	0	0	0	63	0	0	0	0	0
F_{R_4}	0	0	0	25	0	0	0	0	0	0	0	24	0	0	0	0
F_{R_5}	0	0	0	0	21	0	0	0	0	0	0	0	23	0	0	0
F_{R_6}	0	0	0	0	0	17	0	0	0	0	0	0	0	24	0	0
F_{C_1}	100	100	94	100	100	100	100	100	100	100	94	100	100	100	100	100
F_{C_2}	0	0	0	0	0	0	0	25	0	0	0	0	0	0	0	21

A.9 Caso 9: Falha em C_2

A.9.1 Nó T_1

Tabela A.57: Resultados do Caso 9 referente ao nó T_1 para o circuito 1.

	PSO								BA							
	S_{R_1}	S_{R_2}	S_{R_3}	S_{R_4}	S_{R_5}	S_{R_6}	S_{C_1}	S_{C_2}	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
F_{R_1}	62	0	0	0	0	0	0	0	48	0	0	0	0	0	0	0
F_{R_2}	0	63	0	0	0	0	0	0	0	42	0	0	0	0	0	0
F_{R_3}	0	0	57	0	0	0	0	0	0	0	92	0	0	0	0	0
F_{R_4}	0	0	0	58	0	0	0	0	0	0	0	93	0	0	0	0
F_{R_5}	0	0	0	0	45	0	0	0	0	0	0	0	93	0	0	0
F_{R_6}	0	0	0	0	0	39	0	0	0	0	0	0	0	95	0	0
F_{C_1}	0	0	0	0	0	0	67	0	0	0	0	0	0	0	98	0
F_{C_2}	100	99	97	95	99	97	100	100	100	99	97	95	99	97	100	100

A.9.2 Nó T_2

Tabela A.58: Resultados do Caso 9 referente ao nó T_2 para o circuito 1.

	PSO								BA							
	S_{R_1}	S_{R_2}	S_{R_3}	S_{R_4}	S_{R_5}	S_{R_6}	S_{C_1}	S_{C_2}	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
F_{R_1}	66	0	0	0	0	0	0	0	61	0	0	0	0	0	0	0
F_{R_2}	0	64	0	0	0	0	0	0	0	85	0	0	0	0	0	0
F_{R_3}	0	0	53	0	0	0	0	0	0	0	57	0	0	0	0	0
F_{R_4}	0	0	0	52	0	0	0	0	0	0	0	92	0	0	0	0
F_{R_5}	0	0	0	0	42	0	0	0	0	0	0	0	59	0	0	0
F_{R_6}	0	0	0	0	0	47	0	0	0	0	0	0	0	48	0	0
F_{C_1}	0	0	0	0	0	0	68	0	0	0	0	0	0	0	95	0
F_{C_2}	100	100	99	94	100	99	100	100	100	100	99	94	100	99	100	100

A.9.3 Nó T_3

Tabela A.59: Resultados do Caso 9 referente ao nó T_3 para o circuito 1.

	PSO								BA							
	S_{R_1}	S_{R_2}	S_{R_3}	S_{R_4}	S_{R_5}	S_{R_6}	S_{C_1}	S_{C_2}	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	0	0	0	0	0	0	0	0
F_{R_1}	55	0	0	0	0	0	0	0	31	0	0	0	0	0	0	0
F_{R_2}	0	61	0	0	0	0	0	0	0	88	0	0	0	0	0	0
F_{R_3}	0	0	48	0	0	0	0	0	0	0	47	0	0	0	0	0
F_{R_4}	0	0	0	55	0	0	0	0	0	0	0	93	0	0	0	0
F_{R_5}	0	0	0	0	49	0	0	0	0	0	0	0	93	0	0	0
F_{R_6}	0	0	0	0	0	41	0	0	0	0	0	0	0	96	0	0
F_{C_1}	0	0	0	0	0	0	64	0	0	0	0	0	0	0	93	0
F_{C_2}	98	100	100	100	100	98	100	100	98	100	98	92	100	96	100	100

A.9.4 Nós T_1 e T_2

Tabela A.60: Resultados do Caso 9 referente aos nós T_1 e T_2 para o circuito 1.

	PSO								BA							
	S_{R_1}	S_{R_2}	S_{R_3}	S_{R_4}	S_{R_5}	S_{R_6}	S_{C_1}	S_{C_2}	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
F_{R_1}	42	0	0	0	0	0	0	0	24	0	0	0	0	0	0	0
F_{R_2}	0	38	0	0	0	0	0	0	0	43	0	0	0	0	0	0
F_{R_3}	0	0	33	0	0	0	0	0	0	0	46	0	0	0	0	0
F_{R_4}	0	0	0	41	0	0	0	0	0	0	0	92	0	0	0	0
F_{R_5}	0	0	0	0	23	0	0	0	0	0	0	0	46	0	0	0
F_{R_6}	0	0	0	0	0	32	0	0	0	0	0	0	0	47	0	0
F_{C_1}	0	0	0	0	0	0	61	0	0	0	0	0	0	0	98	0
F_{C_2}	99	100	100	98	100	100	100	100	99	100	100	91	100	100	100	100

A.9.5 Nós T_1 e T_3

Tabela A.61: Resultados do Caso 9 referente aos nós T_1 e T_3 para o circuito 1.

	PSO								BA							
	S_{R_1}	S_{R_2}	S_{R_3}	S_{R_4}	S_{R_5}	S_{R_6}	S_{C_1}	S_{C_2}	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
F_{R_1}	34	0	0	0	0	0	0	0	20	0	0	0	0	0	0	0
F_{R_2}	0	33	0	0	0	0	0	0	0	33	0	0	0	0	0	0
F_{R_3}	0	0	24	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0
F_{R_4}	0	0	0	43	0	0	0	0	0	0	0	95	0	0	0	0
F_{R_5}	0	0	0	0	28	0	0	0	0	0	0	0	87	0	0	0
F_{R_6}	0	0	0	0	0	31	0	0	0	0	0	0	0	92	0	0
F_{C_1}	0	0	0	0	0	0	65	0	0	0	0	0	0	0	92	0
F_{C_2}	100	100	100	99	100	98	100	100	100	100	100	93	100	93	100	100

A.9.6 Nós T_2 e T_3

Tabela A.62: Resultados do Caso 9 referente aos nós T_2 e T_3 para o circuito 1.

	PSO								BA							
	S_{R_1}	S_{R_2}	S_{R_3}	S_{R_4}	S_{R_5}	S_{R_6}	S_{C_1}	S_{C_2}	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
F_{R_1}	38	0	0	0	0	0	0	0	27	0	0	0	0	0	0	0
F_{R_2}	0	36	0	0	0	0	0	0	0	85	0	0	0	0	0	0
F_{R_3}	0	0	27	0	0	0	0	0	0	0	29	0	0	0	0	0
F_{R_4}	0	0	0	40	0	0	0	0	0	0	0	94	0	0	0	0
F_{R_5}	0	0	0	0	25	0	0	0	0	0	0	0	24	0	0	0
F_{R_6}	0	0	0	0	0	23	0	0	0	0	0	0	0	22	0	0
F_{C_1}	0	0	0	0	0	0	48	0	0	0	0	0	0	0	94	0
F_{C_2}	100	100	100	98	100	100	100	100	100	100	100	98	100	100	100	100

A.9.7 Nós T_1 , T_2 e T_3

Tabela A.63: Resultados do Caso 9 referente aos nós T_1 , T_2 e T_3 para o circuito 1.

	PSO								BA							
	S_{R_1}	S_{R_2}	S_{R_3}	S_{R_4}	S_{R_5}	S_{R_6}	S_{C_1}	S_{C_2}	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
F_{R_1}	23	0	0	0	0	0	0	0	21	0	0	0	0	0	0	0
F_{R_2}	0	28	0	0	0	0	0	0	0	47	0	0	0	0	0	0
F_{R_3}	0	0	17	0	0	0	0	0	0	0	20	0	0	0	0	0
F_{R_4}	0	0	0	31	0	0	0	0	0	0	0	95	0	0	0	0
F_{R_5}	0	0	0	0	22	0	0	0	0	0	0	0	20	0	0	0
F_{R_6}	0	0	0	0	0	15	0	0	0	0	0	0	0	21	0	0
F_{C_1}	0	0	0	0	0	0	42	0	0	0	0	0	0	0	93	0
F_{C_2}	100	100	100	98	100	100	100	100	100	100	100	95	100	100	100	100

B.4.31 Nós T_1, T_2, T_3, T_4 e T_5

Tabela B.124: Resultados do Caso 4 referente aos nós $T_1 - T_5$ para o circuito 2.

Table with columns for PSO and BA algorithms, and rows for various nodes (SF, FR1, FR2, FR3, FR4, FR5, FR6, FC1, FC2, FC3) across multiple iterations.

B.5 Caso 5: Falha em R_4

B.5.1 Nó T_1

Tabela B.125: Resultados do Caso 5 referente ao nó T_1 para o circuito 2.

Table with columns for PSO and BA algorithms, and rows for various nodes (SF, FR1, FR2, FR3, FR4, FR5, FR6, FC1, FC2, FC3) for node T1.

B.5.2 Nó T_2

Tabela B.126: Resultados do Caso 5 referente ao nó T_2 para o circuito 2.

Table with columns for PSO and BA algorithms, and rows for various nodes (SF, FR1, FR2, FR3, FR4, FR5, FR6, FC1, FC2, FC3) for node T2.

B.5.3 Nó T_3

Tabela B.127: Resultados do Caso 5 referente ao nó T_3 para o circuito 2.

Table with columns for PSO and BA algorithms, and rows for various nodes (SF, FR1, FR2, FR3, FR4, FR5, FR6, FC1, FC2, FC3) for node T3.

B.5.4 Nó T_4

Tabela B.128: Resultados do Caso 5 referente ao nó T_4 para o circuito 2.

Table with columns for PSO and BA algorithms, and rows for various nodes (SF, FR1, FR2, FR3, FR4, FR5, FR6, FC1, FC2, FC3) for node T4.

B.7.3 N3

Tabela B.189: Resultados do Caso 7 referente ao n3 para o circuito 2.

Table with 20 columns and 16 rows, showing PSO and BA results for node T3. Columns are labeled with S variables for SF, FR, FC. PSO and BA sub-headers are above the columns. Values range from 0 to 100.

B.7.4 N4

Tabela B.190: Resultados do Caso 7 referente ao n4 para o circuito 2.

Table with 20 columns and 16 rows, showing PSO and BA results for node T4. Columns are labeled with S variables for SF, FR, FC. PSO and BA sub-headers are above the columns. Values range from 0 to 100.

B.7.5 N5

Tabela B.191: Resultados do Caso 7 referente ao n5 para o circuito 2.

Table with 20 columns and 16 rows, showing PSO and BA results for node T5. Columns are labeled with S variables for SF, FR, FC. PSO and BA sub-headers are above the columns. Values range from 0 to 100.

B.7.6 N1 e T2

Tabela B.192: Resultados do Caso 7 referente aos ns T1 e T2 para o circuito 2.

Table with 20 columns and 16 rows, showing PSO and BA results for nodes T1 and T2. Columns are labeled with S variables for SF, FR, FC. PSO and BA sub-headers are above the columns. Values range from 0 to 99.

B.7.7 N1 e T3

Tabela B.193: Resultados do Caso 7 referente aos ns T1 e T3 para o circuito 2.

Table with 20 columns and 16 rows, showing PSO and BA results for nodes T1 and T3. Columns are labeled with S variables for SF, FR, FC. PSO and BA sub-headers are above the columns. Values range from 0 to 100.

B.7.8 N1 e T4

B.7.23 Nós T_2 , T_3 e T_5

Tabela B.209: Resultados do Caso 7 referente aos nós T_2 , T_3 e T_5 para o circuito 2.

	PSO									BA										
	S_{R_1}	S_{R_2}	S_{R_3}	S_{R_4}	S_{R_5}	S_{R_6}	S_{C_1}	S_{C_2}	S_{C_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}	S_{C_3}		
SF	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
F_{R_1}	71	0	0	0	0	0	0	0	0	71	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
F_{R_2}	0	83	0	0	0	0	0	0	0	0	83	0	0	0	0	0	0	0	0	
F_{R_3}	0	0	89	0	0	0	0	0	0	0	0	89	0	0	0	0	0	0	0	
F_{R_4}	0	0	0	93	0	0	0	0	0	0	0	0	93	0	0	0	0	0	0	
F_{R_5}	0	0	0	0	61	0	0	0	0	0	0	0	0	61	0	0	0	0	0	
F_{R_6}	100	100	100	100	100	100	100	100	99	100	100	100	100	100	100	100	100	100	99	
F_{R_7}	0	0	0	0	0	84	0	0	0	0	0	0	0	0	84	0	0	0	0	
F_{C_1}	0	0	0	0	0	0	91	0	0	0	0	0	0	0	0	91	0	0	0	
F_{C_2}	0	0	0	0	0	0	0	95	0	0	0	0	0	0	0	0	95	0	0	
F_{C_3}	0	0	0	0	0	0	0	0	40	0	0	0	0	0	0	0	0	40	0	0

B.7.24 Nós T_2 , T_4 e T_5

Tabela B.210: Resultados do Caso 7 referente aos nós T_2 , T_4 e T_5 para o circuito 2.

	PSO									BA										
	S_{R_1}	S_{R_2}	S_{R_3}	S_{R_4}	S_{R_5}	S_{R_6}	S_{C_1}	S_{C_2}	S_{C_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}	S_{C_3}		
SF	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
F_{R_1}	72	0	0	0	0	0	0	0	0	36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
F_{R_2}	0	71	0	0	0	0	0	0	0	0	39	0	0	0	0	0	0	0	0	
F_{R_3}	0	0	88	0	0	0	0	0	0	0	0	41	0	0	0	0	0	0	0	
F_{R_4}	0	0	0	86	0	0	0	0	0	0	0	0	48	0	0	0	0	0	0	
F_{R_5}	0	0	0	0	60	0	0	0	0	0	0	0	0	35	0	0	0	0	0	
F_{R_6}	100	100	100	100	100	100	100	100	99	100	100	100	100	100	100	100	100	100	99	
F_{R_7}	0	0	0	0	0	87	0	0	0	0	0	0	0	0	44	0	0	0	0	
F_{C_1}	0	0	0	0	0	0	88	0	0	0	0	0	0	0	0	31	0	0	0	
F_{C_2}	0	0	0	0	0	0	0	66	0	0	0	0	0	0	0	0	26	0	0	
F_{C_3}	0	0	0	0	0	0	0	0	31	0	0	0	0	0	0	0	0	27	0	0

B.7.25 Nós T_3 , T_4 e T_5

Tabela B.211: Resultados do Caso 7 referente aos nós T_3 , T_4 e T_5 para o circuito 2.

	PSO									BA										
	S_{R_1}	S_{R_2}	S_{R_3}	S_{R_4}	S_{R_5}	S_{R_6}	S_{C_1}	S_{C_2}	S_{C_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}	S_{C_3}		
SF	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
F_{R_1}	83	0	0	0	0	0	0	0	0	41	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
F_{R_2}	0	81	0	0	0	0	0	0	0	0	46	0	0	0	0	0	0	0	0	
F_{R_3}	0	0	97	0	0	0	0	0	0	0	0	53	0	0	0	0	0	0	0	
F_{R_4}	0	0	0	90	0	0	0	0	0	0	0	0	40	0	0	0	0	0	0	
F_{R_5}	0	0	0	0	55	0	0	0	0	0	0	0	0	28	0	0	0	0	0	
F_{R_6}	100	100	100	100	99	100	100	100	100	100	100	100	100	99	100	100	100	100	100	
F_{R_7}	0	0	0	0	0	90	0	0	0	0	0	0	0	0	42	0	0	0	0	
F_{C_1}	0	0	0	0	0	0	92	0	0	0	0	0	0	0	0	31	0	0	0	
F_{C_2}	0	0	0	0	0	0	0	67	0	0	0	0	0	0	0	0	25	0	0	
F_{C_3}	0	0	0	0	0	0	0	0	37	0	0	0	0	0	0	0	0	21	0	0

B.7.26 Nós T_1 , T_2 , T_3 e T_4

Tabela B.212: Resultados do Caso 7 referente aos nós T_1 , T_2 , T_3 e T_4 para o circuito 2.

	PSO									BA										
	S_{R_1}	S_{R_2}	S_{R_3}	S_{R_4}	S_{R_5}	S_{R_6}	S_{C_1}	S_{C_2}	S_{C_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}	S_{C_3}		
SF	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
F_{R_1}	54	0	0	0	0	0	0	0	0	54	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
F_{R_2}	0	52	0	0	0	0	0	0	0	0	52	0	0	0	0	0	0	0	0	
F_{R_3}	0	0	70	0	0	0	0	0	0	0	0	70	0	0	0	0	0	0	0	
F_{R_4}	0	0	0	59	0	0	0	0	0	0	0	0	59	0	0	0	0	0	0	
F_{R_5}	0	0	0	0	60	0	0	0	0	0	0	0	0	60	0	0	0	0	0	
F_{R_6}	100	100	100	100	99	100	100	100	98	100	100	100	100	99	100	100	100	100	98	
F_{R_7}	0	0	0	0	0	88	0	0	0	0	0	0	0	0	88	0	0	0	0	
F_{C_1}	0	0	0	0	0	0	67	0	0	0	0	0	0	0	0	67	0	0	0	
F_{C_2}	0	0	0	0	0	0	0	57	0	0	0	0	0	0	0	0	57	0	0	
F_{C_3}	0	0	0	0	0	0	0	0	65	0	0	0	0	0	0	0	0	65	0	0

B.7.27 Nós T_1 , T_2 , T_3 e T_5

Tabela B.213: Resultados do Caso 7 referente aos nós T_1 , T_2 , T_3 e T_5 para o circuito 2.

	PSO									BA										
	S_{R_1}	S_{R_2}	S_{R_3}	S_{R_4}	S_{R_5}	S_{R_6}	S_{C_1}	S_{C_2}	S_{C_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}	S_{C_3}		
SF	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
F_{R_1}	68	0	0	0	0	0	0	0	0	68	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
F_{R_2}	0	81	0	0	0	0	0	0	0	0	81	0	0	0	0	0	0	0	0	
F_{R_3}	0	0	74	0	0	0	0	0	0	0	0	74	0	0	0	0	0	0	0	
F_{R_4}	0	0	0	82	0	0	0	0	0	0	0	0	82	0	0	0	0	0	0	
F_{R_5}	0	0	0	0	55	0	0	0	0	0	0	0	0	55	0	0	0	0	0	
F_{R_6}	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
F_{R_7}	0	0	0	0	0	81	0	0	0	0	0	0	0	0	81	0	0	0	0	
F_{C_1}	0	0	0	0	0	0	83	0	0	0	0	0	0	0	0	83	0	0	0	
F_{C_2}	0	0	0	0	0	0	0	67	0	0	0	0	0	0	0	0	67	0	0	
F_{C_3}	0	0	0	0	0	0	0	0	37	0	0	0	0	0	0	0	0	37	0	0

B.9.16 Nós T_1, T_2 e T_3

Tabela B.264: Resultados do Caso 9 referente aos nós T_1, T_2 e T_3 para o circuito 2.

Table with 18 columns (SF, FR1, FR2, FR3, FR4, FR5, FR6, FR7, FC1, FC2, FC3) and 3 sub-headers (PSO, BA). Values range from 0 to 100.

B.9.17 Nós T_1, T_2 e T_4

Tabela B.265: Resultados do Caso 9 referente aos nós T_1, T_2 e T_4 para o circuito 2.

Table with 18 columns (SF, FR1, FR2, FR3, FR4, FR5, FR6, FR7, FC1, FC2, FC3) and 3 sub-headers (PSO, BA). Values range from 0 to 100.

B.9.18 Nós T_1, T_2 e T_5

Tabela B.266: Resultados do Caso 9 referente aos nós T_1, T_2 e T_5 para o circuito 2.

Table with 18 columns (SF, FR1, FR2, FR3, FR4, FR5, FR6, FR7, FC1, FC2, FC3) and 3 sub-headers (PSO, BA). Values range from 0 to 100.

B.9.19 Nós T_1, T_3 e T_4

Tabela B.267: Resultados do Caso 9 referente aos nós T_1, T_3 e T_4 para o circuito 2.

Table with 18 columns (SF, FR1, FR2, FR3, FR4, FR5, FR6, FR7, FC1, FC2, FC3) and 3 sub-headers (PSO, BA). Values range from 0 to 100.

B.9.20 Nós T_1, T_3 e T_5

Tabela B.268: Resultados do Caso 9 referente aos nós T_1, T_3 e T_5 para o circuito 2.

Table with 18 columns (SF, FR1, FR2, FR3, FR4, FR5, FR6, FR7, FC1, FC2, FC3) and 3 sub-headers (PSO, BA). Values range from 0 to 100.

B.10.25 Nós T₃, T₄ e T₅

Tabela B.304: Resultados do Caso 10 referente aos nós T₃, T₄ e T₅ para o circuito 2.

Table with 20 columns (SF, FR3, FR2, FR3, FR4, FR5, FR6, FR7, FC1, FC2, FC3) and 20 columns for PSO and BA methods. Data values are 0 or 100, with some non-zero values in the FR3, FC1, FC2, and FC3 rows.

B.10.26 Nós T₁, T₂, T₃ e T₄

Tabela B.305: Resultados do Caso 10 referente aos nós T₁, T₂, T₃ e T₄ para o circuito 2.

Table with 20 columns (SF, FR3, FR2, FR3, FR4, FR5, FR6, FR7, FC1, FC2, FC3) and 20 columns for PSO and BA methods. Data values are 0, 24, 36, 49, 76, 83, 100, or 16.

B.10.27 Nós T₁, T₂, T₃ e T₅

Tabela B.306: Resultados do Caso 10 referente aos nós T₁, T₂, T₃ e T₅ para o circuito 2.

Table with 20 columns (SF, FR3, FR2, FR3, FR4, FR5, FR6, FR7, FC1, FC2, FC3) and 20 columns for PSO and BA methods. Data values are 0, 27, 32, 49, 74, 89, 100, or 22.

B.10.28 Nós T₁, T₂, T₄ e T₅

Tabela B.307: Resultados do Caso 10 referente aos nós T₁, T₂, T₄ e T₅ para o circuito 2.

Table with 20 columns (SF, FR3, FR2, FR3, FR4, FR5, FR6, FR7, FC1, FC2, FC3) and 20 columns for PSO and BA methods. Data values are 0, 33, 34, 25, 83, 76, 87, 28, 100, or 23.

B.10.29 Nós T₁, T₃, T₄ e T₅

Tabela B.308: Resultados do Caso 10 referente aos nós T₁, T₃, T₄ e T₅ para o circuito 2.

Table with 20 columns (SF, FR3, FR2, FR3, FR4, FR5, FR6, FR7, FC1, FC2, FC3) and 20 columns for PSO and BA methods. Data values are 0, 72, 87, 37, 73, 30, 40, 26, 100, or 18.

B.10.30 Nós T_2, T_3, T_4 e T_5

Tabela B.309: Resultados do Caso 10 referente aos nós T_2, T_3, T_4 e T_5 para o circuito 2.

Table with 22 columns (SF, FR1, FR2, FR3, FR4, FR5, FR6, FR7, FC1, FC2, FC3) and 33 rows. Columns are grouped into PSO and BA. Values are numerical, mostly 0 or 100.

B.10.31 Nós T_1, T_2, T_3, T_4 e T_5

Tabela B.310: Resultados do Caso 10 referente aos nós $T_1 - T_5$ para o circuito 2.

Table with 22 columns (SF, FR1, FR2, FR3, FR4, FR5, FR6, FR7, FC1, FC2, FC3) and 33 rows. Columns are grouped into PSO and BA. Values are numerical, mostly 0 or 100.

B.11 Caso 11: Falha em C_3

B.11.1 Nó T_1

Tabela B.311: Resultados do Caso 11 referente ao nó T_1 para o circuito 2.

Table with 22 columns (SF, FR1, FR2, FR3, FR4, FR5, FR6, FR7, FC1, FC2, FC3) and 33 rows. Columns are grouped into PSO and BA. Values are numerical, mostly 0 or 100.

B.11.2 Nó T_2

Tabela B.312: Resultados do Caso 11 referente ao nó T_2 para o circuito 2.

Table with 22 columns (SF, FR1, FR2, FR3, FR4, FR5, FR6, FR7, FC1, FC2, FC3) and 33 rows. Columns are grouped into PSO and BA. Values are numerical, mostly 0 or 100.

B.11.3 Nó T_3

Tabela B.313: Resultados do Caso 11 referente ao nó T_3 para o circuito 2.

Table with 22 columns (SF, FR1, FR2, FR3, FR4, FR5, FR6, FR7, FC1, FC2, FC3) and 33 rows. Columns are grouped into PSO and BA. Values are numerical, mostly 0 or 100.

B.11.4 Nó T_4

Tabela B.314: Resultados do Caso 11 referente ao nó T_4 para o circuito 2.

	PSO									BA											
	S_{R_1}	S_{R_2}	S_{R_3}	S_{R_4}	S_{R_5}	S_{R_6}	S_{R_7}	S_{C_1}	S_{C_2}	S_{C_3}	S_{R_1}	S_{R_2}	S_{R_3}	S_{R_4}	S_{R_5}	S_{R_6}	S_{R_7}	S_{C_1}	S_{C_2}	S_{C_3}	
SF	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F_{R_3}	67	0	0	0	0	0	0	0	0	0	57	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F_{R_2}	0	56	0	0	0	0	0	0	0	0	0	48	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F_{R_3}	0	0	92	0	0	0	0	0	0	0	0	0	51	0	0	0	0	0	0	0	0
F_{R_4}	0	0	0	86	0	0	0	0	0	0	0	0	0	67	0	0	0	0	0	0	0
F_{R_5}	0	0	0	0	92	0	0	0	0	0	0	0	0	51	0	0	0	0	0	0	0
F_{R_6}	0	0	0	0	0	82	0	0	0	0	0	0	0	0	56	0	0	0	0	0	0
F_{R_7}	0	0	0	0	0	0	91	0	0	0	0	0	0	0	0	48	0	0	0	0	0
F_{C_1}	0	0	0	0	0	0	0	92	0	0	0	0	0	0	0	0	48	0	59	0	0
F_{C_2}	0	0	0	0	0	0	0	0	77	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	61	0
F_{C_3}	99	100	98	100	97	99	99	97	99	100	99	100	98	100	100	100	100	100	100	100	100

B.11.5 Nó T_5

Tabela B.315: Resultados do Caso 11 referente ao nó T_5 para o circuito 2.

	PSO									BA											
	S_{R_1}	S_{R_2}	S_{R_3}	S_{R_4}	S_{R_5}	S_{R_6}	S_{R_7}	S_{C_1}	S_{C_2}	S_{C_3}	S_{R_1}	S_{R_2}	S_{R_3}	S_{R_4}	S_{R_5}	S_{R_6}	S_{R_7}	S_{C_1}	S_{C_2}	S_{C_3}	
SF	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	3	0	0	0	0	0	0
F_{R_3}	74	0	0	0	0	0	0	0	0	0	51	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F_{R_2}	0	76	0	0	0	0	0	0	0	0	0	57	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F_{R_3}	0	0	91	0	0	0	0	0	0	0	0	0	55	0	0	0	0	0	0	0	0
F_{R_4}	0	0	0	91	0	0	0	0	0	0	0	0	0	59	0	0	0	0	0	0	0
F_{R_5}	0	0	0	0	88	0	0	0	0	0	0	0	0	49	0	0	0	0	0	0	0
F_{R_6}	0	0	0	0	0	62	0	0	0	0	0	0	0	0	51	0	0	0	0	0	0
F_{R_7}	0	0	0	0	0	0	66	0	0	0	0	0	0	0	0	50	0	0	0	0	0
F_{C_1}	0	0	0	0	0	0	0	90	0	0	0	0	0	0	0	0	0	53	0	0	0
F_{C_2}	0	0	0	0	0	0	0	0	84	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	62	0
F_{C_3}	100	100	99	100	96	99	100	97	98	100	100	100	99	100	96	99	100	100	100	100	100

B.11.6 Nós T_1 e T_2

Tabela B.316: Resultados do Caso 11 referente aos nós T_1 e T_2 para o circuito 2.

	PSO									BA										
	S_{R_1}	S_{R_2}	S_{R_3}	S_{R_4}	S_{R_5}	S_{R_6}	S_{R_7}	S_{C_1}	S_{C_2}	S_{C_3}	S_{R_1}	S_{R_2}	S_{R_3}	S_{R_4}	S_{R_5}	S_{R_6}	S_{R_7}	S_{C_1}	S_{C_2}	S_{C_3}
SF	5	1	2	0	0	1	0	0	0	3	5	1	2	0	0	1	0	0	0	3
F_{R_3}	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F_{R_2}	0	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18	0	0	0	0	0	0	0	0
F_{R_3}	0	0	22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	22	0	0	0	0	0	0	0
F_{R_4}	0	0	0	99	0	0	0	0	0	0	0	0	0	99	0	0	0	0	0	0
F_{R_5}	0	0	0	0	96	0	0	0	0	0	0	0	0	96	0	0	0	0	0	0
F_{R_6}	0	0	0	0	0	95	0	0	0	0	0	0	0	0	95	0	0	0	0	0
F_{R_7}	0	0	0	0	0	0	98	0	0	0	0	0	0	0	0	98	0	0	0	0
F_{C_1}	0	0	0	0	0	0	0	19	0	0	0	0	0	0	0	0	19	0	0	0
F_{C_2}	0	0	0	0	0	0	0	0	98	0	0	0	0	0	0	0	0	0	98	0
F_{C_3}	95	99	98	98	96	98	98	99	100	97	95	99	98	98	96	98	98	99	100	97

B.11.7 Nós T_1 e T_3

Tabela B.317: Resultados do Caso 11 referente aos nós T_1 e T_3 para o circuito 2.

	PSO									BA										
	S_{R_1}	S_{R_2}	S_{R_3}	S_{R_4}	S_{R_5}	S_{R_6}	S_{R_7}	S_{C_1}	S_{C_2}	S_{C_3}	S_{R_1}	S_{R_2}	S_{R_3}	S_{R_4}	S_{R_5}	S_{R_6}	S_{R_7}	S_{C_1}	S_{C_2}	S_{C_3}
SF	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F_{R_3}	84	0	0	0	0	0	0	0	0	0	84	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F_{R_2}	0	67	0	0	0	0	0	0	0	0	0	67	0	0	0	0	0	0	0	0
F_{R_3}	0	0	54	0	0	0	0	0	0	0	0	0	54	0	0	0	0	0	0	0
F_{R_4}	0	0	0	86	0	0	0	0	0	0	0	0	0	86	0	0	0	0	0	0
F_{R_5}	0	0	0	0	82	0	0	0	0	0	0	0	0	0	82	0	0	0	0	0
F_{R_6}	0	0	0	0	0	66	0	0	0	0	0	0	0	0	66	0	0	0	0	0
F_{R_7}	0	0	0	0	0	0	77	0	0	0	0	0	0	0	0	77	0	0	0	0
F_{C_1}	0	0	0	0	0	0	0	46	0	0	0	0	0	0	0	0	46	0	0	0
F_{C_2}	0	0	0	0	0	0	0	0	57	0	0	0	0	0	0	0	0	0	57	0
F_{C_3}	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

B.11.8 Nós T_1 e T_4

Tabela B.318: Resultados do Caso 11 referente aos nós T_1 e T_4 para o circuito 2.

	PSO									BA										
	S_{R_1}	S_{R_2}	S_{R_3}	S_{R_4}	S_{R_5}	S_{R_6}	S_{R_7}	S_{C_1}	S_{C_2}	S_{C_3}	S_{R_1}	S_{R_2}	S_{R_3}	S_{R_4}	S_{R_5}	S_{R_6}	S_{R_7}	S_{C_1}	S_{C_2}	S_{C_3}
SF	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F_{R_3}	67	0	0	0	0	0	0	0	0	0	67	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F_{R_2}	0	50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	50	0	0	0	0	0	0	0	0
F_{R_3}	0	0	48	0	0	0	0	0	0	0	0	0	48	0	0	0	0	0	0	0
F_{R_4}	0	0	0	76	0	0	0	0	0	0	0	0	0	76	0	0	0	0	0	0
F_{R_5}	0	0	0	0	94	0	0	0	0	0	0	0	0	94	0	0	0	0	0	0
F_{R_6}	0	0	0	0	0	74	0	0	0	0	0	0	0	0	74	0	0	0	0	0
F_{R_7}	0	0	0	0	0	0	89	0	0	0	0	0	0	0	0	89	0	0	0	0
F_{C_1}	0	0	0	0	0	0	0	60	0	0	0	0	0	0	0	0	60	0	0	0
F_{C_2}	0	0	0	0	0	0	0	0	75	0	0	0	0	0	0	0	0	75	0	0
F_{C_3}	100	100	100	100	97	100	100	100	100	100	100	100	100	97	100	100	100	100	100	100

B.11.9 Nós T_1 e T_5

Tabela B.319: Resultados do Caso 11 referente aos nós T_1 e T_5 para o circuito 2.

	PSO									BA										
	S_{R_1}	S_{R_2}	S_{R_3}	S_{R_4}	S_{R_5}	S_{R_6}	S_{R_7}	S_{C_1}	S_{C_2}	S_{C_3}	S_{R_1}	S_{R_2}	S_{R_3}	S_{R_4}	S_{R_5}	S_{R_6}	S_{R_7}	S_{C_1}	S_{C_2}	S_{C_3}
SF	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F_{R_1}	77	0	0	0	0	0	0	0	0	0	77	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F_{R_2}	0	71	0	0	0	0	0	0	0	0	0	71	0	0	0	0	0	0	0	0
F_{R_3}	0	0	68	0	0	0	0	0	0	0	0	0	68	0	0	0	0	0	0	0
F_{R_4}	0	0	0	91	0	0	0	0	0	0	0	0	0	91	0	0	0	0	0	0
F_{R_5}	0	0	0	0	92	0	0	0	0	0	0	0	0	92	0	0	0	0	0	0
F_{R_6}	0	0	0	0	0	50	0	0	0	0	0	0	0	0	50	0	0	0	0	0
F_{R_7}	0	0	0	0	0	0	60	0	0	0	0	0	0	0	0	60	0	0	0	0
F_{C_1}	0	0	0	0	0	0	0	76	0	0	0	0	0	0	0	0	76	0	0	0
F_{C_2}	0	0	0	0	0	0	0	0	77	0	0	0	0	0	0	0	0	77	0	0
F_{C_3}	100	100	99	100	97	99	100	100	100	100	100	100	99	100	97	99	100	100	100	100

B.11.10 Nós T_2 e T_3

Tabela B.320: Resultados do Caso 11 referente aos nós T_2 e T_3 para o circuito 2.

	PSO									BA										
	S_{R_1}	S_{R_2}	S_{R_3}	S_{R_4}	S_{R_5}	S_{R_6}	S_{R_7}	S_{C_1}	S_{C_2}	S_{C_3}	S_{R_1}	S_{R_2}	S_{R_3}	S_{R_4}	S_{R_5}	S_{R_6}	S_{R_7}	S_{C_1}	S_{C_2}	S_{C_3}
SF	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F_{R_1}	37	0	0	0	0	0	0	0	0	0	37	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F_{R_2}	0	39	0	0	0	0	0	0	0	0	0	39	0	0	0	0	0	0	0	0
F_{R_3}	0	0	31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	31	0	0	0	0	0	0	0
F_{R_4}	0	0	0	79	0	0	0	0	0	0	0	0	0	79	0	0	0	0	0	0
F_{R_5}	0	0	0	0	80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	80	0	0	0	0	0
F_{R_6}	0	0	0	0	0	73	0	0	0	0	0	0	0	0	0	73	0	0	0	0
F_{R_7}	0	0	0	0	0	0	68	0	0	0	0	0	0	0	0	0	68	0	0	0
F_{C_1}	0	0	0	0	0	0	0	31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	31	0	0
F_{C_2}	0	0	0	0	0	0	0	0	32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	32	0
F_{C_3}	100	100	100	100	100	99	100	100	100	100	100	100	100	100	99	100	100	100	100	100

B.11.11 Nós T_2 e T_4

Tabela B.321: Resultados do Caso 11 referente aos nós T_2 e T_4 para o circuito 2.

	PSO									BA										
	S_{R_1}	S_{R_2}	S_{R_3}	S_{R_4}	S_{R_5}	S_{R_6}	S_{R_7}	S_{C_1}	S_{C_2}	S_{C_3}	S_{R_1}	S_{R_2}	S_{R_3}	S_{R_4}	S_{R_5}	S_{R_6}	S_{R_7}	S_{C_1}	S_{C_2}	S_{C_3}
SF	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F_{R_1}	34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	34	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F_{R_2}	0	37	0	0	0	0	0	0	0	0	0	37	0	0	0	0	0	0	0	0
F_{R_3}	0	0	31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	31	0	0	0	0	0	0	0
F_{R_4}	0	0	0	58	0	0	0	0	0	0	0	0	0	58	0	0	0	0	0	0
F_{R_5}	0	0	0	0	81	0	0	0	0	0	0	0	0	0	81	0	0	0	0	0
F_{R_6}	0	0	0	0	0	73	0	0	0	0	0	0	0	0	0	73	0	0	0	0
F_{R_7}	0	0	0	0	0	0	83	0	0	0	0	0	0	0	0	0	83	0	0	0
F_{C_1}	0	0	0	0	0	0	0	35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	35	0	0
F_{C_2}	0	0	0	0	0	0	0	0	40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	40	0
F_{C_3}	100	100	100	100	99	98	100	100	100	100	100	100	100	99	98	100	100	100	100	100

B.11.12 Nós T_2 e T_5

Tabela B.322: Resultados do Caso 11 referente aos nós T_2 e T_5 para o circuito 2.

	PSO									BA										
	S_{R_1}	S_{R_2}	S_{R_3}	S_{R_4}	S_{R_5}	S_{R_6}	S_{R_7}	S_{C_1}	S_{C_2}	S_{C_3}	S_{R_1}	S_{R_2}	S_{R_3}	S_{R_4}	S_{R_5}	S_{R_6}	S_{R_7}	S_{C_1}	S_{C_2}	S_{C_3}
SF	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F_{R_1}	46	0	0	0	0	0	0	0	0	0	46	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F_{R_2}	0	45	0	0	0	0	0	0	0	0	0	45	0	0	0	0	0	0	0	0
F_{R_3}	0	0	68	0	0	0	0	0	0	0	0	0	68	0	0	0	0	0	0	0
F_{R_4}	0	0	0	90	0	0	0	0	0	0	0	0	0	90	0	0	0	0	0	0
F_{R_5}	0	0	0	0	94	0	0	0	0	0	0	0	0	0	94	0	0	0	0	0
F_{R_6}	0	0	0	0	0	36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	36	0	0	0	0
F_{R_7}	0	0	0	0	0	0	54	0	0	0	0	0	0	0	0	0	54	0	0	0
F_{C_1}	0	0	0	0	0	0	0	63	0	0	0	0	0	0	0	0	0	63	0	0
F_{C_2}	0	0	0	0	0	0	0	0	80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	80	0
F_{C_3}	100	100	100	100	95	100	100	100	100	100	100	100	100	95	100	100	100	100	100	100

B.11.13 Nós T_3 e T_4

Tabela B.323: Resultados do Caso 11 referente aos nós T_3 e T_4 para o circuito 2.

	PSO									BA										
	S_{R_1}	S_{R_2}	S_{R_3}	S_{R_4}	S_{R_5}	S_{R_6}	S_{R_7}	S_{C_1}	S_{C_2}	S_{C_3}	S_{R_1}	S_{R_2}	S_{R_3}	S_{R_4}	S_{R_5}	S_{R_6}	S_{R_7}	S_{C_1}	S_{C_2}	S_{C_3}
SF	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F_{R_1}	58	0	0	0	0	0	0	0	0	0	48	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F_{R_2}	0	56	0	0	0	0	0	0	0	0	0	44	0	0	0	0	0	0	0	0
F_{R_3}	0	0	85	0	0	0	0	0	0	0	0	0	51	0	0	0	0	0	0	0
F_{R_4}	0	0	0	86	0	0	0	0	0	0	0	0	0	46	0	0	0	0	0	0
F_{R_5}	0	0	0	0	82	0	0	0	0	0	0	0	0	0	47	0	0	0	0	0
F_{R_6}	0	0	0	0	0	66	0	0	0	0	0	0	0	0	0	59	0	0	0	0
F_{R_7}	0	0	0	0	0	0	78	0	0	0	0	0	0	0	0	0	49	0	0	0
F_{C_1}	0	0	0	0	0	0	0	83	0	0	0	0	0	0	0	0	0	45	0	0
F_{C_2}	0	0	0	0	0	0	0	0	73	0	0	0	0	0	0	0	0	0	50	0
F_{C_3}	99	100	100	100	99	100	100	98	99	100	100	100	100	99	100	100	100	100	99	100

B.11.14 Nós T_3 e T_5

Tabela B.324: Resultados do Caso 11 referente aos nós T_3 e T_5 para o circuito 2.

	PSO									BA										
	S_{R_1}	S_{R_2}	S_{R_3}	S_{R_4}	S_{R_5}	S_{R_6}	S_{R_7}	S_{C_1}	S_{C_2}	S_{C_3}	S_{R_1}	S_{R_2}	S_{R_3}	S_{R_4}	S_{R_5}	S_{R_6}	S_{R_7}	S_{C_1}	S_{C_2}	S_{C_3}
SF	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F_{R_3}	62	0	0	0	0	0	0	0	0	0	49	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F_{R_2}	0	60	0	0	0	0	0	0	0	0	0	37	0	0	0	0	0	0	0	0
F_{R_5}	0	0	88	0	0	0	0	0	0	0	0	0	55	0	0	0	0	0	0	0
F_{R_4}	0	0	0	81	0	0	0	0	0	0	0	0	0	41	0	0	0	0	0	0
F_{R_6}	0	0	0	0	83	0	0	0	0	0	0	0	0	44	0	0	0	0	0	0
F_{R_7}	0	0	0	0	0	38	0	0	0	0	0	0	0	0	55	0	0	0	0	0
F_{C_1}	0	0	0	0	0	0	38	0	0	0	0	0	0	0	0	41	0	0	0	0
F_{C_2}	0	0	0	0	0	0	0	83	0	0	0	0	0	0	0	0	47	0	0	0
F_{C_3}	0	0	0	0	0	0	0	0	64	0	0	0	0	0	0	0	0	51	0	0
F_{C_3}	100	100	100	100	99	100	100	99	100	100	100	100	100	99	100	100	99	100	100	100

B.11.15 Nós T_4 e T_5

Tabela B.325: Resultados do Caso 11 referente aos nós T_4 e T_5 para o circuito 2.

	PSO									BA										
	S_{R_1}	S_{R_2}	S_{R_3}	S_{R_4}	S_{R_5}	S_{R_6}	S_{R_7}	S_{C_1}	S_{C_2}	S_{C_3}	S_{R_1}	S_{R_2}	S_{R_3}	S_{R_4}	S_{R_5}	S_{R_6}	S_{R_7}	S_{C_1}	S_{C_2}	S_{C_3}
SF	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0
F_{R_3}	70	0	0	0	0	0	0	0	0	0	47	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F_{R_2}	0	79	0	0	0	0	0	0	0	0	0	50	0	0	0	0	0	0	0	0
F_{R_5}	0	0	92	0	0	0	0	0	0	0	0	0	51	0	0	0	0	0	0	0
F_{R_4}	0	0	0	84	0	0	0	0	0	0	0	0	0	44	0	0	0	0	0	0
F_{R_6}	0	0	0	0	96	0	0	0	0	0	0	0	0	47	0	0	0	0	0	0
F_{R_7}	0	0	0	0	0	46	0	0	0	0	0	0	0	0	49	0	0	0	0	0
F_{C_1}	0	0	0	0	0	0	51	0	0	0	0	0	0	0	0	47	0	0	0	0
F_{C_2}	0	0	0	0	0	0	0	87	0	0	0	0	0	0	0	0	44	0	0	0
F_{C_3}	0	0	0	0	0	0	0	0	73	0	0	0	0	0	0	0	0	42	0	0
F_{C_3}	99	100	95	99	95	100	100	99	100	100	99	100	100	99	100	100	99	100	100	100

B.11.16 Nós T_1 , T_2 e T_3

Tabela B.326: Resultados do Caso 11 referente aos nós T_1 , T_2 e T_3 para o circuito 2.

	PSO									BA										
	S_{R_1}	S_{R_2}	S_{R_3}	S_{R_4}	S_{R_5}	S_{R_6}	S_{R_7}	S_{C_1}	S_{C_2}	S_{C_3}	S_{R_1}	S_{R_2}	S_{R_3}	S_{R_4}	S_{R_5}	S_{R_6}	S_{R_7}	S_{C_1}	S_{C_2}	S_{C_3}
SF	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F_{R_3}	34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	34	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F_{R_2}	0	42	0	0	0	0	0	0	0	0	0	42	0	0	0	0	0	0	0	0
F_{R_5}	0	0	28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	28	0	0	0	0	0	0	0
F_{R_4}	0	0	0	74	0	0	0	0	0	0	0	0	0	74	0	0	0	0	0	0
F_{R_6}	0	0	0	0	81	0	0	0	0	0	0	0	0	81	0	0	0	0	0	0
F_{R_7}	0	0	0	0	0	69	0	0	0	0	0	0	0	0	69	0	0	0	0	0
F_{C_1}	0	0	0	0	0	0	73	0	0	0	0	0	0	0	0	73	0	0	0	0
F_{C_2}	0	0	0	0	0	0	0	34	0	0	0	0	0	0	0	0	34	0	0	0
F_{C_3}	0	0	0	0	0	0	0	0	28	0	0	0	0	0	0	0	0	28	0	0
F_{C_3}	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

B.11.17 Nós T_1 , T_2 e T_4

Tabela B.327: Resultados do Caso 11 referente aos nós T_1 , T_2 e T_4 para o circuito 2.

	PSO									BA										
	S_{R_1}	S_{R_2}	S_{R_3}	S_{R_4}	S_{R_5}	S_{R_6}	S_{R_7}	S_{C_1}	S_{C_2}	S_{C_3}	S_{R_1}	S_{R_2}	S_{R_3}	S_{R_4}	S_{R_5}	S_{R_6}	S_{R_7}	S_{C_1}	S_{C_2}	S_{C_3}
SF	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F_{R_3}	37	0	0	0	0	0	0	0	0	0	37	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F_{R_2}	0	31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	31	0	0	0	0	0	0	0	0
F_{R_5}	0	0	24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	24	0	0	0	0	0	0	0
F_{R_4}	0	0	0	66	0	0	0	0	0	0	0	0	0	66	0	0	0	0	0	0
F_{R_6}	0	0	0	0	88	0	0	0	0	0	0	0	0	88	0	0	0	0	0	0
F_{R_7}	0	0	0	0	0	81	0	0	0	0	0	0	0	0	81	0	0	0	0	0
F_{C_1}	0	0	0	0	0	0	88	0	0	0	0	0	0	0	0	88	0	0	0	0
F_{C_2}	0	0	0	0	0	0	0	34	0	0	0	0	0	0	0	0	34	0	0	0
F_{C_3}	0	0	0	0	0	0	0	0	47	0	0	0	0	0	0	0	0	47	0	0
F_{C_3}	100	100	100	100	96	98	100	99	100	100	100	100	100	96	98	100	99	100	100	100

B.11.18 Nós T_1 , T_2 e T_5

Tabela B.328: Resultados do Caso 11 referente aos nós T_1 , T_2 e T_5 para o circuito 2.

	PSO									BA										
	S_{R_1}	S_{R_2}	S_{R_3}	S_{R_4}	S_{R_5}	S_{R_6}	S_{R_7}	S_{C_1}	S_{C_2}	S_{C_3}	S_{R_1}	S_{R_2}	S_{R_3}	S_{R_4}	S_{R_5}	S_{R_6}	S_{R_7}	S_{C_1}	S_{C_2}	S_{C_3}
SF	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F_{R_3}	47	0	0	0	0	0	0	0	0	0	47	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F_{R_2}	0	56	0	0	0	0	0	0	0	0	0	56	0	0	0	0	0	0	0	0
F_{R_5}	0	0	54	0	0	0	0	0	0	0	0	0	54	0	0	0	0	0	0	0
F_{R_4}	0	0	0	94	0	0	0	0	0	0	0	0	0	94	0	0	0	0	0	0
F_{R_6}	0	0	0	0	89	0	0	0	0	0	0	0	0	89	0	0	0	0	0	0
F_{R_7}	0	0	0	0	0	46	0	0	0	0	0	0	0	0	46	0	0	0	0	0
F_{C_1}	0	0	0	0	0	0	50	0	0	0	0	0	0	0	0	50	0	0	0	0
F_{C_2}	0	0	0	0	0	0	0	49	0	0	0	0	0	0	0	0	49	0	0	0
F_{C_3}	0	0	0	0	0	0	0	0	72	0	0	0	0	0	0	0	0	72	0	0
F_{C_3}	100	100	100	100	94	100	100	100	100	100	100	100	100	94	100	100	100	100	100	100

B.11.19 N3s T₁, T₃ e T₄

Tabela B.329: Resultados do Caso 11 referente aos n3s T₁, T₃ e T₄ para o circuito 2.

Table with 19 columns (SF, FR3, FR2, FR3, FR4, FR5, FR6, FR7, FC1, FC2, FC3) and 20 rows. Columns are grouped into PSO and BA. Values range from 0 to 100.

B.11.20 N3s T₁, T₃ e T₅

Tabela B.330: Resultados do Caso 11 referente aos n3s T₁, T₃ e T₅ para o circuito 2.

Table with 19 columns (SF, FR3, FR2, FR3, FR4, FR5, FR6, FR7, FC1, FC2, FC3) and 20 rows. Columns are grouped into PSO and BA. Values range from 0 to 100.

B.11.21 N3s T₁, T₄ e T₅

Tabela B.331: Resultados do Caso 11 referente aos n3s T₁, T₄ e T₅ para o circuito 2.

Table with 19 columns (SF, FR3, FR2, FR3, FR4, FR5, FR6, FR7, FC1, FC2, FC3) and 20 rows. Columns are grouped into PSO and BA. Values range from 0 to 100.

B.11.22 N3s T₂, T₃ e T₄

Tabela B.332: Resultados do Caso 11 referente aos n3s T₂, T₃ e T₄ para o circuito 2.

Table with 19 columns (SF, FR3, FR2, FR3, FR4, FR5, FR6, FR7, FC1, FC2, FC3) and 20 rows. Columns are grouped into PSO and BA. Values range from 0 to 100.

B.11.23 N3s T₂, T₃ e T₅

Tabela B.333: Resultados do Caso 11 referente aos n3s T₂, T₃ e T₅ para o circuito 2.

Table with 19 columns (SF, FR3, FR2, FR3, FR4, FR5, FR6, FR7, FC1, FC2, FC3) and 20 rows. Columns are grouped into PSO and BA. Values range from 0 to 100.

B.11.24 N3s T_2, T_4 e T_5

Tabela B.334: Resultados do Caso 11 referente aos n3s T_2, T_4 e T_5 para o circuito 2.

Table with 19 columns: SF, FR1, FR2, FR3, FR4, FR5, FR6, FR7, FC1, FC2, FC3, SR1, SR2, SR3, SR4, SR5, SR6, SC1, SC2, SC3. Rows represent different components and their values for PSO and BA algorithms.

B.11.25 N3s T_3, T_4 e T_5

Tabela B.335: Resultados do Caso 11 referente aos n3s T_3, T_4 e T_5 para o circuito 2.

Table with 19 columns: SF, FR1, FR2, FR3, FR4, FR5, FR6, FR7, FC1, FC2, FC3, SR1, SR2, SR3, SR4, SR5, SR6, SC1, SC2, SC3. Rows represent different components and their values for PSO and BA algorithms.

B.11.26 N3s T_1, T_2, T_3 e T_4

Tabela B.336: Resultados do Caso 11 referente aos n3s T_1, T_2, T_3 e T_4 para o circuito 2.

Table with 19 columns: SF, FR1, FR2, FR3, FR4, FR5, FR6, FR7, FC1, FC2, FC3, SR1, SR2, SR3, SR4, SR5, SR6, SC1, SC2, SC3. Rows represent different components and their values for PSO and BA algorithms.

B.11.27 N3s T_1, T_2, T_3 e T_5

Tabela B.337: Resultados do Caso 11 referente aos n3s T_1, T_2, T_3 e T_5 para o circuito 2.

Table with 19 columns: SF, FR1, FR2, FR3, FR4, FR5, FR6, FR7, FC1, FC2, FC3, SR1, SR2, SR3, SR4, SR5, SR6, SC1, SC2, SC3. Rows represent different components and their values for PSO and BA algorithms.

B.11.28 N3s T_1, T_2, T_4 e T_5

Tabela B.338: Resultados do Caso 11 referente aos n3s T_1, T_2, T_4 e T_5 para o circuito 2.

Table with 19 columns: SF, FR1, FR2, FR3, FR4, FR5, FR6, FR7, FC1, FC2, FC3, SR1, SR2, SR3, SR4, SR5, SR6, SC1, SC2, SC3. Rows represent different components and their values for PSO and BA algorithms.

B.11.29 Nós T_1, T_3, T_4 e T_5

Tabela B.339: Resultados do Caso 11 referente aos nós T_1, T_3, T_4 e T_5 para o circuito 2.

	PSO									BA											
	S_{R_1}	S_{R_2}	S_{R_3}	S_{R_4}	S_{R_5}	S_{R_6}	S_{R_7}	S_{C_1}	S_{C_2}	S_{C_3}	S_{R_1}	S_{R_2}	S_{R_3}	S_{R_4}	S_{R_5}	S_{R_6}	S_{R_7}	S_{C_1}	S_{C_2}	S_{C_3}	
SF	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
F_{R_1}	61	0	0	0	0	0	0	0	0	0	36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F_{R_2}	0	59	0	0	0	0	0	0	0	0	0	32	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F_{R_3}	0	0	74	0	0	0	0	0	0	0	0	0	40	0	0	0	0	0	0	0	0
F_{R_4}	0	0	0	84	0	0	0	0	0	0	0	0	0	38	0	0	0	0	0	0	0
F_{R_5}	0	0	0	0	88	0	0	0	0	0	0	0	0	0	35	0	0	0	0	0	0
F_{R_6}	0	0	0	0	0	40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	29	0	0	0	0	0
F_{R_7}	0	0	0	0	0	0	39	0	0	0	0	0	0	0	0	0	31	0	0	0	0
F_{C_1}	0	0	0	0	0	0	0	76	0	0	0	0	0	0	0	0	0	40	0	0	0
F_{C_2}	0	0	0	0	0	0	0	0	60	0	0	0	0	0	0	0	0	0	35	0	0
F_{C_3}	100	100	100	100	97	100	100	100	100	100	100	100	100	100	98	100	100	100	100	100	100

B.11.30 Nós T_2, T_3, T_4 e T_5

Tabela B.340: Resultados do Caso 11 referente aos nós T_2, T_3, T_4 e T_5 para o circuito 2.

	PSO									BA											
	S_{R_1}	S_{R_2}	S_{R_3}	S_{R_4}	S_{R_5}	S_{R_6}	S_{R_7}	S_{C_1}	S_{C_2}	S_{C_3}	S_{R_1}	S_{R_2}	S_{R_3}	S_{R_4}	S_{R_5}	S_{R_6}	S_{R_7}	S_{C_1}	S_{C_2}	S_{C_3}	
SF	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F_{R_1}	63	0	0	0	0	0	0	0	0	0	34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F_{R_2}	0	75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	28	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F_{R_3}	0	0	76	0	0	0	0	0	0	0	0	0	35	0	0	0	0	0	0	0	0
F_{R_4}	0	0	0	84	0	0	0	0	0	0	0	0	0	37	0	0	0	0	0	0	0
F_{R_5}	0	0	0	0	92	0	0	0	0	0	0	0	0	0	41	0	0	0	0	0	0
F_{R_6}	0	0	0	0	0	55	0	0	0	0	0	0	0	0	0	28	0	0	0	0	0
F_{R_7}	0	0	0	0	0	0	56	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25	0	0	0	0
F_{C_1}	0	0	0	0	0	0	0	79	0	0	0	0	0	0	0	0	0	42	0	0	0
F_{C_2}	0	0	0	0	0	0	0	0	62	0	0	0	0	0	0	0	0	0	31	0	0
F_{C_3}	100	100	99	100	97	100	100	100	100	100	100	100	99	100	97	100	100	100	100	100	100

B.11.31 Nós T_1, T_2, T_3, T_4 e T_5

Tabela B.341: Resultados do Caso 11 referente aos nós $T_1 - T_5$ para o circuito 2.

	PSO									BA											
	S_{R_1}	S_{R_2}	S_{R_3}	S_{R_4}	S_{R_5}	S_{R_6}	S_{R_7}	S_{C_1}	S_{C_2}	S_{C_3}	S_{R_1}	S_{R_2}	S_{R_3}	S_{R_4}	S_{R_5}	S_{R_6}	S_{R_7}	S_{C_1}	S_{C_2}	S_{C_3}	
SF	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
F_{R_1}	50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F_{R_2}	0	44	0	0	0	0	0	0	0	0	0	24	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F_{R_3}	0	0	52	0	0	0	0	0	0	0	0	0	34	0	0	0	0	0	0	0	0
F_{R_4}	0	0	0	72	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27	0	0	0	0	0	0	0
F_{R_5}	0	0	0	0	78	0	0	0	0	0	0	0	0	0	33	0	0	0	0	0	0
F_{R_6}	0	0	0	0	0	36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17	0	0	0	0	0
F_{R_7}	0	0	0	0	0	0	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	19	0	0	0	0
F_{C_1}	0	0	0	0	0	0	0	58	0	0	0	0	0	0	0	0	0	24	0	0	0
F_{C_2}	0	0	0	0	0	0	0	0	48	0	0	0	0	0	0	0	0	0	21	0	0
F_{C_3}	100	100	100	100	99	100	100	100	100	100	100	100	100	100	99	100	100	100	100	100	100

Apêndice C

TEMPO DE EXECUÇÃO DAS IMPLEMENTAÇÕES

Este apêndice apresenta os resultados dos tempos de execução das implementações do PSO e do BA para os circuitos Biquad de Two-Thomas e Butterworth.

C.1 Circuito Biquad de Two-Thomas

Tabela C.1: Tempo de execução das implementações das técnicas do PSO e BA nos nós incrementados do circuito 1.

	Combinação de nós													
	T_1		T_2		T_3		T_1/T_2		T_1/T_3		T_2/T_3		$T_1/T_2/T_3$	
	PSO	BA	PSO	BA	PSO	BA	PSO	BA	PSO	BA	PSO	BA	PSO	BA
SF	549	510	594	546	625	575	902	829	885	814	883	812	1081	995
F_{R_1}	931	857	902	830	945	869	1191	1096	1193	1098	1195	1099	1411	1298
F_{R_2}	881	811	904	832	948	872	1207	1110	1204	1108	1199	1103	1408	1295
F_{R_3}	884	813	909	836	941	866	1199	1103	1202	1106	1197	1101	1414	1301
F_{R_4}	885	814	905	833	943	868	1199	1103	1205	1109	1194	1098	1415	1302
F_{R_5}	879	809	907	834	945	869	1202	1106	1200	1104	1199	1103	1420	1306
F_{R_6}	879	809	911	838	946	870	1207	1110	1203	1107	1205	1109	1420	1306
F_{C_1}	881	811	907	834	952	876	1201	1105	1204	1108	1199	1103	1419	1305
F_{C_2}	880	810	910	837	954	878	1201	1105	1202	1106	1200	1104	1422	1308

C.2 Circuito Butterworth

C.2.1 Nós individuais

Tabela C.2: Tempo de execução das implementações das técnicas do PSO e BA nos nós individuais do circuito 2.

	nós									
	T_1		T_2		T_3		T_4		T_5	
	PSO	BA	PSO	BA	PSO	BA	PSO	BA	PSO	BA
SF	864	769	911	811	1242	1105	1192	1061	1202	1070
F_{R_1}	1211	1078	1667	1484	1878	1671	1810	1611	1817	1617
F_{R_2}	1155	1028	1580	1406	1884	1677	1814	1614	1821	1621
F_{R_3}	1030	917	1528	1360	1870	1664	1824	1623	1810	1611
F_{R_4}	1030	917	1525	1357	1874	1668	1816	1616	1811	1612
F_{R_5}	957	852	1510	1344	1878	1671	1820	1620	1816	1616
F_{R_6}	1430	1273	1509	1343	1880	1673	1827	1626	1818	1618
F_{R_7}	1144	1018	1510	1344	1892	1684	1821	1621	1824	1623
F_{C_1}	1038	924	1519	1352	1895	1687	1826	1625	1827	1626
F_{C_2}	998	888	1511	1345	1893	1685	1817	1617	1829	1628
F_{C_3}	1158	888	1519	1345	1892	1685	1816	1617	1831	1628

C.2.2 Combinação de 2 nós

Tabela C.3: Tempo de execução das implementações das técnicas do PSO e BA usando 2 nós combinados no circuito 2.

	Combinações de nós																			
	T_1/T_2		T_1/T_3		T_1/T_4		T_1/T_5		T_2/T_3		T_2/T_4		T_2/T_5		T_3/T_4		T_3/T_5		T_4/T_5	
	PSO	BA	PSO	BA	PSO	BA	PSO	BA	PSO	BA	PSO	BA	PSO	BA	PSO	BA	PSO	BA	PSO	BA
SF	1087	957	1426	1255	1374	1209	1371	1206	1462	1287	1412	1243	1413	1243	1746	1536	1755	1544	1691	1488
F_{R_1}	1566	1378	1501	1321	2096	1844	1825	1606	1447	1273	1910	1681	1865	1641	2354	2072	2375	2090	2232	1964
F_{R_2}	1571	1382	1568	1380	2104	1852	1822	1603	1333	1173	1917	1687	1891	1664	2374	2089	2383	2097	2263	1991
F_{R_3}	1573	1384	1307	1150	2082	1832	1825	1606	1368	1204	1914	1684	1879	1654	2371	2086	2379	2094	2248	1978
F_{R_4}	1566	1378	1361	1198	2069	1821	1822	1603	1927	1696	1909	1680	1878	1653	2377	2092	2373	2088	2247	1977
F_{R_5}	1568	1380	1638	1441	1998	1758	1822	1603	1449	1275	1917	1687	1883	1657	2367	2083	2384	2098	2253	1983
F_{R_6}	1576	1387	1322	1163	1997	1757	1822	1603	1413	1243	1926	1695	1891	1664	2373	2088	2390	2103	2262	1991
F_{R_7}	1566	1378	1491	1312	1997	1757	1818	1600	1949	1715	1949	1715	1881	1655	2375	2090	2383	2097	2252	1982
F_{C_1}	1565	1377	1756	1545	2006	1765	1817	1599	1379	1214	1919	1689	1882	1656	2371	2086	2386	2100	2251	1981
F_{C_2}	1570	1382	1472	1295	2001	1761	1816	1598	1978	1741	1923	1692	1885	1659	2359	2076	2380	2094	2257	1986
F_{C_3}	1573	1384	1314	1156	2024	1781	1817	1599	1981	1743	1921	1690	1882	1656	2366	2082	2388	2101	2255	1984

C.2.3 Combinação de 3 nós

Tabela C.4: Tempo de execução das implementações das técnicas do PSO e BA usando 3 nós combinados no circuito 2.

	Combinações de nós																			
	$T_1/T_2/T_3$		$T_1/T_2/T_4$		$T_1/T_2/T_5$		$T_1/T_3/T_4$		$T_1/T_3/T_5$		$T_1/T_4/T_5$		$T_2/T_3/T_4$		$T_2/T_3/T_5$		$T_2/T_4/T_5$		$T_3/T_4/T_5$	
	PSO	BA	PSO	BA	PSO	BA	PSO	BA	PSO	BA	PSO	BA	PSO	BA	PSO	BA	PSO	BA	PSO	BA
SF	1653	1455	1592	1401	1589	1398	1911	1682	1916	1686	1868	1644	1956	1721	1975	1738	1898	1670	2252	1982
F_{R_1}	2277	2004	2146	1888	2150	1892	2523	2220	2582	2272	2528	2225	2582	2272	2662	2343	2586	2276	2973	2616
F_{R_2}	2282	2008	2165	1905	2157	1898	2557	2250	2606	2293	2536	2232	2617	2303	2686	2364	2577	2268	3013	2651
F_{R_3}	2279	2006	2162	1903	2154	1896	2540	2235	2602	2290	2532	2228	2600	2288	2682	2360	2572	2263	2993	2634
F_{R_4}	2283	2009	2167	1907	2148	1890	2540	2235	2608	2295	2525	2222	2600	2288	2689	2366	2566	2258	2993	2634
F_{R_5}	2286	2012	2158	1899	2157	1898	2546	2240	2597	2285	2536	2232	2606	2293	2677	2356	2577	2268	3001	2641
F_{R_6}	2289	2014	2164	1904	2168	1908	2557	2250	2604	2292	2549	2243	2617	2303	2684	2362	2590	2279	3013	2651
F_{R_7}	2298	2022	2165	1905	2157	1898	2544	2239	2606	2293	2536	2232	2604	2292	2686	2364	2577	2268	2998	2638
F_{C_1}	2285	2011	2162	1903	2159	1900	2545	2240	2602	2290	2538	2233	2604	2292	2682	2360	2579	2270	2998	2638
F_{C_2}	2277	2004	2155	1896	2161	1902	2548	2242	2601	2289	2533	2229	2608	2295	2680	2358	2581	2271	3001	2641
F_{C_3}	2299	2023	2151	1893	2162	1903	2551	2245	2607	2294	2538	2233	2609	2296	2683	2361	2578	2269	3002	2642

C.2.4 Combinação de 4 nós

Tabela C.5: Tempo de execução das implementações das técnicas do PSO e BA usando 4 e 5 nós combinados no circuito 2.

	Combinações de nós											
	$T_1/T_2/T_3/T_4$		$T_1/T_2/T_3/T_5$		$T_1/T_2/T_4/T_5$		$T_1/T_3/T_4/T_5$		$T_2/T_3/T_4/T_5$		$T_1/T_2/T_3/T_4/T_5$	
	PSO	BA	PSO	BA	PSO	BA	PSO	BA	PSO	BA	PSO	BA
SF	2128	1851	2134	1857	2075	1805	2420	2105	2449	2131	2662	2316
F_{R_1}	1763	1534	2876	2502	2808	2443	3195	2780	3301	2872	3474	3022
F_{R_2}	1822	1585	2903	2526	2817	2451	3238	2817	3331	2898	3467	3016
F_{R_3}	1817	1581	2898	2521	2812	2446	3216	2798	3326	2894	3482	3029
F_{R_4}	1816	1580	2905	2527	2805	2440	3216	2798	3334	2901	3484	3031
F_{R_5}	1812	1576	2893	2517	2817	2451	3224	2805	3320	2888	3496	3042
F_{R_6}	1844	1604	2900	2523	2831	2463	3238	2817	3328	2895	3496	3042
F_{R_7}	1863	1621	2903	2526	2817	2451	3222	2803	3331	2898	3494	3040
F_{C_1}	2462	2142	2898	2521	2819	2453	3222	2803	3326	2894	3501	3046
F_{C_2}	2083	1812	2901	2524	2825	2458	3229	2809	3317	2886	3485	3032
F_{C_3}	1906	1658	2899	2522	2827	2459	3217	2799	3308	2878	3493	3039