

IVF/SPEA2: Estudo Preliminar de um Algoritmo Evolutivo Híbrido para Otimização Multiobjetivo

Pedro Sanches Zambrano¹, Eduardo F. S.¹, Altino D.¹,
Sávio M. S.¹, Celso G. Camilo-Junior¹

¹Instituto de Informática – Universidade Federal de Goiás (UFG)
Goiânia – GO – Brasil

pedro.sanches2911@discente.ufg.br

Abstract. *This paper presents IVF/SPEA2, a hybrid multiobjective evolutionary algorithm that integrates the In Vitro Fertilization (IVF) procedure into SPEA2, aiming to enhance convergence and diversity. A controlled evaluation is conducted using canonical SPEA2 as baseline across the ZDT, DTLZ, WFG, and MaF benchmark suites. Results validated by the Inverted Generational Distance (IGD) metric and Wilcoxon test demonstrate statistically significant improvements. The study highlights the potential of the proposed hybridization and supports advancing research through further experimentation.*

Resumo. *Este artigo apresenta o IVF/SPEA2, um algoritmo evolutivo multiobjetivo híbrido que integra o procedimento de Fertilização in Vitro ao SPEA2, visando aprimorar a convergência e diversidade das soluções. Realiza-se uma avaliação controlada usando o SPEA2 canônico como linha de base nas suítes ZDT, DTLZ, WFG e MaF. Os resultados, validados pela métrica Inverted Generational Distance (IGD) e pelo teste de Wilcoxon, demonstram ganhos estatisticamente significativos. O estudo evidencia o potencial da hibridização proposta e corrobora a possibilidade de avanço da pesquisa por novas experimentações.*

1. Introdução

Problemas de Otimização Multiobjetivo (MOPs) estão presentes em áreas como engenharia, logística e ciência de dados, envolvendo objetivos conflitantes que exigem soluções de equilíbrio. O resultado desejado é um conjunto de soluções não dominadas que aproximam a chamada Fronteira de Pareto.

Entre os Algoritmos Evolutivos Multiobjetivo (MOEAs), destacam-se o NSGA-II [2], MOEA/D [3] e o SPEA2 [1]. Este último combina elitismo, fitness por dominância e estimativa de densidade, tendo resultados promissores em cenários bi- e triobjetivo, permanecendo relevante em aplicações práticas contemporâneas, como posicionamento de servidores [12]. O uso do SPEA2 em contextos recentes reforça sua relevância prática e motiva a busca por novas variantes que ampliem seu desempenho.

O SPEA2 apresenta limitações em problemas multimodais e de alta dimensionalidade, motivando hibridizações como SDE [10] e MFO [11]. Da mesma forma, o procedimento In Vitro Fertilization (IVF) [4], mostrou ganhos em diversidade e convergência. Trabalhos como IVF/NSGA-II [5] e IVF/GDE3 [6] consolidaram o potencial do procedimento IVF em promover diversidade e convergência. Neste estudo, avaliamos o IVF/SPEA2, combinando IVF ao SPEA2 e investigando exclusivamente sua performance frente ao algoritmo canônico.

2. Metodologia

O IVF/SPEA2 integra o módulo IVF à reprodução padrão do SPEA2. Dois parâmetros controlam o acoplamento: Taxa de Execução (r), que define a frequência de ativação, e Tamanho da Coleta (c), que determina quantos indivíduos são processados. Adotamos $r = c = 10\%$, valores validados em trabalhos anteriores [13].

A adaptação proposta emprega o mesmo critério de aptidão do SPEA2, definido por $F(i) = R(i) + D(i)$, em que $R(i)$ corresponde à força de dominância e $D(i)$ à estimativa de densidade baseada no vizinho- k . Diferentemente de acoplamentos anteriores do IVF, que apenas iniciam um novo ciclo quando surge um indivíduo capaz de dominar o doador principal ou apresentar melhoria em relação a ele, a versão aqui apresentada busca alinhar a execução do IVF à lógica interna do algoritmo hospedeiro.

Dado que o SPEA2 utiliza a proximidade de k vizinhos para estimativa de densidade, e considerando que o IVF realiza uma busca local focalizada na região do doador principal e seus secundários, o número de soluções próximas aumenta consideravelmente, pois os descendentes tendem a concentrar-se nessas regiões. Consequentemente, avaliar apenas o melhor descendente segundo $F(i)$ pode descartar soluções de qualidade cujo valor de aptidão foi penalizado pela alta densidade local. Para mitigar esse efeito, a adaptação proposta relaxa o critério de seleção: um novo ciclo é disparado quando ao menos uma das soluções geradas pelo módulo se posiciona entre as $2 \times c$ melhores segundo $F(i)$, assumindo então o papel de doador principal durante a nova execução. A utilização de $2 \times c$ soluções candidatas proporciona maior flexibilidade ao processo, permitindo que a janela de seleção escale proporcionalmente ao tamanho da coleta. Essa estratégia permite considerar a vizinhança de forma adaptada ao funcionamento do hospedeiro, reduzindo o impacto negativo da componente de densidade na avaliação dos descendentes gerados.

A Figura 1 ilustra o fluxo do IVF/SPEA2, mostrando a inserção do módulo IVF após a reprodução padrão do SPEA2 e antes da atualização do arquivo externo.

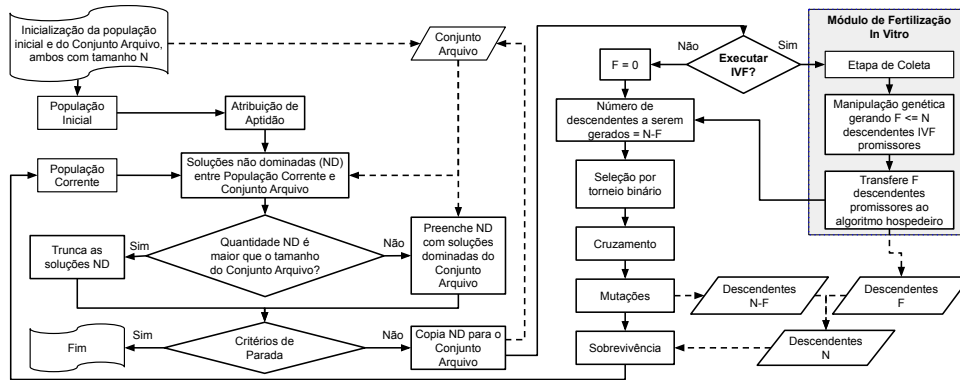


Figura 1. Fluxo do IVF/SPEA2, mostrando a inserção do módulo IVF após a reprodução padrão do SPEA2 e antes da atualização do arquivo externo.

2.1. Configuração experimental

Realizamos 30 execuções independentes via PlatEMO [9] nas suítes ZDT, DTLZ, WFG e MaF [7, 8].

A métrica de avaliação escolhida foi o Inverted Generational Distance (IGD) [7], que mensura simultaneamente convergência e diversidade. As diferenças entre algoritmos

foram avaliadas pelo teste de Wilcoxon considerando diferença estatisticamente relevante como $p < 0.05$.

3. Resultados e Discussão

Os resultados consolidados constam nas Tabelas 1a e 1b. A partir dessas tabelas, observa-se que o IVF/SPEA2 supera o SPEA2 em 16 dos 28 problemas biobjetivo (57,1%) e em 14 dos 23 problemas triobjetivo (60,9%), com derrotas em apenas 3 casos triobjetivo (13,0%). Esses números são derivados diretamente das marcações “+”, “=”, “-” associadas ao teste de Wilcoxon nos valores de IGD.

Tabela 1. IGD (media) para $M = 2$ e $M = 3$: comparação entre IVF/SPEA2 (em relação ao SPEA2) e SPEA2, com diferença estatisticamente relevante pelo teste de Wilcoxon ($p < 0.05$).

(a) $M = 2$							(b) $M = 3$						
Problem	N	M	D	FE	IVF/SPEA2	SPEA2	Problem	N	M	D	FE	IVF/SPEA2	SPEA2
ZDT1	100	2	30	100000	3.9091e-3+	3.9725e-3	DTLZ1	100	3	7	100000	2.0112e-2=	2.0140e-2
ZDT2	100	2	30	100000	3.9041e-3=	3.9132e-3	DTLZ2	100	3	12	100000	5.3965e-2+	5.4229e-2
ZDT3	100	2	30	100000	4.8535e-3+	4.9225e-3	DTLZ3	100	3	12	100000	5.3168e-2+	5.3419e-2
ZDT4	100	2	10	100000	3.8438e-3+	3.8632e-3	DTLZ4	100	3	12	100000	3.8805e-1=	2.3156e-1
ZDT6	100	2	10	100000	3.0782e-3+	3.0951e-3	DTLZ5	100	3	12	100000	4.3156e-3+	1.1774e-1
DTLZ1	100	2	6	100000	1.8274e-3+	1.8341e-3	DTLZ6	100	3	12	100000	4.0831e-3=	4.0834e-3
DTLZ2	100	2	11	100000	4.1387e-3+	4.1810e-3	DTLZ7	100	3	22	100000	6.9223e-2+	7.4694e-2
DTLZ3	100	2	11	100000	4.1941e-3+	4.2939e-3	WFG1	100	3	12	100000	1.5019e-1+	1.5277e-1
DTLZ4	100	2	11	100000	4.1576e-3=	4.1648e-3	WFG2	100	3	12	100000	1.7885e-1-	1.7229e-1
DTLZ5	100	2	11	100000	4.1432e-3+	4.1741e-3	WFG3	100	3	12	100000	1.0839e-2+	1.5755e-2
DTLZ6	100	2	11	100000	4.0691e-3+	4.0931e-3	WFG4	100	3	12	100000	2.1409e-1+	2.1540e-1
DTLZ7	100	2	21	100000	4.7817e-3=	4.7743e-3	WFG5	100	3	12	100000	2.2190e-1+	2.2289e-1
WFG1	100	2	11	100000	1.2123e-2+	2.9251e-2	WFG6	100	3	12	100000	2.4118e-1=	2.3991e-1
WFG2	100	2	11	100000	1.1092e-2=	1.1077e-2	WFG7	100	3	12	100000	2.1575e-1+	2.1710e-1
WFG3	100	2	11	100000	1.1996e-2=	1.2036e-2	WFG8	100	3	12	100000	2.9318e-1+	2.9546e-1
WFG4	100	2	11	100000	1.2761e-2+	1.2891e-2	WFG9	100	3	12	100000	2.1691e-1-	2.1642e-3
WFG5	100	2	11	100000	6.3535e-2+	6.3653e-2	MaF1	100	3	12	100000	4.1484e-2+	4.1793e-2
WFG6	100	2	11	100000	8.4645e-2=	7.6357e-2	MaF2	100	3	12	100000	3.2614e-2=	3.2241e-2
WFG7	100	2	11	100000	1.3391e-2+	1.3713e-2	MaF3	100	3	12	100000	3.2863e-2+	3.3375e-2
WFG8	100	2	11	100000	1.0741e-1=	1.0748e-1	MaF4	100	3	12	100000	2.4014e-1+	3.6438e-3
WFG9	100	2	11	100000	1.6238e-2=	1.5919e-2	MaF5	100	3	12	100000	1.5179e+0-	7.8080e-1
MaF1	100	2	11	100000	3.7724e-3+	3.8039e-3	MaF6	100	3	12	100000	4.0636e-3+	4.0872e-3
MaF2	100	2	11	100000	2.1457e-3+	2.1890e-3	MaF7	100	3	22	100000	7.4311e-2=	7.4387e-2
MaF3	100	2	11	100000	4.3975e-3=	4.2022e-3							
MaF4	100	2	11	100000	1.2679e-2=	1.2665e-2							
MaF5	100	2	11	100000	1.2946e-2=	1.2854e-2							
MaF6	100	2	11	100000	4.0666e-3+	4.0892e-3							
MaF7	100	2	21	100000	4.7520e-3=	4.7840e-3							

Em problemas biobjetivo, o IVF/SPEA2 apresentou ganhos consistentes em funções multimodais e enganosas (e.g., ZDT3, ZDT6, WFG1, WFG3, WFG7), indicando que o módulo IVF contribui para preservar a diversidade em cenários de maior complexidade estrutural. Em problemas triobjetivo, a superioridade também é pronunciada, com vitórias em diversas instâncias dos problemas WFG e MaF. Entretanto, vale destacar que o algoritmo não foi dominante em todos os casos: ocorreram três derrotas significativas frente ao SPEA2, especificamente nos problemas WFG2, WFG9 e MaF5. Esses resultados sugerem que, embora a hibridização seja vantajosa na maioria dos cenários, sua contribuição pode ser limitada em situações de elevada não separabilidade ou degenerescência da fronteira de Pareto, apontando para oportunidades de ajustes paramétricos ou estratégias adaptativas no módulo IVF. Esses achados reforçam, portanto, a relevância da hibridização como estratégia para equilibrar exploração e intensificação em MOEAs, ao mesmo tempo em que evidenciam pontos de atenção para refinamentos futuros.

4. Conclusão e Trabalhos Futuros

Este trabalho apresentou o IVF/SPEA2, avaliando-o frente ao SPEA2 canônico em benchmarks amplamente adotados na literatura. Os resultados mostram ganhos estatisticamente significativos em convergência e diversidade, confirmando que o acoplamento pode ser em casos específicos uma estratégia interessante para o SPEA2.

Como trabalhos futuros, planeja-se: (i) ampliar a avaliação experimental incluindo comparações com algoritmos como NSGA-III e MOEA/D, (ii) investigar estratégias auto-adaptativas para os parâmetros r e c , (iii) comparar o IVF/SPEA2 com outros MOEAs de referência, e (iv) incluir comparações específicas com SPEA2+SDE e SPEA2+MFO, que representam avanços na hibridização do SPEA2 mais recentes.

Referências

- [1] Zitzler, E., Laumanns, M., & Thiele, L. (2001). *SPEA2: Improving the Strength Pareto Evolutionary Algorithm*. TIK-Report 103, ETH Zurich.
- [2] Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T. (2002). A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions*.
- [3] Zhang, Q., & Li, H. (2007). MOEA/D: A Multiobjective Evolutionary Algorithm Based on Decomposition. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*.
- [4] Camilo-Junior, C. G., & Yamanaka, K. (2011). In Vitro Fertilization Genetic Algorithm. In *Evolutionary Algorithms* (Chapter 4, pp. 1–14). InTech.
- [5] Sampaio, S. M., & Camilo-Junior, C. G. (2017). IVF/NSGA-II: In Vitro Fertilization Method Coupled to NSGA-II. In *2017 IEEE Latin American Conference on Computational Intelligence (LA-CCI)* (pp. 1–6). IEEE.
- [6] Sampaio, S. M., & Camilo-Junior, C. G. (2019). IVF/GDE3: In Vitro Fertilization Method Coupled to GDE3. In *2019 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)*.
- [7] Huband, S., Hingston, P., Barone, L., & While, L. (2006). A Review of Multiobjective Test Problems and a Scalable Test Problem Toolkit. *IEEE Transactions*.
- [8] Tian, Y., Cheng, R., Zhang, X., Li, M., & Jin, Y. (2019). Diversity Assessment of Multi-Objective Evolutionary Algorithms: Performance Metric and Benchmark Problems. *IEEE Computational Intelligence Magazine*, 14(3), 61–74.
- [9] Tian, Y., Cheng, R., Zhang, X., & Jin, Y. (2017). PlatEMO: A MATLAB Platform for Evolutionary Multi-Objective Optimization. *IEEE Computational*.
- [10] Li, M., Yang, S., & Liu, X. (2013). Shift-Based Density Estimation for Pareto-Based Algorithms in Many-Objective Optimization. *IEEE Transactions*.
- [11] Jiao, R., Xue, B., & Zhang, M. (2022). A Multiform Optimization Framework for Constrained Multiobjective Optimization. *IEEE Transactions on Cybernetics*.
- [12] Hu, Y., He, X., Jiang, W., & Guo, X. (2024). Studying Power IoT Edge Computing Server Layout Methods Based on SPEA2. In *2024 International Conference on Language Technology and Digital Humanities (LTDH)*. Bhubaneswar, India: IEEE.
- [13] Sampaio, S. M., Dantas, A., & Camilo-Junior, C. G. (2023). IVF/NSGA-III – In Vitro Fertilization Method Coupled to NSGA-III. In *Proceedings of the 2023 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)* (pp. 1–8). Chicago, IL, USA: IEEE.