

Otimização Paramétrica Veicular Via Algoritmos Genéticos

Vinícius P. Lemes & Gino B. Colherinhas

Este trabalho apresenta uma aplicação de algoritmos genéticos em um veículo automotivo, para buscar parâmetros ótimos de rotação de motor utilizados nas mudanças de marcha com o objetivo de otimizar a economia de combustível e performance em aceleração de 0 a 100 km/h. Foram considerados os testes de economia de combustível padronizados FTP e HWFET. A otimização buscou três perfis de direção ótimos: uma otimização global, uma otimização específica que desconsidera o teste HWFET e uma que desconsidera o teste FTP. Os resultados foram comparados a um perfil típico de condução com mudanças de marcha a 3000 rpm e reduções de marcha a 1000 rpm. A solução da otimização global obteve 11,55% de melhoria na economia de combustível FTP, mas houve redução de 14,30% na economia de combustível HWFET. As soluções encontradas pelo AG nas otimizações específicas alcançaram melhorias de 13,71% na economia de combustível no teste FTP e 1,53% na economia de combustível no teste HWFET. Em todas as otimizações foram obtidas melhorias no tempo de 0 a 100 km/h de até 3,79%. Os resultados demonstraram que o algoritmo genético conseguiu obter bons resultados nas otimizações específicas.

Palavras-chave: *otimização paramétrica; cadeia cinemática; veículo; algoritmos genéticos.*

This work presents an application of genetic algorithms in an automotive vehicle to search for optimum engine speed parameters used in gear changes in order to optimize fuel economy and acceleration performance from 0 to 100 km/h. Standardized FTP and HWFET fuel economy tests were considered. The optimization sought three direction profiles: a global optimization, a specific optimization that disregards the HWFET test and one that disregards the FTP test. The results were compared to a typical driving profile with gear changes at 3000 rpm and gear reductions at 1000 rpm. The global optimization solution achieved 11.55% improvement in FTP fuel economy, but there was a 14.30% reduction in HWFET fuel economy. The solutions found by AG in the specific optimizations achieved improvements of 13.71% in fuel economy in the FTP test and 1.53% in fuel economy in the HWFET test. In all the optimizations, improvements were made in the time from 0 to 100 km/h of up to 3.79%. The results showed that the genetic algorithm managed to obtain good results in the specific optimizations.

Keywords: *parametric optimization; powertrain; vehicle; genetic algorithm.*

Introdução

Algoritmo genético (AG) é uma técnica de busca de dados utilizados em programação, introduzido por John Henry Holland na década de 1970. Os AGs são amplamente utilizados em diversas áreas da ciência como no gerenciamento de redes (supervisão do tráfego nos links e das filas nos buffers dos roteadores para descobrir rotas ótimas), problemas de otimização complexos (problemas com muitas variáveis e espaços de soluções de dimensões elevadas, como no gerenciamento de carteiras de fundos de investimento) e ciências biológicas (modelagem e processos biológicos para o entendimento do comportamento de estruturas genéticas)¹.

AG se baseia na evolução e na genética de populações utilizando a seleção de dados para atingir um objetivo, iniciando-se com um conjunto de soluções chamado de população. Cada solução é representada por um cromossomo. A cada geração o *fitness* de cada cromossomo é avaliado para selecionar os cromossomos da próxima geração^{2,3}.

Existem diversos métodos de seleção, entre eles o método da roleta, da classificação e do torneio. O método da roleta é clássico e usa uma seleção proporcional na qual cada cromossomo corresponde a uma “fatia” da roleta. O tamanho da fatia é proporcional à aptidão do cromossomo. O número de vezes que a roleta gira é o mesmo número de indivíduos da população e, quando a roleta para, seleciona o indivíduo marcado para a próxima geração. No método da classificação os indivíduos são classificados de acordo com sua aptidão e os valores esperados de cada indivíduo dependem da sua classificação, ao invés de sua aptidão bruta. Na classificação linear, cada indivíduo da população é classificado em ordem crescente de aptidão. O método do torneio seleciona uma parcela da população de forma aleatória. Esta parcela compete entre si de acordo com suas aptidões. Aquele que possuir a melhor nota é selecionado. Um parâmetro k define a quantidade de indivíduos selecionados para a competição. Alguns dos cromossomos selecionados cruzam e geram prole. Enquanto a prole é gerada ocorre, randomicamente, mutação e crossover.

O crossover é a troca de parte dos genes entre dois cromossomos selecionados. Desta troca, são gerados novos descendentes. Este processo de evolução é repetido até que o objetivo seja alcançado⁴.

O vasto campo de aplicação dos algoritmos genéticos permite que esta técnica seja utilizada na engenharia mecânica para buscar melhores parâmetros em veículos para obter um veículo ótimo. Dessa forma, os AGs podem ser utilizados para otimizar a aceleração ou velocidade máxima de um veículo, a economia de combustível, emissão de gases poluentes e outras características mecânicas como resistência e massa.

Entre suas aplicações, os AGs podem ser utilizados para otimizar as características de veículos elétricos híbridos com o objetivo de reduzir o consumo de combustível e emissões de poluentes e aumentar a performance⁵⁻⁸ e minimizar custos e massa⁹. A literatura também fornece estudos na otimização de veículos de combustão interna para velocidade máxima do motor¹⁰ obter uma cadeia cinemática adaptada à diferentes perfis de uso¹¹ e na calibração de motor a diesel para reduzir emissões¹².

Este trabalho tem o objetivo de usar um AG para obter uma otimização paramétrica de performance em aceleração e em economia de combustível em um carro por meio da busca de parâmetros ótimos de rotação de motor utilizado nas mudanças de marcha.

Referencial Teórico

Em se tratando de veículos de combustão interna a literatura fornece aplicações de AGs em ônibus para definir a velocidade de rotação limite mais adequada para mudança de cada marcha¹⁰ e assim reduzir o consumo de combustível. Simulando 3 diferentes cursos que replicam o consumo de combustível do ônibus em diferentes cenários, foi possível obter uma rotação de motor ótima para a mudança de cada marcha que resultou em um ganho de 13,33% na economia de combustível comparado com o ônibus mudando marcha sempre em 2200 rpm.

Outra aplicação dos AGs em veículos de combustão interna está na otimização das razões de transmissão com

o objetivo de obter diferentes perfis de desempenho para um veículo¹¹. O algoritmo procurou um perfil *Family*, que prioriza a economia de combustível, e um perfil *Sport*, que prioriza o desempenho em aceleração. Também há um perfil *Best* que prioriza ambas. Os resultados da otimização estão na Tabela 1.

Tabela 1: Otimização entre configurações Melhor, Sport e Family. **Fonte:** Colherinhas *et al.*¹⁰(p. 4, 2014)

Setting	Veículos Otimizados			Original
	Best	Sport	Family	
Fitness	244,87	241,53	232,58	224,15
Consumo (km/l)	11,07	10,65	13,84	11,64
0-100 km/h (s)	8,9	8,8	10,9	10,1
$\bar{\mu}$ (mm)	283	286	289	290
Ra	4,17	4,03	3,4	2,95
Rt1	3,62	3,44	3,51	3,25
Rt2	2,72	2,41	2,84	2,06
Rt3	2,55	1,62	1,26	2,42
Rt4	0,88	0,98	1,09	1,03
Rt5	0,72	0,8	0,66	0,73

A comparação dos resultados mostra que a otimização foi bem eficiente. O veículo *Best* superou o veículo original em 9,2%. O modelo *Sport* obteve aceleração 12,8% mais rápida e o modelo *Family* foi 18,9% mais econômico.

AG também tem se mostrado eficiente na redução de emissões e de consumo de combustível por meio da otimização na calibração de um motor a diesel¹². Esta aplicação do AG foi capaz de reduzir simultaneamente as emissões de NOx em 20% e o consumo específico de combustível do freio (BSFC) em 1% sem aumentos em outras emissões.

Metodologia

Primeiramente, são coletados os dados técnicos sobre o veículo que será otimizado (Saturn SL2 1.9L Manual 5 marchas). São informações essenciais a serem coletadas: massa do veículo, base da roda, raio da roda, razão de transmissão do eixo dianteiro, razões de transmissão para cada marcha do veículo, distância do centro de gravidade ao eixo traseiro, distância do centro de gravidade ao eixo dianteiro, altura do centro

de gravidade, aceleração máxima, rotação de passagem de marcha (rpm), coeficientes de arrasto, curvas de desempenho (aceleração, velocidade torque e potência). Também é importante obter o gráfico de consumo específico de combustível do freio (BSFC) e de potência média efetiva do freio (BMEP).

Um modelo matemático é programado em MATLAB para simular a performance do veículo a ser otimizado em diferentes testes como, tempo de 0-100 km/h e consumo de combustível em testes padronizados (HWFET e FTP). O módulo de otimização usado no MATLAB pode ser obtido em¹³.

O Federal Test Procedure (comumente conhecido como FTP-75) é um teste padronizado pela US Environmental Protection Agency (EPA) para testar a economia de combustível de carros de passageiros por meio de uma rotina que simula um percurso na cidade Figura 1. Pode ser notado que neste teste a velocidade do carro oscila bastante devido aos vários momentos de parada do veículo, portanto é esperado que o consumo de combustível também descreva várias oscilações e que aconteça mais mudanças de marcha.

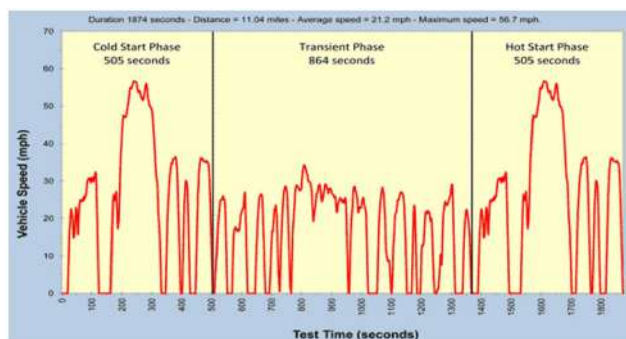


Figura 1: EPA Federal Test Procedure. **Fonte:** U.S Department of Energy¹⁴

A EPA também especifica o Highway Fuel Economy Test (HWFET), que é uma rotina para a simulação da economia de combustível em de um carro de passageiros

em uma auto estrada Figura 2. O teste HWFET descreve um percurso com bem menos oscilações de velocidade que o teste FTP pois não há momentos de parada. Sendo assim, espera-se menos variação de consumo de combustível e menos mudanças de marcha nesse teste.



Figura 2: EPA Highway Fuel Economy Test. **Fonte:** U.S Department of Energy¹⁴

Nestas simulações foi considerado que o carro avança para a próxima marcha a 3000 rpm e retorna à marcha anterior a 1000 rpm. Estas rotações foram escolhidas porque refletem um cenário típico de condução do veículo que trabalha em rotações mais baixas.

Para simular o tempo de 0-100 km/h também foi considerado que o carro faz a mudança de marcha a 3000 rpm. Entretanto, foi feito um teste com a mudança em 6000 rpm que reflete a melhor aceleração possível do veículo para servir de comparação com os resultados buscados pelo algoritmo. Naturalmente, o AG buscará valores de rpm que fornecem um tempo de 0-100 km/h intermediário entre a aceleração típica a 3000 rpm e a aceleração máxima à 6000 rpm pois ele também considera a economia de combustível.

Se os resultados destes testes corresponderem com os resultados esperados para o veículo otimizado, o programa pode ser executado por meio de AG para que uma solução ótima seja encontrada.

Resultados e Discussão

A otimização foi executada com 100 gerações, 100 cromossomos por geração, dimensão a cada 50 gerações, porcentagem de elitização de 50%, probabilidade de elitismo de 2%, probabilidade de mutação de 2% e probabilidade de crossover de 60%. O AG utilizou, para seleção dos cromossomos, o método da roleta.

As primeiras tentativas de otimização consideravam o mesmo peso para o resultado dos testes de economia de combustível e de performance, entretanto, o AG buscou rotações baixas demais para mudança de marcha. Sendo assim, consideraram-se pesos diferentes para cada variável da otimização e os resultados mais adequados foram obtidos com um peso de 4 para o tempo de 0-100 km/h e peso 1 para cada teste de economia de combustível. O número de gerações foi aumentado para 2000 Figura 3.

Posteriormente, foram realizadas outras otimizações: uma chamada “Otimização (FTP)” Figura 4 pois desconsidera o teste HWFET e outra chamada “Otimização (HWFET)” Figura 5 pois desconsidera o teste FTP. Estas outras otimizações foram realizadas para buscar soluções mais específicas para um trajeto urbano e outro em autoestrada. As soluções mais adequadas para essas otimizações específicas foram encontradas usando um peso de 2.8 para o teste e aceleração e 1 para o teste de economia de combustível. Para diferenciar das demais, a primeira otimização foi chamada de “Otimização Global”.

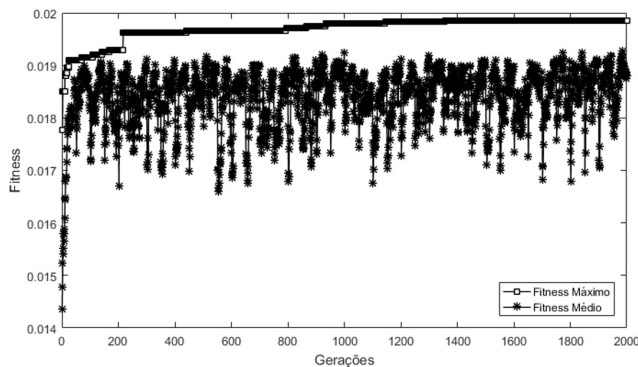


Figura 3: Execução da Otimização Global. **Fonte:** do autor

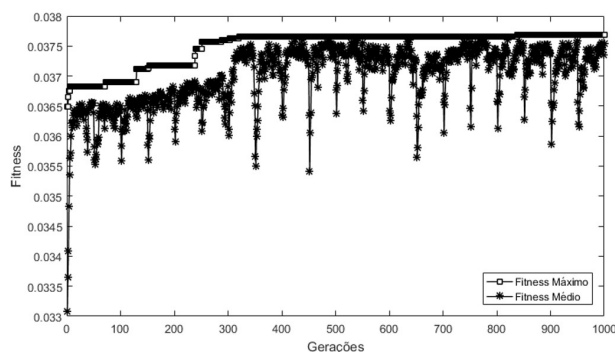


Figura 4: Execução da Otimização (FTP). Fonte: do autor

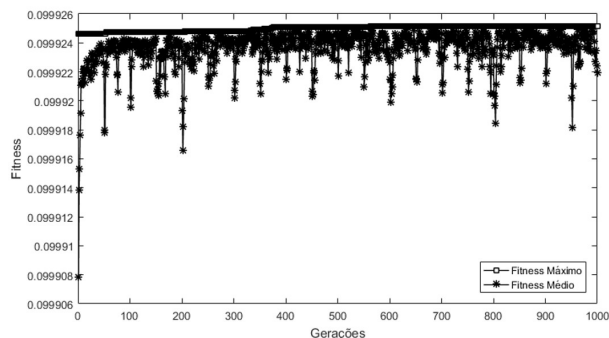


Figura 5: Execução da Otimização (HWFET). Fonte: do autor

O tempo de execução da otimização foi de 3006,4 segundos na Otimização Global, 1578,6 segundos na Otimização (FTP) e 1384,27 segundos na Otimização (HWFET) em um computador com processador AMD Ryzen 3 2200G e 16GB de RAM à 2933MHz. Pode ser observado que o aumento do número de gerações para 2000 na Otimização Global possibilitou que soluções melhores fossem encontradas até a geração de número 1357. Nas outras otimizações, 1000 gerações foram suficientes para alcançar convergência. A Tabela 2 a seguir lista os resultados encontrados em todas as otimizações.

Tabela 2: Resultados. Fonte: do autor

	Original	Otimização Global	Otimização (FTP)	Otimização (HWFET)
Tempo 0-100 km/h (s)	15,82	15,58	15,22	15,46
Economia Teste FTP (km/L)	9,70	10,82	11,03	6,99
Economia Teste HWFET (km/L)	15,04	12,89	9,70	15,27
Mudança da 1ª para 2ª marcha (rpm)	3000	2024	2232	4244
Mudança da 2ª para 3ª marcha (rpm)	3000	2530	2004	3049
Mudança da 3ª para 4ª marcha (rpm)	3000	3512	4653	2898
Mudança da 4ª para 5ª marcha (rpm)	3000	3086	3506	5330
Mudança da 2ª para 1ª marcha (rpm)	1000	1020	1001	1193
Mudança da 3ª para 2ª marcha (rpm)	1000	1013	1002	1909
Mudança da 4ª para 3ª marcha (rpm)	1000	2065	2992	1007
Mudança da 5ª para 4ª marcha (rpm)	1000	2965	2506	2738

A execução do teste de performance Figura 6 mostra um pequeno ganho de aceleração de 0-100 km/h em todas as otimizações. Na Otimização Global obteve-se um tempo de 15,58 segundos, o que representa uma melhoria de 1,52% quando comparado ao tempo da aceleração típica de 15,82 segundos. A Otimização (FTP) alcançou 15,22 segundos e a Otimização (HWFET), 15,46 segundos, o que representa uma melhoria de 3,79% e 2,28%, respectivamente. Todas ainda estão consideravelmente distantes da aceleração máxima possível (com mudança de marcha em 6000 rpm) de 10,07 segundos.

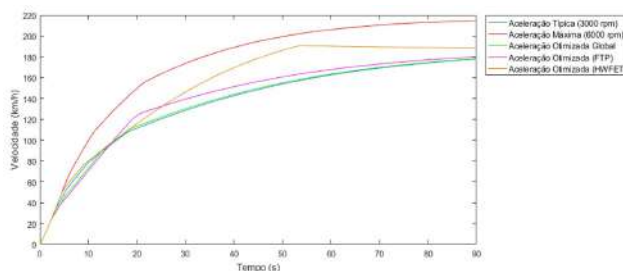


Figura 6: Teste de performance. Fonte: do autor

Assim como esperado, ocorreram mais mudanças de marcha no teste FTP e menos mudanças no teste HWFET Figura 7. Tanto na Otimização Global quanto na Otimização (FTP), o comportamento das mudanças de marchas no teste FTP mostrou uma tendência de manter marchas mais altas quando comparado à mudança de marchas típica a 3000 rpm. Entretanto, no teste HWFET, a Otimização (HWFET) é que mantém marchas mais altas na maior parte do teste,

enquanto que na Otimização Global há um uso mais prolongado da terceira marcha do instante 17 segundos até 338 segundos e na Otimização (FTP) sequer há uso da quarta marcha. Esta resistência ao uso da quarta marcha nessas otimizações pode ser explicada pela Tabela 2 devido a estas soluções terem buscado rotações de mudança da 3ª para 4ª marcha mais altas (4653 rpm e 3512 rpm, respectivamente).

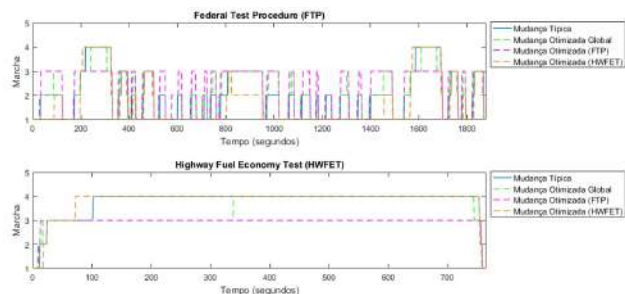


Figura 7: Mudança de marchas. **Fonte:** do autor

Pode ser observado na Figura 8 que o BSFC original se mantém entre 88 e 120 g/kWh na maior parte do tempo, com oscilações para 0 indicando os momentos de parada do carro, o que representa um consumo esperado para este tipo de veículo. No HWFET não há paradas (exceto ao fim do teste), consequentemente os valores de BSFC têm menos oscilação. Um comportamento semelhante ao original é observado com o BSFC Otimizado Global no teste FTP, entretanto com valores um pouco menores, indicando uma redução no consumo de combustível.

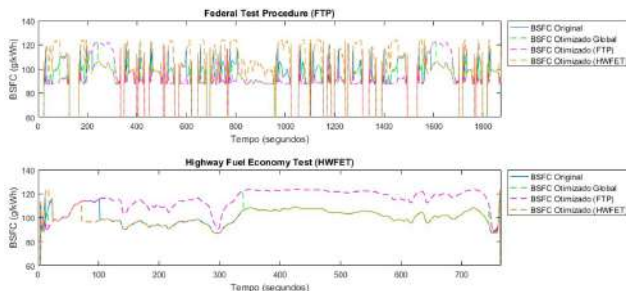


Figura 8: BSFC. **Fonte:** do autor

A Otimização (FTP) obteve valores de BSFC ainda

menores que a Otimização Global. No teste HWFET, porém, o BSFC nas soluções Otimizado Global e Otimizado (FTP) foram maiores, explicitamente devido ao uso prolongado da terceira marcha.

A natureza inversamente proporcional entre BSFC e economia de combustível é observada no gráfico da economia de combustível instantânea Figura 9, com a Otimização Global exibindo valores mais altos de economia na maior parte do teste comparado à economia original. Percebe-se que a Otimização Global obteve uma economia média no teste FTP de 10,82 km/L, o que é melhor que a economia original de 9,70 km/L. No teste HWFET observa-se novamente uma redução na economia de combustível, com 12,89 km/L na economia otimizada média e 15,04 km/L na economia original.

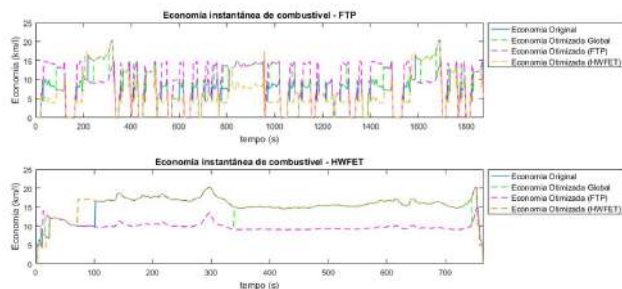


Figura 9: Economia de combustível instantânea. **Fonte:** do autor

As otimizações específicas, entretanto, obtiveram melhores resultados nos testes para os quais são voltados. A Otimização (FTP) alcançou uma economia de 11,03 km/L no teste (FTP). A Otimização (HWFET) obteve 15,27 km/L na economia de combustível comparado a 15,04 km/L na economia original.

Conclusões

Este artigo apresenta uma ferramenta de otimização utilizando algoritmos genéticos para a redução do consumo de combustível e aumento da performance por meio da

busca de parâmetros ótimos de rotação do motor para mudança de marchas de um veículo automotivo típico, considerando distintos parâmetros de otimização focados para três perfis de direção: 1) a otimização global, que considera, simultaneamente, a direção na cidade (teste FTP) e na estrada (teste HWFET); 2) a otimização focada para a direção na cidade (FTP); 3) otimização para direção na estrada (HWFET).

As soluções encontradas pelo AG obtiveram resultados com ganhos significativos de economia de combustível sem comprometer a performance em aceleração comparado ao veículo com mudança de marcha em rotações fixas (3000 rpm para avançar a marcha e 1000 rpm para reduzir).

A Otimização Global gerou ganho de 11,55% no teste FTP com melhoria de 1,52% no tempo de 0 a 100 km/h, indicando que esta solução é adequada para trajetos urbanos. Entretanto, a Otimização Global obteve uma redução de 14,30% na economia de combustível no teste HWFET devido ao uso estendido da terceira marcha.

Os melhores resultados foram obtidos com as otimizações específicas para cada teste. A Otimização (FTP) obteve ganhos de 13,71% na economia de combustível no teste FTP com 3,79% de redução no tempo de 0 a 100 km/h. A Otimização (HWFET) obteve ganhos de 1,53% de na economia de combustível no teste HWFET com 2,28% de redução no tempo de 0 a 100 km/h. Naturalmente, as otimizações específicas não geraram resultados ótimos nos testes para os quais não foram otimizados: a Otimização (FTP) reduziu em 35% a economia do teste HWFET e a Otimização (HWFET) reduziu em 53,52% a economia do teste FTP. Entretanto, isto não significa um problema pois o veículo não trafega em um trajeto urbano e na autoestrada ao mesmo tempo.

Como as otimizações específicas apresentaram bons resultados quanto ao perfil de condução na estrada e na cidade, a ferramenta apresentada é bastante promissora para a programação de sistemas de transmissão inteligentes.

Referências

1. M. N. D. Miranda., Algoritmos Genéticos: Fundamentos e Aplicações, UFRJ (Universidade Federal do Rio de Janeiro), [online]. Disponível

em: <http://www.nce.ufjf.br/GINAPE/VIDA/alggenet.htm>. [Acesso em 22 05 2020].

2. D. Whitley, A genetic algorithm tutorial, *Statistics and Computing*, vol. 4, pp. 65-85, **1994**.
3. Kumar, M.; Husian, M.; Upreti, N.; Gupta, D. Genetic Algorithm: Review and Application, *International Journal of Information Technology and Knowledge Management*, vol. 2, nº 2, pp. 451-454, **2010**.
4. G. B. Colherinhas, Ferramenta de Otimização via Algoritmos Genéticos com Aplicações em Engenharia, Dissertação de Mestrado em Ciências Mecânicas, Publicação ENM.DM - 243 A/16, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, xvii, 84p, **2016**.
5. W. Gao E S. K. Porandla, Design Optimization of a Parallel Hybrid Electric Powertrain, **2005** IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, p. 6, **2005**.
6. B. Huang, Z. Wang e Y. Xu, Multi-Objective Genetic Algorithm for Hybrid Electric Vehicle Parameter Optimization, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 5177-5182, **2006**.
7. L. Li, Y. Zhang, C. Yang, X. Jiao, L. Zhang e J. Song, Hybrid genetic algorithm-based optimization of powertrain and control parameters of plug-in hybrid electric bus, *Journal of the Franklin Institute*, vol. 352, nº 3, pp. 776-801, **2015**.
8. Z. Chen, C. C. Mi, R. Xiong, J. Xu e C. You, Energy management of a power-split plug-in hybrid electric vehicle based on genetic algorithm and quadratic programming, *Journal of Power Sources*, vol. 248, nº 15, pp. 416-426, **2014**.
9. O. Hegazy e J. V. Mierlo, Particle Swarm Optimization for optimal powertrain component sizing and design of fuel cell hybrid electric vehicle, *12th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment*, pp. 601-609, **2010**.
10. I. Reis, I. Zeigerman, A. Diniz e A. Rodrigues, Optimization of the upper limit engine speed in urban buses using genetic algorithm technique, *23rd ABCM International Congress of Mechanical Engineering*, **2015**.
11. G. B. Colherinhas, P. H. C. Dias, A. Diniz e A. P. S. P. Rodrigues, Automotive powertrain optimization by genetic algorithm analysing transmission ratios, *EngOpt - 4th International Conference on Engineering Optimization*, At Lisbon, Portugal, **2014**.
12. F. Millo, P. Arya e F. Mallamo, Optimization of Automotive Diesel Engine Calibration Using Genetic Algorithm, vol. 158, nº 1, pp. 807-819, **2018**.
13. G. B. Colherinhas, Genetic Algorithm MATLAB toolbox. Repositório Github [online]. Disponível em: <https://github.com/Ginobc/Genetic-Algorithm-MATLAB-toolbox>. [Acesso em: 22 10 2020].

14. U.S. Department Of Energy, fuel economy – detailed test information, [online]. Disponível em: https://fueleconomy.gov/feg/fe_test_schedules.shtml [Acesso em 22 08 2020].
-

Vinícius P. Lemes* & Gino B. Colherinhas

Centro Universitário de Anápolis – UniEVANGÉLICA. Avenida Universitária, km 3,5, Centro Universitário, Anápolis, Goiás, Brasil.

*E-mail: vena.p.lemes@outlook.com