

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO DE PARÂMETROS DA SUSPENSÃO DE UM ÔNIBUS
BASEADA NO MODELO DE PARTÍCULAS QUÂNTICAS

por

Ewerton Grotti

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, 11 junho de 2018.

OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO DE PARÂMETROS DA SUSPENSÃO DE UM ÔNIBUS
BASEADA NO MODELO DE PARTÍCULAS QUÂNTICAS

por

Ewerton Grotti

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof^a. Thamy Cristina Hayashi
Coordenadora do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Mecânica dos Sólidos**

Orientador: Prof. Dr. Herbert Martins Gomes

Comissão de Avaliação:

Prof. Herbert Martins Gomes

Prof. Rodrigo Rossi

Prof. Felipe Tempel Stumpf

Porto Alegre, 11 junho de 2018.

A necessidade é a melhor mestra e guia da natureza. A necessidade é terna e inventora, o eterno freio e lei da natureza - Leonardo da Vinci

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu pai e minha mãe, Milton e Vitória, os quais me forneceram motivação, um alicerce familiar sólido, e me permitiram buscar meus sonhos, sempre me ensinando a lutar pelos meus objetivos. Agradeço à Luísa, meu farol e porto seguro, minha namorada, a qual me deu forças para lutar nos momentos mais difíceis. Agradeço ao meu orientador e mentor, Herbert, o qual me deu oportunidade para aprender, sempre com dedicação e muita paciência. Agradeço também a meus amigos, Felipe e Arthur, que com otimismo e muitas risadas tornaram os dias mais leves. Agradeço ao Marcos e à Cristina, que respeitosamente me ajudaram sempre que precisei durante os últimos anos.

Especialmente, dedico este trabalho à Lívia e à Laura, minhas sobrinhas.

GROTTI, E. **Otimização multiobjetivo de parâmetros da suspensão de um ônibus baseada no modelo de partículas quânticas**. 2018. 15f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

RESUMO

Este trabalho fornece um estudo multiobjetivo sobre redução da vibração nos passageiros e no motorista de um ônibus. Um modelo numérico de ônibus com treze graus de liberdade, incluindo dinâmica lateral, é acoplado ao algoritmo de otimização multiobjetivo NSGA-II (*Non-dominated Sorting Genetic Algorithm*) e um novo algoritmo proposto, MOQPSO (*Multi-objective Quantum Particle Swarm Optimization*). Três assentos são estrategicamente selecionados a fim de investigar a atenuação da vibração. Dez parâmetros de rigidez e amortecimento são selecionados como variáveis de projeto para compor o processo de otimização, a fim de reduzir a vibração nos passageiros e averiguar o comportamento das curvas de Pareto geradas pelos algoritmos. O ônibus é submetido à manobra *DLC* (*double lane change*, ISO 3888, 2002) e a uma pista rugosa classe C (ISO 8606, 1995) a fim de promover excitações majoritariamente laterais e verticais, respectivamente. Normas para vibração (ISO 2631, 1997) são usadas na avaliação e comparação das soluções. Os resultados mostram que os novos parâmetros obtidos pela otimização geram atenuações de vibração que são superiores às aquelas usando valores nominais. O algoritmo proposto no presente estudo mostrou-se adequado, uma vez que sua Fronteira de Pareto se mostrou mais ampla e avançada do que aquela obtida pelo já consolidado NSGA-II com o mesmo custo computacional.

PALAVRAS-CHAVE: otimização multiobjetiva, suspensão passiva de ônibus, conforto, VCI.

GROTTI, E. **Multi-objective optimization of bus suspension parameters based on quantum particle model**. 2018. 15f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

ABSTRACT

This work provides a multiobjective study on vibration reduction for passengers and a bus driver. A numerical model of bus with thirteen degrees of freedom, including lateral dynamics, is coupled to the NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm) and a novel proposed algorithm, MOQPSO (Multi-objective Quantum Particle Swarm Optimization). Three seats are strategically selected in order to investigate vibration attenuation. Ten parameters of stiffness and damping are selected as design variables to compose the optimization process in order to reduce the vibration in the passengers and to investigate the behavior of the Pareto curves generated by the algorithms. The bus is subjected to the DLC maneuver (ISO 3888, 2002) and to a class C track (ISO 8606, 1995) in order to generate mainly lateral and vertical excitations, respectively. Vibration standards (ISO 2631, 1997) are used to evaluate and compare the solutions. The results show that the new parameters obtained by the optimization generate vibration attenuations that are superior when compared to those using the nominal values. The algorithm proposed in the present study was proven suitable, since its Pareto frontier was wider and more advanced than the one obtained by the already consolidated NSGA-II with the same computational cost.

KEYWORDS: multi-objective optimization, passive bus suspension, comfort, WBV.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Modelo de suspensão simplificado do ônibus (Modificado de Sekulic <i>et al.</i> , 2013).	3
Figura 3.2 – Histórico do sinal no tempo para os quatro pneus gerado usando o modelo de correlação cruzada e deslocamento na fase da PSD.	4
Figura 3.3 – Exemplo de manobra DLC (<i>Double Lane Change</i>) com dimensões ajustadas para um veículo de passeio comum.	5
Figura 5.1 – Comparação da Fronteira de Pareto: MOQPSO e NSGA-II. Ambas as fronteiras foram geradas com 135324 simulações.	9
Figura 5.2 – Fronteira de Pareto: MOQPSO. Gerada com 291932 simulações.	10
Figura 5.3 – Sinal típico de aceleração longitudinal, lateral e vertical para o motorista: (a) Gerado a partir dos parâmetros nominais das variáveis de projeto, H, e (b) Solução otimizada A.	11
Figura 5.4 – Zonas de orientação para o risco à saúde do motorista, ISO 2631-1 (1997). Comparação entre a solução A e o valor obtido com os parâmetros nominais.	12
Figura A.1 – Fluxograma do algoritmo proposto, MOQPSO.	17
Figura A.2 – Mecanismo implementado no algoritmo proposto para aumentar a convergência baseado no guia mais próximo.	18
Figura A.3 – Mecanismo implementado no algoritmo proposto para aumentar a amplitude e o espalhamento baseado nos guias extremos.	18
Figura A.4 – Fluxograma simplificado do algoritmo NSGA-II, baseado em Deb <i>et al.</i> , 2002.	18
Figura A.5 – Ângulo de esterçamento para a realização da manobra DLC.	19
Figura A.6 – Comparação das Fronteiras de Pareto obtidas pela função <i>gamultiobj</i> do MATLAB e pelo MOQPSO. Aceleração vertical <i>rms</i> para o motorista, passageiro 1, e passageiro 2.	19
Figura A.7 – Sinal típico de aceleração longitudinal, lateral e vertical para o passageiro 1:(a) Gerado a partir dos parâmetros nominais das variáveis de projeto H, e (b) Solução otimizada A.	20
Figura A.8 – Sinal típico de aceleração longitudinal, lateral e vertical para o passageiro 2:(a) Gerado a partir dos parâmetros nominais das variáveis de projeto H, e (b) Solução otimizada A.	20

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Limites de aceleração para conforto e potenciais danos à saúde. Adaptado da ISO 2631-1, 1997.	7
Tabela 5.1 – Soluções selecionadas da fronteira de Pareto.	10
Tabela 5.2 – Aceleração <i>rms</i> ponderada para avaliar o risco à saúde (ISO 2331-1, 1997) para os casos A a H em [m/s ²].	11
Tabela 5.3 – Aceleração Total Equivalente, usada na avaliação do conforto, (ISO 2331-1, 1997) para os casos A a H em [m/s ²].	12
Tabela 5.4 – Máximo espaço de trabalho da suspensão.	13
Tabela A.1 – Parâmetros nominais geométricos e inerciais do modelo numérico do ônibus. Adaptado de Sekulik <i>et al.</i> , 2013.	16
Tabela A.2 – Parâmetros nominais de rigidezes e amortecimentos do modelo numérico do ônibus. Adaptado de Sekulik <i>et al.</i> , 2013.	16

ÍNDICE	Pág.
AGRADECIMENTOS	iv
RESUMO	v
ABSTRACT	vi
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	viii
ÍNDICE	ix
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Motivação e Justificativa	1
1.2 Objetivos	1
1.3 Objetivos específicos	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	1
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	3
3.1 Modelo de dinâmica vertical e lateral acoplada	3
3.2 Perfil vertical de estrada e manobra de dupla troca de faixa	4
3.3 <i>Quantum Behaved Particle Swarm Optimization</i> - QPSO	5
3.4 Otimização multiobjetivo	5
3.4.1 MOQPSO (<i>Multiobjective Quantum Behaved Particle Swarm Optimization</i>)	6
3.4.2 NSGA-II (<i>Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II</i>)	6
3.5 Vibração de corpo inteiro de acordo com a ISO 2631-1 (1997)	6
4 METODOLOGIA	7
4.1 Problema Multiobjetivo	8
4.2 Parâmetros dos Algoritmos	8
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	8
6 CONCLUSÕES	13
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	14
APÊNDICE	16

1 INTRODUÇÃO

Com o advento de máquinas a combustão, a vibração de máquinas e dispositivos tornou-se um agente físico passível de geração de desconforto e até mesmo de problemas relacionados à saúde. Numa frota cada vez mais crescente de veículos, este agente físico tem chamado a atenção dos fabricantes, os quais projetam levando em conta os níveis de vibração para problemas relacionados à fadiga de peças e componentes, vida útil, conforto e segurança dos seus usuários.

A vibração nos passageiros de um veículo depende principalmente da rugosidade do pavimento, da velocidade, e do sistema de suspensão do chassi e do assento. Tal vibração pode produzir uma sensação incômoda no corpo inteiro (vibração de baixa frequência), causar dor nas mãos ou pés (baixa e alta frequência) ou mesmo lesões em vértebras lombares dos passageiros e motorista.

O objetivo principal da suspensão do veículo é alcançar boa estabilidade de condução e conforto dos passageiros, independentemente da superfície da estrada. O uso da suspensão ativa vem crescendo devido à sua alta eficiência no alcance destes objetivos, mas a suspensão passiva ainda é o tipo mais comum nos veículos de hoje devido ao seu baixo custo e simplicidade relativos. Projetar e selecionar parâmetros de rigidez e amortecimento deve, portanto, atender a demandas conflitantes: reduzir a transmissão de vibração originada pela estrada até os ocupantes do veículo, reduzir a vibração da suspensão e das rodas para garantir o contato permanente com a estrada, reduzir o espaço de trabalho da suspensão e manter a dirigibilidade. O foco deste trabalho, no entanto, se restringe a melhorias no conforto e redução do risco à saúde dos passageiros e do motorista de um veículo tipo ônibus.

1.1 Motivação e Justificativa

Vários autores investigaram a otimização dos parâmetros de suspensão nas últimas décadas. A principal ideia por trás dessa pesquisa é a minimização da vibração do veículo, principalmente nas posições dos passageiros e do motorista, a fim de evitar o desconforto e minimizar danos à saúde humana.

1.2 Objetivos

O presente trabalho tem o objetivo de reduzir a vibração incidente sobre passageiros e motoristas de ônibus. Será apresentado um novo algoritmo metaheurístico de otimização multiobjetivo baseado no comportamento de partículas quânticas (MOQPSO), que será aplicado ao problema de vibrações transmitidas de um sistema dinâmico de suspensão de ônibus. O modelo de veículo usado na otimização prevê comportamento de dinâmica vertical assim como lateral numa manobra padronizada de dupla troca de faixa. A dinâmica lateral acoplada às equações diferenciais da dinâmica vertical é resolvida no tempo pelo método de Newmark não-linear. Como objetivo secundário pretende-se avaliar comparativamente os resultados obtidos com aqueles utilizando o tradicional algoritmo genético *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II*, NSGA-II [Deb *et al.*, 2002].

1.3 Objetivos específicos

Acoplar o modelo de dinâmica de suspensão veicular de um ônibus com dinâmica lateral juntamente com um algoritmo de integração no tempo que permita resolver equações acopladas de equilíbrio no tempo. Desenvolver, implementar e propor melhorias no algoritmo de otimização multiobjetivo baseado em partículas quânticas (QPSO) utilizando-o para a otimização dos parâmetros da suspensão numa condição de manobra de troca dupla de faixa em linguagem de programação MATLAB, 2012.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Muitos autores investigaram o impacto da vibração nos seres humanos. Especificamente, em veículos de passeio, Zamanian *et al.*, 2014, usaram um método

experimental para correlacionar a exposição à vibração de curto prazo a sintomas como desconforto, carga mental excessiva, falta de atenção e sonolência. A otimização da suspensão no conforto do passageiro é uma área estudada de forma extensiva [Ahmadian *et al.*, 2005; Gomes, 2016; Grotti *et al.*, 2017; Ji *et al.*, 2017]. De forma geral, os estudos de otimização paramétrica da suspensão passiva concluem que a redução dos parâmetros de rigidez e amortecimento aumentam o conforto dos passageiros.

Uma metodologia para projetar um sistema de suspensão ativo híbrido é proposta por Spentzas e Kanarachos, 2002, tendo o conforto do passageiro como função de custo (controle do nível de aceleração vertical do passageiro). Foi utilizada uma abordagem de inteligência computacional denominada Rede Neural Artificial (RNA) para aprender a função de controle desconhecida. As comparações numéricas foram realizadas no domínio do tempo e o veículo foi modelado como um modelo de 2 graus de liberdade. Um sistema de suspensão ativo proposto por Ahmadian *et al.*, 2005, foi criado e implementado para reduzir a amplitude e aceleração recebidas pelo passageiro dentro dos limites de limiar de saúde humana. Um modelo de um quarto de carro foi considerado nas abordagens com três controles: o controle ótimo, Controle Fuzzy e Controle Fuzzy Ótimo Adaptativo.

Baumal *et al.*, 1998, compararam a eficiência de um Algoritmo Genético (GA) a um método de otimização baseado em gradiente (método de projeção de gradiente) para um modelo de meio veículo. O objetivo era minimizar o pico da aceleração do banco do passageiro, sujeito a restrições que representavam a capacidade de aderência à estrada e o espaço de trabalho da suspensão. O GA convergiu para um ótimo que foi apenas uma melhoria de 4% em relação ao método baseado em gradientes. O GA foi utilizado para otimizar tanto o sistema de controle ativo quanto os parâmetros passivos de um sistema de suspensão de veículos de 5 GDL (graus de liberdade) submetidos ao perfil de via senoidal

Mizushima, 2017, realiza uma otimização dos parâmetros da suspensão de forma similar ao presente estudo, sendo um precursor. Para a otimização multiobjetivo foi usado o algoritmo NSGA-II (*Non-dominated Sorting Genetic Algorithm*, MATLAB 2012, função *gamultiobj*), e para as monobjetivas são realizadas usando os algoritmos QPSO, PSO (*Particle Swarm Optimization*) e SQP (*Sequential Quadratic Programming*, MATLAB 2012, função *gamultiobj*). Mizushima encontrou parâmetros para a suspensão que se mantiveram nos limites da otimização, comportamento similar àquele encontrado na literatura para redução na aceleração na otimização paramétrica de suspensões.

Lee e Cheng, 2014, usaram a otimização por enxames de partículas quânticas (QPSO) para resolver o problema da avaliação da sensibilidade em um sistema de veículo ferroviário com catorze graus de liberdade com equações diferenciais acopladas não-lineares de movimento. Recentemente, Fan *et al.*, 2017, apresentou um novo algoritmo multiobjetivo (MDPL-MOPSO) baseado no PSO, onde uma nova ferramenta, chamada "mínima distancia do ponto à linha", foi usada para otimizar um modelo de suspensão de meio veículo, indicando que o tema ainda é recorrente no meio científico.

O algoritmo metaheurístico QPSO foi proposto por Sun *et al.*, 2004a. Muitos autores usaram o modelo para solucionar problemas multiobjetivos de engenharia, como e Hassani e Lee, 2016. De maneira geral, os autores encontraram resultados satisfatórios apesar da simplicidade dos algoritmos empregados. Muitas melhorias têm sido propostas ao algoritmo QPSO, como aquelas sugeridas por Sun *et al.*, 2004b, Zhou *et al.*, 2016, e Xu *et al.*, 2016. Al-Baity, 2015, estudou o uso do QPSO como uma ferramenta de otimização multiobjetiva, sendo o trabalho mais próximo do algoritmo criado no presente estudo. Os resultados mostram que o QPSO criado por Al-Baity apresenta Fronteiras de Pareto de qualidade superior a aquelas geradas por algoritmos consolidados, como PAEAS, NSGA-II e SPEA2, para certas funções de *benchmark*.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Modelo de dinâmica vertical e lateral acoplada

O modelo numérico do ônibus usado é uma melhoria do modelo descrito em Sekulic *et al.*, 2013, criado a partir do ônibus IK-301. Ao modelo original foram adicionados três novos graus de liberdade e o modelo de pneu *magic formula*. Tais melhorias foram realizadas em [Drehmer, 2017]. O veículo possui um sistema de suspensão com eixos rígidos. O eixo dianteiro está preso ao corpo por meio de duas bolsas pneumáticas e quatro amortecedores telescópicos, e o eixo traseiro está preso por quatro bolsas pneumáticas e quatro amortecedores telescópicos. A Figura 3.1 mostra o modelo espacial oscilatório do ônibus IK-301 com 13 graus de liberdade: deslocamentos verticais de quatro rodas, rotação dos eixos traseiro e dianteiro, deslocamentos dos eixos traseiro e dianteiro, arfagem, rolagem e deslocamento vertical da carroceria do ônibus, lateral, longitudinal e guinada do ônibus e os deslocamentos verticais de um motorista sentado e dois passageiros sentados.

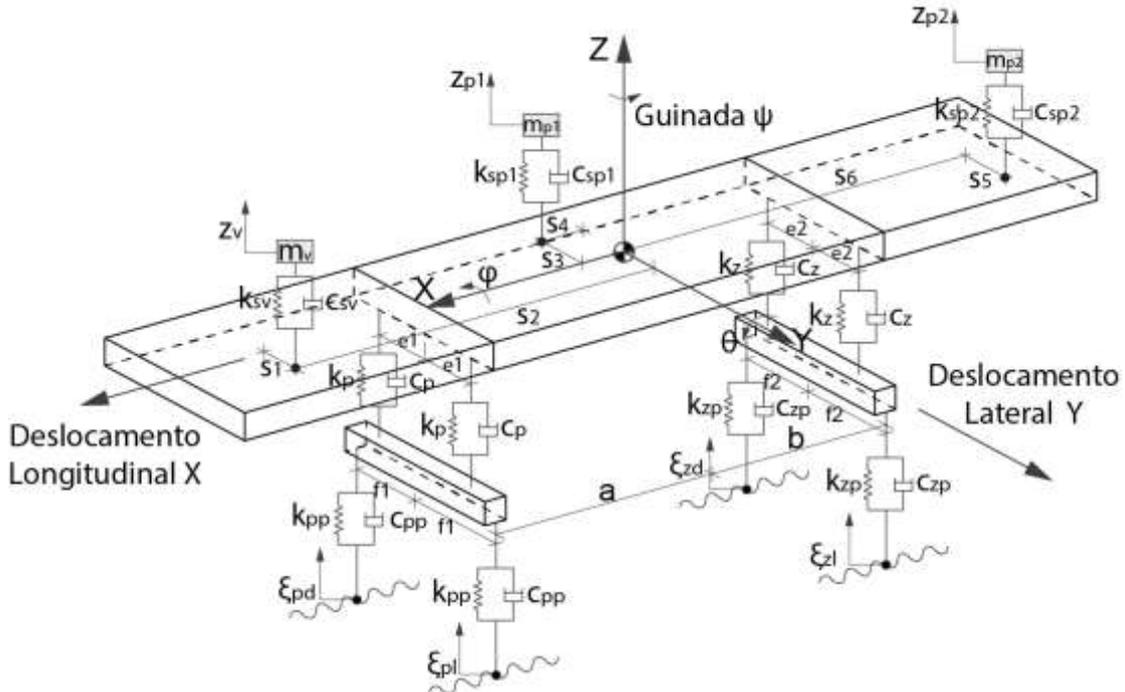


Figura 3.1 – Modelo de suspensão simplificado do ônibus (Modificado de Sekulic *et al.*, 2013)

As equações que descrevem a dinâmica vertical, estão descritas no artigo original [Sekulic *et al.*, 2013] e aquelas referentes à dinâmica lateral, estão listadas a seguir (δ_i representa os ângulos de esterçamento das rodas, e v a velocidade). As variáveis com seus valores nominais e significados podem ser encontradas na Tabela A.2.

- Grau de liberdade lateral (y):

$$m_{zm}\ddot{y} + (c_{a1}\cos\delta_1 + c_{a2}\cos\delta_2 + c_{a3} + c_{a4})\dot{y} + (m_{zm}v^2 + c_{a1}a\cos\delta_1 + c_{a2}a\cos\delta_2 - c_{a3}b - c_{a4}b)\dot{\psi}/v = c_{a1}\delta_1\cos\delta_1 + c_{a2}\delta_2\cos\delta_2 + c_{s1}S_{x1}\sin\delta_1 + c_{s2}S_{x2}\sin\delta_2 \quad (3.1)$$

- Grau de liberdade de guinada (ψ):

$$m_{zm}\ddot{\psi} + (c_{a1}f_1\sin\delta_1 - c_{a2}f_1\sin\delta_2 + c_{a1}a\cos\delta_1 + c_{a2}a\cos\delta_2 - c_{a4}b - c_{a3}b)\dot{y}/v + (c_{a1}af_1\sin\delta_1 - c_{a2}af_1\sin\delta_2 + c_{a1}a^2\cos\delta_1 + c_{a2}a^2\cos\delta_2 - c_{a4}b^2 - c_{a3}b^2)\dot{\psi}/v = f_2c_{s4}S_{x4} - f_2c_{s2}S_{x2} - f_1c_{a2}\delta_2\sin\delta_2 + f_1c_{a2}\delta_1\sin\delta_1 + f_1c_{a1}\delta_1\sin\delta_1 + f_1S_{x2}\cos\delta_2 - f_1c_{s1}\cos\delta_1 + ac_{s1}S_{x1}\sin\delta_1 + ac_{s2}S_{x2}\sin\delta_2 + ac_{a1}\delta_1\cos\delta_1 + ac_{a2}\delta_2\cos\delta_2 \quad (3.2)$$

- Grau de liberdade longitudinal (x):

$$m_{zm}\ddot{x} + (-c_{a1}\sin\delta_1 - c_{a2}\sin\delta_2 + c_{a3} + c_{a4})\dot{y}/v + (-c_{a2}af_1\sin\delta_2 + c_{a1}af_1\sin\delta_1 + c_{a1}a^2\cos\delta_1 + c_{a2}a^2\cos\delta_2 + c_{a3}b^2 + c_{a4}b^2)\dot{\psi}/v = c_{s2}S_{x2}\cos\delta_2 + c_{s1}S_{x1}\cos\delta_1 + c_{s3}S_{x3} + c_{s4}S_{x4} - c_{a1}\delta_1\sin\delta_1 - c_{a2}\delta_2\sin\delta_2 \quad (3.3)$$

3.2 Perfil vertical de estrada e manobra de dupla troca de faixa

O perfil da estrada é gerado usando a norma ISO 8606, 1995, definido como um processo estocástico com função de densidade espectral de potência (PSD) da seguinte forma:

$$G_{\xi}(\Omega) = \begin{cases} C \left(\frac{\Omega}{\Omega_0}\right)^{-w_1} & \text{para } \Omega \leq \Omega_0 \\ C \left(\frac{\Omega}{\Omega_0}\right)^{-w_2} & \text{para } \Omega \geq \Omega_0 \end{cases}, \quad (3.4)$$

onde G_{ξ} é a densidade espectral de potência (PSD) unilateral para rugosidade da estrada ($m^2/\text{ciclo}/m$), C é o coeficiente geral de rugosidade (m^3/ciclo), w é a distribuição de comprimento de onda e Ω é o número de onda (ciclo/m). A PSD é dividida em duas partes na frequência de descontinuidade Ω_0 (ciclo/m). w_1 e w_2 são parâmetros de distribuição de comprimento de onda. Neste estudo, Ω_0 é definido como $0,1 \text{ ciclo}/m$, $w_1 = w_2 = 2,0$ e $C = 0,01 m^3/\text{ciclo}$. A geração do sinal de tempo é criada usando a formulação Shinozuka [Shinozuka, 1972] da seguinte forma:

$$x_a(t_i) = \sum_{i=1}^{n_e} \sqrt{G_a(f_i) \Delta f} \sin(2\pi f_i t_i + \varphi_i), \quad (3.5)$$

onde φ_i e ψ_i são ângulos de fase variando de 0 a 2π , e f_i são as frequências da densidade espectral. As trilhas dianteira e traseira são correlacionadas usando uma simples defasagem na fase. Um modelo de correlação cruzada em termos de densidade espectral é aplicado para correlacionar as trilhas esquerda e direita (G_b):

$$G_b(f) = G_a^*(f) - \gamma(f) G_a(f) + \gamma(f) G_a(f), \quad (3.6)$$

onde $\gamma(f) = f_c^2 / [f_c^2 + (f/v)^2]$ é o filtro passa-baixa, definido por uma frequência de corte $f_c = 0,2 m^{-1}$. $G_a^*(f)$ é a PSD unilateral cujo sinal de tempo será gerado com um diferente ângulo de fase ψ_i .

As irregularidades da estrada irão gerar excitação para a vibração do ônibus no sentido vertical. A Figura 3.2 mostra um sinal de amplitude de tempo típico do perfil da estrada nos quatro pneus usando as equações anteriores para velocidade de $80 \text{ km}/h$ e pista classe C [ISO 8606:1995].

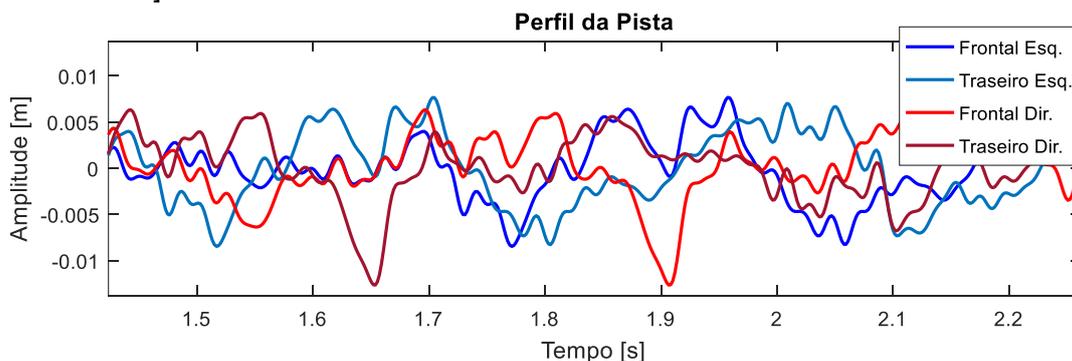


Figura 3.2 – Histórico do sinal no tempo para os quatro pneus gerado usando o modelo de correlação cruzada e deslocamento na fase da PSD.

A ISO 3888-1, 1999 define uma manobra chamada dupla troca de faixa (DLC), na qual um veículo se desloca de sua faixa original em direção a uma faixa paralela e em seguida volta sem ultrapassar os limites impostos pelo teste e mantendo velocidade constante, como mostra a Figura 3.3. A norma é qualitativa, e os parâmetros geométricos e de velocidade podem ser adequados às necessidades do veículo em questão ou do propósito do teste. A manobra de dupla troca de faixa será a principal fonte de excitação lateral para a simulação.

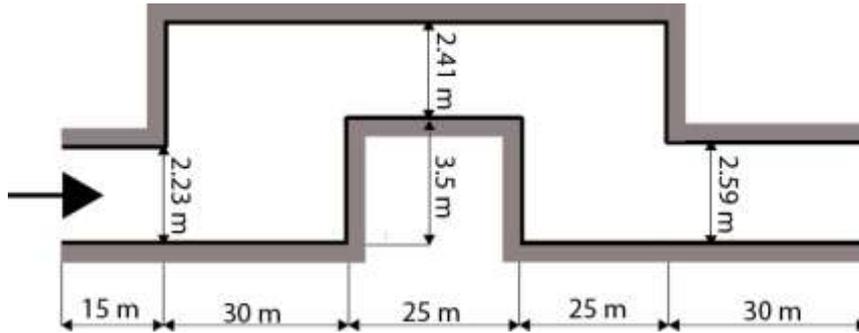


Figura 3.3 – Exemplo de manobra DLC (*Double Lane Change*) com dimensões ajustadas para um veículo de passeio comum.

3.3 Quantum Behaved Particle Swarm Optimization - QPSO

Problemas de otimização caracterizam-se pela busca de pontos de mínimo ou máximo de funções objetivo. A otimização com enxame de partículas (PSO) baseia-se na observação do comportamento de animais sociais como peixes, abelhas e aves. Este método foi proposto inicialmente por Kennedy e Eberhart, 1995, e usa o princípio do aprendizado social, permitindo aos agentes manter uma consistência cognitiva. O PSO não possui convergência garantida, diferente do modelo de partículas quânticas (QPSO) [Sun *et al.*, 2004a].

No modelo QPSO, o estado da partícula é definido por uma função de onda $\Psi_{(x,t)}$ ao invés dos tradicionais parâmetros de velocidade e posição usados pelo PSO. É possível estimar a probabilidade do surgimento da partícula em determinada posição através da função densidade de probabilidade $|\Psi_{(x,t)}|^2$, a qual depende do campo potencial onde a partícula se encontra. O movimento das partículas é definido pelas seguintes equações iterativas, as quais são obtidas usando o método de Monte Carlo.

$$x_{ij}(t+1) = P_{ij} - \beta \cdot (mbest_j(t) - x_{ij}(t)) \cdot \ln\left(\frac{1}{u_{ij}(t)}\right), \quad \text{para } \rho \geq 0.5$$

$$x_{ij}(t+1) = P_{ij} + \beta \cdot (mbest_j(t) - x_{ij}(t)) \cdot \ln\left(\frac{1}{u_{ij}(t)}\right), \quad \text{para } \rho < 0.5$$
(3.7)

$$P_{ij}(t) = \varphi_j(t) \cdot pbest_{ij}(t) + (1 - \varphi_j(t)) \cdot gbest_{ij}(t) \quad (3.8)$$

$$mbest_j(t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n pbest_{ij}(t) \quad (3.9)$$

$$\beta(t) = [(\beta_1 - \beta_0)(T - t)/T] + \beta_0, \quad (3.10)$$

onde i faz referência à partícula, j faz referência à variável de projeto, ***pbest*** representa a melhor posição local de cada partícula ***gbest*** é a melhor posição global do enxame, ***mbest*** é a média das melhores posições de todos os melhores locais, ***pbest***, da população. n é o tamanho da população do enxame, t é o passo da iteração, T é o número total de iterações, β é chamado coeficiente de contração-expansão, e β_1 e β_0 são limites superiores e inferiores para β . ρ , u , e φ , são números aleatórios independentes aleatoriamente distribuídos entre 0 e 1.

3.4 Otimização multiobjetivo

Problemas de otimização multiobjetivo (MOP) são usados para estudar o comportamento de objetivos conflitantes e para explorar as opções de *design* disponíveis. Diferentes da otimização mono-objetiva tradicional, MOP apresentam múltiplas funções de respostas $\mathbf{f}(\mathbf{X}_i) = \{f_1(\mathbf{X}_i), f_2(\mathbf{X}_i), \dots, f_k(\mathbf{X}_i)\}^T$ para um conjunto de variáveis de projeto $\mathbf{X}_i =$

$\{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}\}^T$. O conceito de Fronteira de Pareto é uma abordagem comumente usada na solução de MOP. É definido que um vetor solução $f(\mathbf{X}_A)$ domina outro vetor solução $f(\mathbf{X}_B)$ se, e somente se, (no caso da minimização), $f_i(\mathbf{X}_A) \leq f_i(\mathbf{X}_B)$ para $i=1$ até k (sendo k o número de funções objetivo) e para ao menos um dos índices j , $f_j(\mathbf{X}_A) < f_j(\mathbf{X}_B)$. Se a regra mencionada não for violada, ambos os vetores de variáveis de projeto são chamados não-dominados entre si, e formam o conjunto P_s , onde $P_s = \{\mathbf{X}_i \in \mathbf{X} \mid \nexists \mathbf{X}_j > \mathbf{X}_i\}^T$ (lê-se: o conjunto de vetores solução, \mathbf{X}_i , que pertencem ao espaço de busca \mathbf{X} no qual não existe um vetor \mathbf{X}_j que domine \mathbf{X}_i). O conjunto de todos os vetores solução não-dominados no espaço das funções objetivo é chamado Fronteira de Pareto ($P_f = \{f(\mathbf{X}_i) \mid \mathbf{X}_i \in P_s\}$).

3.4.1 MOQPSO (*Multiobjective Quantum Behaved Particle Swarm Optimization*)

O algoritmo proposto no presente estudo (chamado de MOQPSO) é baseado na Dominância de Pareto, nas equações base do QPSO de Sun *et al.*, 2004a, e na estratégia repositório de banco de dados, similares àquelas apresentadas por Branke e Mostaghim, 2006, e Knowles e Corne, 1999. A ideia por trás desta estratégia é manter as melhores posições guardadas em um arquivo externo, o qual passa por manutenção ao final de cada iteração. O MOQPSO usa três arquivos distintos, f_p para armazenar as melhores posições individuais, f_{G1} para armazenar as melhores posições globais e f_{G2} para armazenar as melhores posições globais filtradas por um critério de distância mínima. Um fluxograma do algoritmo pode ser visto na Figura A.1.

No lugar do clássico único guia, $mbest_j(t)$ do QPSO, cada partícula no MOQPSO recebe seu guia específico em cada iteração. A seleção do guia é feita de duas formas: usando partículas extremas a fim de aumentar o espalhamento e amplitude da Fronteira de Pareto e usando as partículas mais próximas pertencentes à f_{G1} na iteração atual (ver Figura A.2 e Figura A.3). Para o caso da escolha por partículas extremas, um método baseado na média geométrica é usado a fim de penalizar escolhas de extremos que estão próximos entre si. A variável definida por $x_{ij}(t)$ na equação 3.7 é substituída por $pbest_{ij}(t)$. Todas as modificações feitas às equações principais do QPSO, e aos mecanismos secundários do algoritmo, foram fundamentadas em extensivos testes usando equações de *Benchmark*, tais como Schaffer-1, Kursawe, Zitzler-1, Zitzler-2, Zitzler-3, Zitzler-4, Zitzler-5, Zitzler-6, Fonseca, Viennet-2 e Viennet-3, descritas em Coello *et al.*, 2007.

3.4.2 NSGA-II (*Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II*)

O algoritmo genético NSGA-II é bastante popular no meio científico, sendo uma ferramenta de otimização rápida e muito difundida. Os algoritmos genéticos usam os conceitos de mutação, *crossover* e seleção, criando um sistema análogo ao processo evolutivo observado por Darwin, no qual os indivíduos mais adaptados são selecionados e criam uma nova geração.

Muitos algoritmos genéticos foram propostos nas últimas duas décadas. O principal motivo por trás disso é a habilidade única conferida a algoritmos deste gênero de gerar múltiplas soluções ótimas de Pareto baseado apenas em uma simulação de função objetivo [Deb *et al.*, 2002]. Segundo Deb *et al.*, 2002, o algoritmo NSGA-II é uma melhoria do seu antecessor, NSGA, no qual se corrigiu as principais críticas conferidas a ele: Alta complexidade computacional da classificação de dominância, falta de elitismo (chance de cópia dos melhores candidatos diretamente para a geração posterior), e necessidade de se especificar um parâmetro de compartilhamento. Este parâmetro é usado para garantir a diversidade que influencia fortemente o espalhamento e amplitude da fronteira, mas que possui grande complexidade computacional. Um fluxograma simplificado por ser visto na Figura A.4.

3.5 Vibração de corpo inteiro de acordo com a ISO 2631-1 (1997)

A ISO 2631-1, 1997, classifica a vibração sobre seres humanos em dois grupos: vibração nas mãos e braços, e vibração de corpo inteiro. Pesquisas recentes mostram

preocupação com os efeitos da vibração de corpo inteiro (0,1 a 80 Hz) em assentos de veículos em relação ao conforto do passageiro como em Ji *et al.*, 2017, que investigou o efeito do uso de assentos de espuma e ar na redução da vibração incidente em passageiros. O efeito do desconforto em motoristas quando expostos à vibração por longos períodos [Sammonds *et al.*, 2017] indicam que existe uma preocupação atual no estudo de materiais e soluções para mitigar a tal vibração.

A amplitude da vibração pode ser quantificada pelo valor *rms* (*root mean square*) do sinal da aceleração, o qual resulta na energia média contida no movimento oscilatório relacionado ao potencial prejudicial da vibração. Nomeando a aceleração como $a(t)$, para um intervalo de tempo $t_1 \leq t \leq t_2$ a aceleração *rms* pode ser obtida por,

$$a_{rms} = \sqrt{\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} [a(t)]^2 dt} \quad (3.11)$$

onde a representa a aceleração, e t o tempo. Segundo a ISO 2631-1, 1997, o efeito da vibração no corpo humano é classificado de acordo com a magnitude e tempo de exposição, onde para pequenas magnitudes, a preocupação principal é relacionada ao conforto. De acordo com Griffin, 1990, o impacto gerado pela vibração que incide em um corpo é não só ditado pela intensidade da aceleração, mas também pela frequência da mesma. A ISO 2631-1, 1997, recomenda o uso da aceleração ponderada pela frequência, como mostra a equação a seguir,

$$a_w = [\sum_i (w_i a_i)^2]^{1/2}, \quad (3.12)$$

onde a_w é a aceleração ponderada pela frequência, w_i é a ponderação atribuída ao i -ésimo terço de banda de oitava, e a_i é a aceleração *rms* da respectiva banda de frequência. A Tabela 3.1 mostra os principais limites estabelecidos pela ISO 2631-1, 1997.

Tabela 3.1 – Limites de aceleração para conforto e potenciais danos à saúde. Adaptado da ISO 2631-1, 1997.

Saúde (ISO 2631-1, 1997)		
	a_{rms}	VDV
Valor de ação de exposição (8h): VAE*	0,43 m/s ²	8,5 m/s ^{1,75}
Valor de limite de exposição (8h): VLE*	0,86 m/s ²	17,0 m/s ^{1,75}
Conforto (ISO 2361-1, 1997)		
Não desconfortável	< 0,315 m/s ²	
Levemente desconfortável	0,63 m/s ²	
Razoavelmente desconfortável	1,0 m/s ²	
Desconfortável	1,6 m/s ²	

*valores implícitos das figuras para uma exposição diária de 8 horas usando eq. B.1.

Caso o fator de crista do sinal medido (a_{pico}/a_{rms} , aceleração de pico dividido pela aceleração *rms*) seja maior do que 9, a norma ISO 2631-1, 1997, recomenda avaliar os efeitos nocivos da vibração de impacto e utilizar outros valores de VDV (Vibration Dose Value), mais adequados para este tipo de vibração.

4 METODOLOGIA

Acoplando os algoritmos multiobjetivos à simulação com o modelo numérico da suspensão do ônibus, é possível gerar Fronteiras de Pareto e comparar a dominância entre as soluções de cada algoritmo. Por fim, resta analisar o comportamento e impacto das variáveis de projeto sobre a função objetivo, onde espera-se encontrar padrões similares àqueles apontados pela bibliografia. As normas para avaliação da vibração são aplicadas sobre a solução de forma a quantificar as melhorias atingidas pela otimização.

O modelo numérico do ônibus mantém velocidade constante de 80 km/h em uma estrada classe C (ISO 8606, 1995). Para a realização da manobra DLC (ISO 3888-2), os

ângulos de esterçamento da direção δ_i nas duas rodas dianteiras geram uma trajetória senoidal dupla e espaçada por uma um trecho de direção reta, como pode ser visto na Figura A.5. A geometria original da DLC é esticada em 4.8 vezes para que a manobra seja realizável pelo ônibus mantendo tal velocidade. As equações de dinâmica lateral acopladas às equações diferenciais da dinâmica vertical são resolvidas no tempo pelo método de Newmark não-linear [Mizushima, 2017]. Os valores nominais dos parâmetros geométricos, inerciais, de rigidezes, e de amortecimentos, podem ser encontrados na Tabela A.1 e Tabela A.2.

4.1 Problema Multiobjetivo

A fim de reduzir o desconforto e os danos à saúde, o problema multiobjetivo foi definido como a minimização da aceleração vertical *rms* de dois passageiros estrategicamente posicionados e do motorista. A escolha da posição dos passageiros tem o intuito de avaliar a aceleração em diferentes regiões do ônibus. O passageiro 1 é localizado no assento próximo ao centro de gravidade, do lado direito do ônibus, e o passageiro 2 é localizado no ultimo assento, do lado esquerdo do ônibus (ver Figura 3.1). Os limites para as variáveis de projeto são definidos por uma variação de 25% para mais e para menos dos valores nominais.

$$\begin{aligned} \text{Minimizar:} & & f_i(x) = a_{z\ rms,i}, & i = 1,2,3 \\ \text{Sujeito a:} & & x_i \in [0,75 \cdot x_{i,ref}; 1,25 \cdot x_{i,ref}] & \end{aligned} \quad (4.1)$$

onde $f_i(x)$ refere-se às múltiplas funções objetivas, i refere-se aos passageiros e ao motorista, e $a_{z\ rms,i}$ é o valor *rms* da aceleração vertical instantânea para cada passageiro e para o motorista.

As variáveis de projeto usadas são as rigidezes e amortecimentos da suspensão ($k_{sv}, k_{sp1}, k_{sp2}, k_p, k_z, c_{sv}, c_{sp1}, c_{sp2}, c_p, c_z$, ver Tabela A.2). Como os assentos de passageiros são considerados os mesmos em toda a extensão do ônibus, os parâmetros k_{sp1} e k_{sp2} , assim como os parâmetros c_{sp1} e c_{sp2} são considerados iguais entre si, o que significa que um total de 8 variáveis de projeto foram usadas na otimização.

4.2 Parâmetros dos Algoritmos

Verificou-se que 99,98% do tempo gasto nas otimizações é empregado nas chamadas as funções multiobjetivo. Este número de chamadas é fixado a fim de manter o custo computacional dos algoritmos em igualdade para comparações. Diferentes parâmetros foram testados em ambos os algoritmos, onde optou-se por usar as configurações que geraram as melhores Fronteiras de Pareto. Para o NSGA-II, os parâmetros escolhidos foram o de uma população de 800 indivíduos e número máximo de 177 gerações, totalizando 135324 chamadas as funções multiobjetivo. Para o MOQPSO, o número de iterações foi 6000 com 50 partículas e com $\beta_1 = 1,3$ e $\beta_0 = 0,3$, totalizando 135325 chamadas as funções multiobjetivo. Uma segunda otimização foi realizada com o MOQPSO, o número de iterações foi 6000 com 100 partículas e com $\beta_1 = 1,3$ e $\beta_0 = 0,3$, totalizando 291932 chamadas da função objetivo. Múltiplos testes foram realizados com o algoritmo NSGA-II implementado nativamente no software MATLAB (função *gamultiobj*), porém tais testes mostraram que o algoritmo foi insuficiente para este caso particular, apresentado fronteiras com má convergência e espalhamento, mesmo depois de um estudo extensivo sobre os parâmetros utilizados pelo algoritmo (Figura A.6).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Fronteira de Pareto gerada pelo algoritmo MOQPSO pode ser comparada com aquela gerada pelo NSGA-II na Figura 5.1, onde o número de simulações para cada algoritmo foi de 135324. As soluções obtidas pelo NSGA-II foram completamente dominadas por aquelas obtidas pelo MOQPSO, que por sua vez não teve nenhuma solução dominada. Além disso é possível notar que a Fronteira gerada pelo MOQPSO é mais ampla, atingindo locais

inexplorados pelo algoritmo NSGA-II, o que possibilita uma análise mais completa do comportamento das soluções ótimas do sistema.

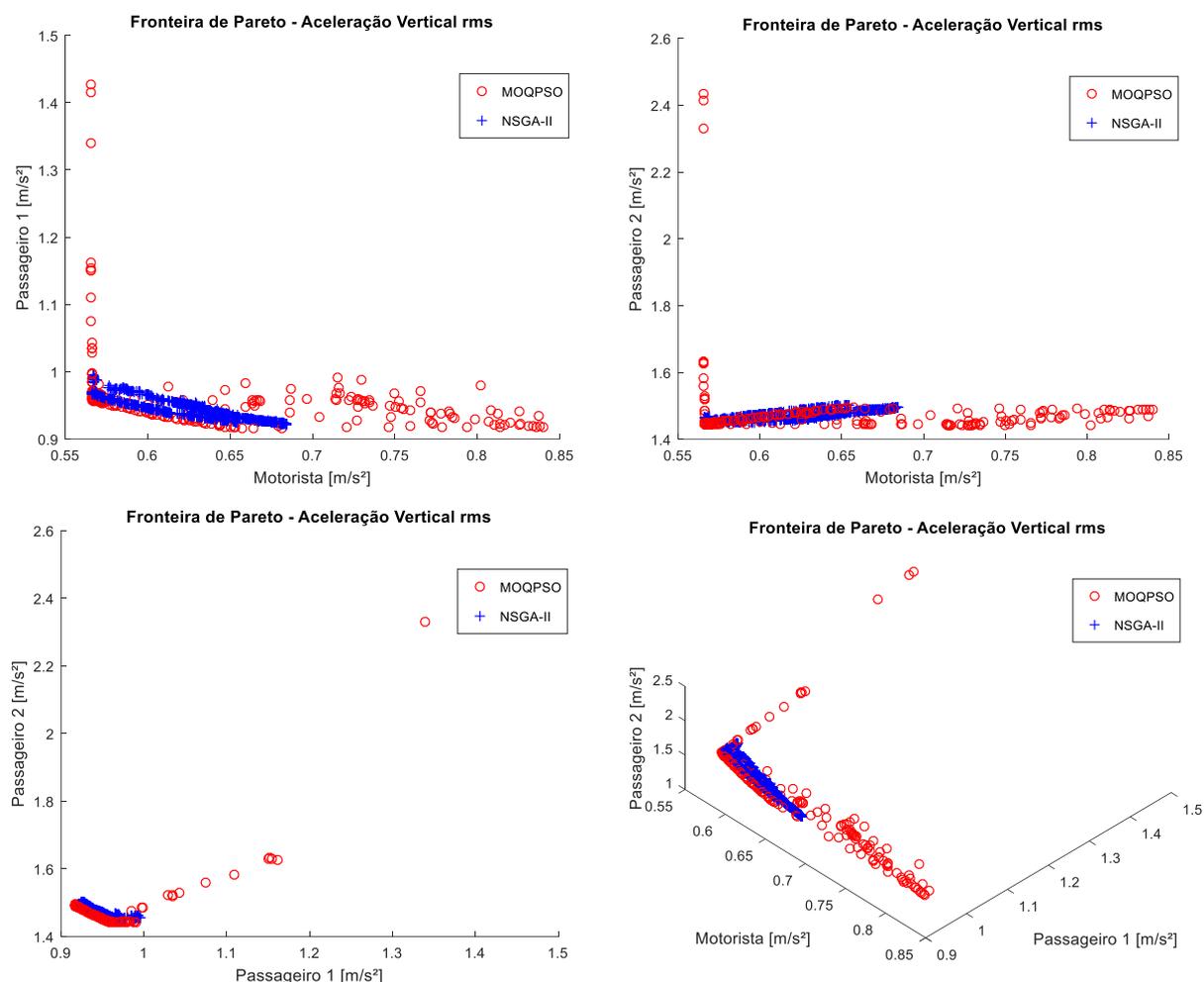


Figura 5.1 – Comparação da Fronteira de Pareto: MOQPSO e NSGA-II. Ambas as fronteiras foram geradas com 135324 simulações.

Dado que o MOQPSO obteve uma Fronteira de Pareto de qualidade superior quando comparada com o NSGA-II, outra otimização foi feita com mais simulações (291932) usando o MOQPSO para aumentar ainda mais a qualidade da Fronteira, a qual pode ser vista na Figura 5.2. A Tabela 5.1 mostra as variáveis de projeto correspondentes para cada ponto solução na Fronteira de Pareto, marcadas com círculos e indicadas com letras maiúsculas. O ponto H é a resposta da vibração gerada com valores nominais para os parâmetros da suspensão, e o ponto A indica a solução das funções objetivo ponderadas com igual importância.

A Figura 5.3(a) mostra um sinal típico de aceleração para o motorista com a solução otimizada A e a Figura 5.3(b) um sinal com os parâmetros nominais. As acelerações dos passageiros 1 e 2 podem ser vistas na Figura A.7 e Figura A.8, respectivamente, onde existe uma redução nítida da aceleração *rms* incidente sobre os passageiros, principalmente na direção vertical. O fator de crista se mostrou inferior a 9 em todas as condições, o que mostra que a vibração de impacto não é um problema para este caso em particular.

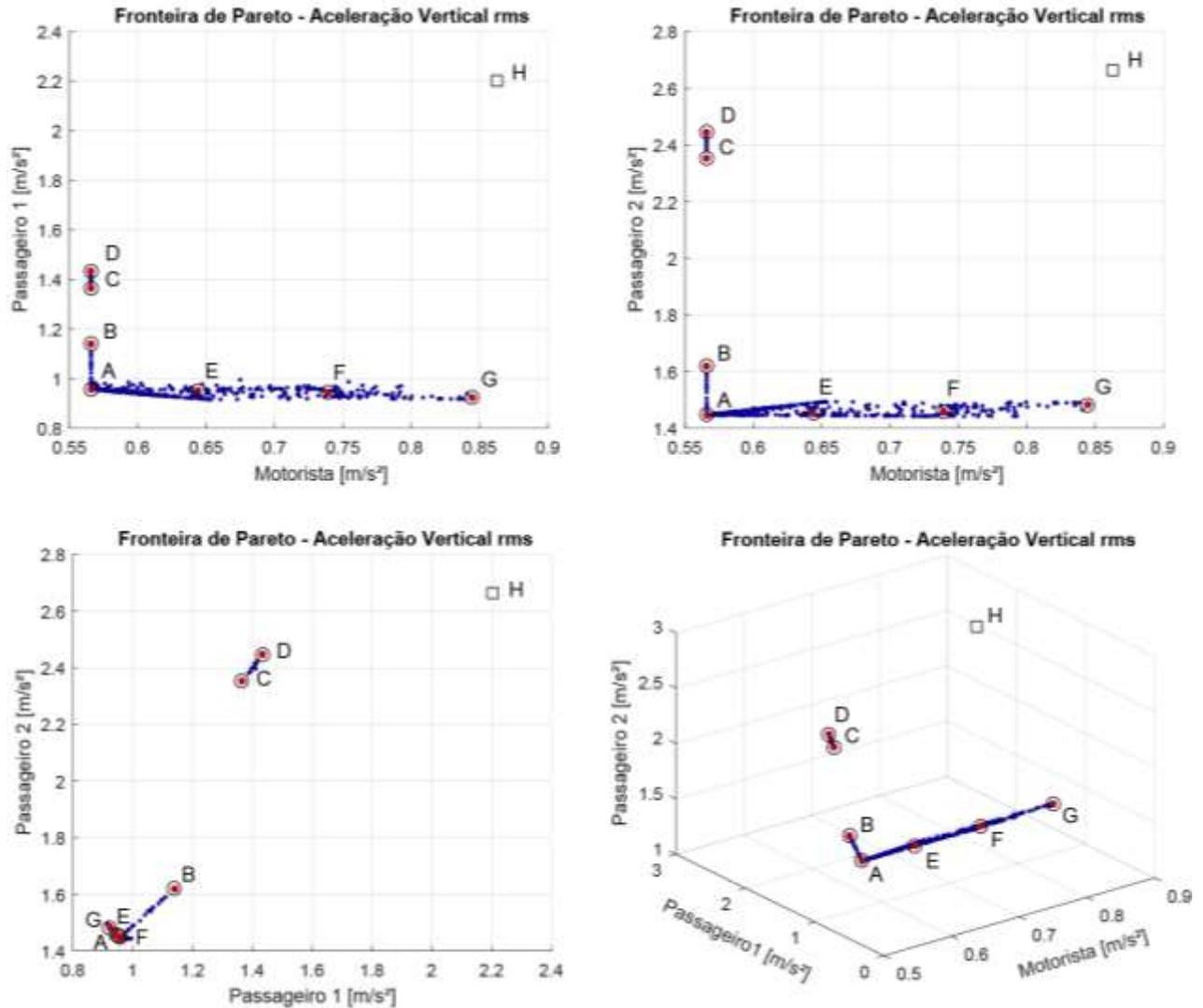


Figura 5.2 – Fronteira de Pareto: MOQPSO. Gerada com 291932 simulações.

Tabela 5.1 – Soluções selecionadas da fronteira de Pareto.

	k_{sv}	k_{sp1}, k_{sp2}	k_p	k_z	c_{sv}	c_{sp1}, c_{sp2}	c_p	c_z	$f_1(\mathbf{x})$	$f_2(\mathbf{x})$	$f_3(\mathbf{x})$
A	7500*	30000*	131250*	306490*	783.73	275.00**	30000*	34480*	0.56597	0.95736	1.44720
B	7500*	30000*	131250*	306490*	789.36	169.82	30000*	34480*	0.56580	1.13980	1.61880
C	7500*	30000*	131250*	306490*	762.85	187.60	30000*	56911	0.56578	1.36500	2.35280
D	7500*	30000*	131250*	306490*	756.00	165.00*	30000*	57466**	0.56569	1.43330	2.44670
E	9192.7	30000*	142740	306490*	814.79	275.00**	30000*	34480*	0.64384	0.95170	1.45180
F	11876	30000*	159300	306490*	937.50**	275.00**	30000*	34480*	0.73907	0.94361	1.45810
G	12456	30000*	205530	306490*	829.39	275.00**	30000*	34480*	0.84458	0.92355	1.48280
Nominal (H)	10000	40000	175000	408650	750	220	40000	45973	0.86322	2.20337	2.66101

Nota: * limite inferior da variável de projeto, ** limite superior da variável de projeto. f_1, f_2 e f_3 correspondem à aceleração vertical rms no motorista, passageiro 1 e passageiro 2, respectivamente.

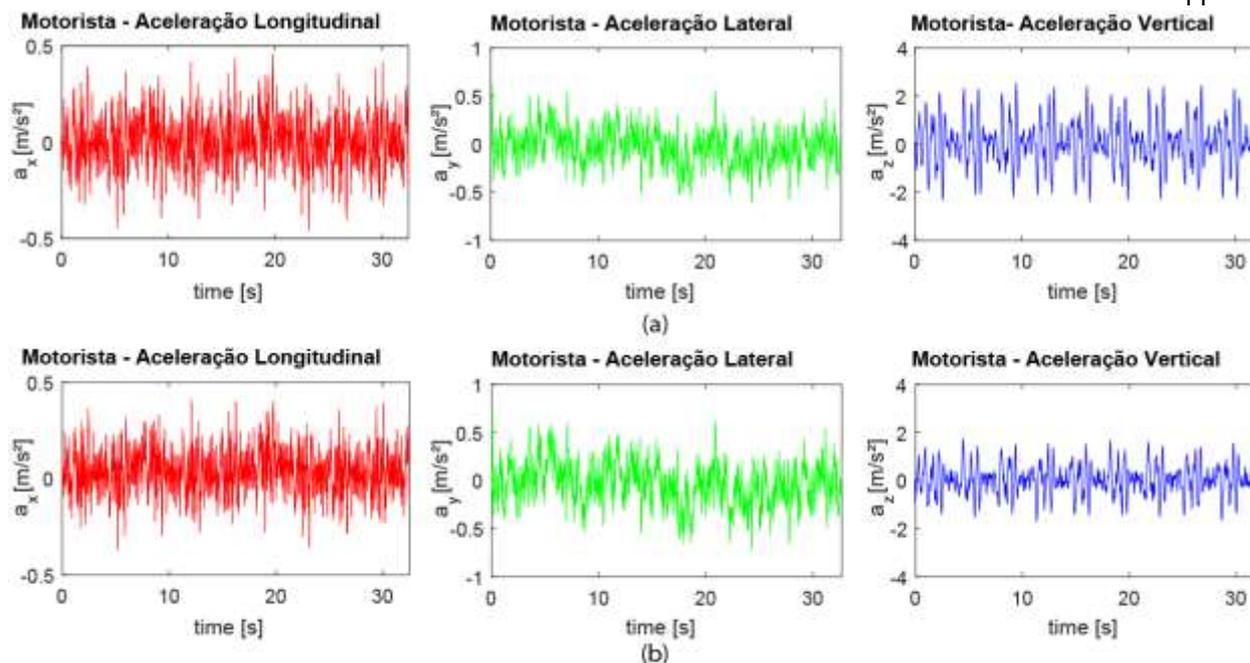


Figura 5.3 – Sinal típico de aceleração longitudinal, lateral e vertical para o motorista: (a) Gerado a partir dos parâmetros nominais das variáveis de projeto, H, e (b) Solução otimizada A.

A Tabela 5.2 mostra a comparação entre a aceleração *rms* ponderada por frequência (a_{wz} *rms*) descrita na ISO 2331-1 da solução A até a H.

Tabela 5.2 – Aceleração *rms* ponderada para avaliar o risco à saúde (ISO 2331-1, 1997) para os casos A a H em $[m/s^2]$.

Caso da Fronteira de Pareto	A	B	C	D	E	F	G	H (nominal)
Motorista (8h) $[m/s^2]$	0.5659	0.5658	0.5658	0.5657	0.6438	0.7391	0.8446	0.8632
Passageiro 1 $[m/s^2]$	0.0321	0.0382	0.0458	0.0481	0.0325	0.0316	0.0310	0.0739
Passageiro 2 $[m/s^2]$	0.0485	0.0543	0.0789	0.0821	0.0487	0.0489	0.0497	0.0892

A Figura 5.4 mostra a diminuição no risco para a saúde do motorista de acordo com a Norma ISO 2631-1 (1997) comparando a resposta de aceleração da solução otimizada A com a resposta da aceleração encontrada usando valores nominais, H. De acordo com a Figura 5.4, a aceleração do motorista está na zona de risco à saúde (Equação B.1, ISO 2631-1) para o ônibus viajando sob as condições especificadas, usando valores nominais para a suspensão. Para a otimização A, a condição do motorista foi trazida para a zona de precaução, na qual não há risco iminente para a saúde.

Os passageiros também foram beneficiados pela solução A. A redução da aceleração *rms* é significativa, principalmente no sentido vertical, e pode ser observada na Figura A.7 e na Figura A.8. A Aceleração Total Equivalente, usada para avaliação do conforto, leva em consideração fatores multiplicadores diferentes daqueles usados na avaliação de saúde. A Tabela 5.3 mostra a Aceleração Total Equivalente correspondente para o motorista e para os passageiros.

Das Tabelas 3.1 e 5.3, percebe-se que, apesar de o motorista, o passageiro 1 e o passageiro 2 estarem classificados sem uma situação "Não Desconfortável" para parâmetros nominais, seus valores de aceleração foram reduzidos em aproximadamente um terço e pela metade, respectivamente, da solução nominal para as soluções otimizadas.

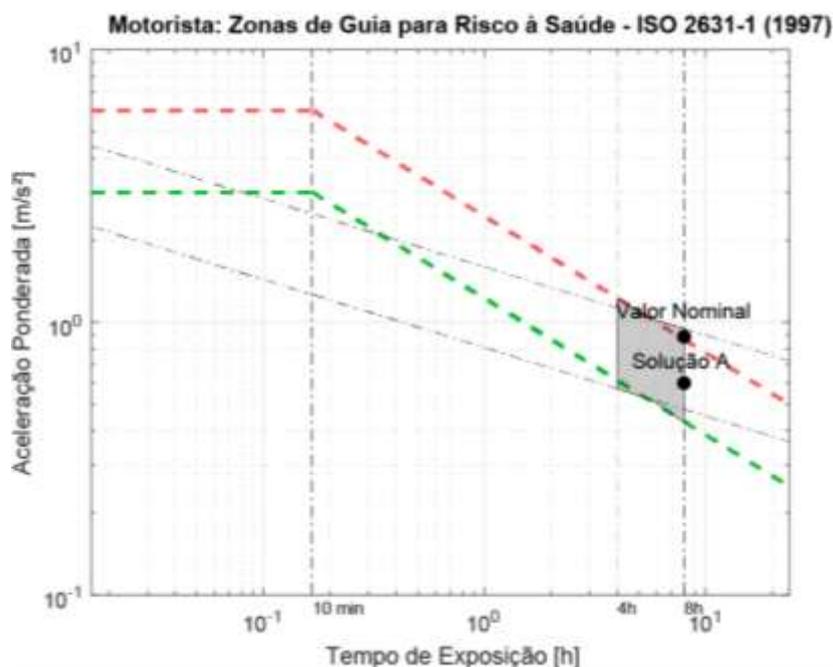


Figura 5.4 – Zonas de orientação para o risco à saúde do motorista, ISO 2631-1 (1997). Comparação entre a solução A e o valor obtido com os parâmetros nominais.

Tabela 5.3 – Aceleração Total Equivalente, usada na avaliação do conforto, (ISO 2331-1, 1997) para os casos A a H em $[m/s^2]$.

Caso da Fronteira de Pareto	A	B	C	D	E	F	G	H (nominal)
Motorista	0.0200	0.0200	0.0203	0.0203	0.0225	0.0256	0.0291	0.0298
Passageiro 1	0.0327	0.0387	0.0463	0.0486	0.0325	0.0323	0.0316	0.0742
Passageiro 2	0.0489	0.0547	0.0792	0.0824	0.0491	0.0493	0.0502	0.0895

Pela análise da Tabela 5.1, é notável que a rigidez dos bancos do passageiro 1 e 2, k_{sp1} e k_{sp2} , e a rigidez equivalente no lado direito e esquerdo do eixo traseiro, k_z são mantidos no limite inferior da otimização (75% dos valores nominais). Trabalhos anteriores como aquele apresentado por Sharp e Crolla, 1987, mostraram que o uso de rigidezes e amortecimentos mais baixos na suspensão reduzem a aceleração no corpo do carro usando um modelo de quarto de carro. O resultado é confirmado no presente modelo numérico mais complexo.

A rigidez equivalente na bolsa pneumática da suspensão do eixo frontal, k_p , e a rigidez da mola do banco do motorista, k_{sv} , não são mantidos no limite da otimização em todas as soluções, o que é uma contradição aparente ao que foi dito anteriormente. A Figura 5.2 e a Tabela 5.1 mostram que as soluções E, F e G resultam em um pequeno decréscimo na aceleração vertical dos passageiros enquanto aumenta a aceleração do motorista. Uma hipótese para explicar este comportamento é que, quanto maior a rigidez da bolsa pneumática da suspensão frontal, k_p , e a rigidez da mola do banco do motorista, k_{sv} , menor é o deslocamento relativo da massa suspensa nessa região, e maior é a aceleração na frente do veículo. Por outro lado, o resto da suspensão é propensa a dissipar mais energia, o que gera menores acelerações para os passageiros 1 e 2. Esse comportamento foi constatado em uma análise baseada na dissipação de energia nos amortecedores frontais e traseiros, onde mais energia é dissipada localmente em regiões com menores valores de amortecimento com velocidades relativas mais altas.

O amortecimento equivalente do lado direito e esquerdo do eixo frontal, c_p , também é mantido no limite inferior da otimização, enquanto seu correspondente traseiro, c_z , segue o mesmo padrão, com exceção das soluções C e D (ver Tabela 5.1 e Figura 5.2). Este é

um resultado interessante, onde uma pequena redução na aceleração do motorista compromete a aceleração dos passageiros. No caso C e D, todas as variáveis de projeto são mantidas constantes, exceto por c_{sv} , c_{sp1} , c_{sp2} e c_z . Como esperado, quando o amortecimento equivalente nos lados direito e esquerdo do eixo traseiro, c_z , aumenta, a aceleração dos passageiros também aumenta. O motivo por trás disso pode ser explicado pela hipótese anterior, analogamente.

Apesar de ser bem conhecido que a redução da rigidez e do amortecimento acarreta em redução da aceleração *rms* vertical nos passageiros (Sharp e Crolla, 1987), o comportamento da solução no presente estudo mostra pequena redução da aceleração em diferentes locais do modelo quando rigidezes e amortecimentos em locais opostos da suspensão aumentam (ver soluções C e D, Tabela 5.1 e Figura 3.1). Este resultado indica que, apesar de modelos simplificados serem muito úteis para entender fenômenos e dissecar comportamentos complexos, eles podem induzir generalizações que nem sempre funcionam.

Ainda que a otimização tenha aumentado o conforto dos passageiros e do motorista, os valores atingidos pelas variáveis de projeto não necessariamente são ideias para veículos reais. Valores baixos de rigidez e amortecimento impactam negativamente na responsividade da direção. Além disso, baixos parâmetros de rigidezes e amortecimentos criam a necessidade de aumentar o espaço de trabalho da suspensão, que por sua vez sobe o centro de massa do veículo e diminui a dirigibilidade. A Tabela 5.4 mostra o espaço de trabalho da suspensão para as soluções selecionadas em comparação com o valor nominal. O aumento do espaço de trabalho da suspensão ficou entre 4% e 7,5% para as otimizações. Quanto à frequência natural, os valores para a otimização A ficaram em 0,893 Hz, 0,959 Hz, 1,11 Hz, 1,41 Hz e 2,92 Hz, contra, 1,01 Hz, 1,09 Hz, 1,25 Hz, 1,63 Hz e 3,37 Hz para os valores nominais das variáveis de projeto.

Tabela 5.4 – Máximo espaço de trabalho da suspensão.

Caso da Fronteira de Pareto	A	B	C	D	E	F	G	H (Nominal)
Espaço de trabalho da suspensão (m)	0.407	0.407	0.411	0.412	0.411	0.412	0.418	0.389

6 CONCLUSÕES

Um modelo numérico complexo de suspensão veicular de ônibus que inclui dinâmica lateral e correlação entre trilhas laterais e longitudinais foi simulado sobre uma pista com irregularidades geradas de acordo com a norma ISO, executando uma manobra DLC a uma velocidade de 80 km/h. O modelo foi acoplado a dois algoritmos multiobjetivos: o NSGA-II e o MOQPSO, onde o último se mostrou mais eficiente para o caso em particular.

O algoritmo proposto teve resultado muito satisfatório quando comparado ao NSGA-II, onde todas as soluções geradas pelo MOQPSO se mostraram dominantes, e todas as soluções geradas pelo NSGA-II se mostraram dominadas. Além da convergência, o MOQPSO também apresentou uma maior amplitude na extensão da Fronteira de Pareto, expandindo a fronteira para locais inexplorados pelo NSGA-II.

As soluções da otimização mostraram melhorias quanto à atenuação da vibração. Para a solução A, o motorista saiu da zona de risco à saúde definida pela ISO 2631-1, 1997. Quanto ao conforto, uma redução média de aceleração *rms* vertical de cerca de 50% foi atingida para os passageiros, e 33% para o motorista. As tendências gerais para as variáveis de projeto corresponderam, de maneira geral, com aquelas encontradas na literatura, e a pequena discrepância pode ser atribuída a interações complexas entre diferentes partes do sistema de suspensão.

Para trabalhos futuros, diferentes variáveis de projeto podem ser selecionadas, como parâmetros geométricos da suspensão, pressão dos pneus, e também outras funções objetivo, como espaço de trabalho da suspensão e forças de reação no solo. O efeito da redução da aceleração nos passageiros com o aumento da rigidez da suspensão em regiões opostas (Tabela 5.1 e Figura 5.2) também é um campo válido para novos trabalhos, bem como

uma comparação entre a performance da suspensão otimizada e suspensões com controle ativo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ahmadian, M. T., Sharifi, S. R., Abdollahpour, R. “**Application of car active suspension in a vertical acceleration reduction of vehicle due to road excitation and its effect on human health**”. 5th. International Conference on Multibody Systems, Nonlinear Dynamics and Control, Long Beach, California, USA, pp. 375-382. 2005.

Al-Baity, H., “**A Quantum Behaved Particle Swarm Approach to Multiobjective Optimization**”. PhD Thesis. The University of Birmingham. 2015.

Baumal, A. E., McPhee, J., Calamai, P. H. “**Application of genetic algorithms to the optimisation of an active vehicle suspension design**”. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 163, pp. 87-94. 1998.

Branke, J., Mostaghim, S. “**About selecting the personal best in multiobjective particle swarm optimization**”, Parallel Problem Solving from Nature. 2006. PPSN IX, 4196:523-532.

Coello, C. A. C., Lamont, G. B., van Veldhuizen, D. A. “**Evolutionary Algorithms for Solving Multiobjective Problems**”. Second Edition. Springer Verlag Publisher. pp. 175-228. 2007. ISBN: 978-0-387-33254-3.

Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., Meyarivan, T. “**A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II**”. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, V.6 (2), 2002. DOI: 10.1109/4235.996017.

Drehmer, L. R. C. “**Otimização robusta multiobjetivo por análise de intervalo não probabilística: uma aplicação em conforto e segurança veicular sob dinâmica lateral e vertical acoplada**”. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Tese de Doutorado, Porto Alegre, RS, 2017.

Fan, Z., Wang, T., Cheng, Z., Li, G., Gu, F., “**An Improved Multiobjective Particle Swarm Optimization Algorithm Using Minimum Distance of Point to Line**”. Hindawi, Shock and Vibration. 2017.

Gomes, H. M. “**Multi-objective optimization of quarter car passive suspension design in the frequency domain based on PSO**”, Engineering Computations, 33(5):1422-1434, 2016. DOI: 10.1108/EC-01-2015-0021.

Grotti, E., Awruch, M. D. F., Gomes, H. M. “**Otimização Multiobjetivo de Parâmetros de Suspensão Veicular com algoritmo QPSO**”, Proceedings of DINCON 2017, Conferência Brasileira de Dinâmica, Controle e Aplicações, São José do Rio Preto, São Paulo, 30 de outubro a 1 de novembro de 2017.

Griffin, M. J. “**Handbook of human vibration**”. London: Academic Press Limited. 1990. ISBN: 978-0-12-303040-5.

ISO 8606:1995. “**Road surface profiles - Reporting of measured data**”.1995.

ISO 3888:1999. “**Test track for a severe lane-change maneuver**”. 1999.

Ji, X., Eger, T. R., Dickey, J. P. “**Evaluation of the vibration attenuation properties of an air-inflated cushion with two different heavy machinery seats in multi-axis vibration environments including jolts**”. Applied Ergonomics, 59:293-301. 2017. DOI: 10.1016/j.apergo.2016.06.011.

Kennedy, J., Eberhart, R. “**Particle Swarm Optimization**”. Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks. IV. pp. 1942–1948.1995.

Knowles, J., Corne, D. **"The pareto archived evolution strategy: A newbaseline algorithm for pareto multiobjective optimisation"**, Proceedings of the 1999 Congress on Evolutionary Computation, 1999. (CEC 99), Volume 1. IEEE 1999. DOI: 10.1109/CEC.1999.781913

Lee, C. K., Cheng, Y. C. **"Application of uniform design and quantum-behaved particle swarm optimization in solving the sensitivity problem a railway vehicle system"**. Procedia Engineering. Volume 79, Pages 427-436. 2014.

MATLAB, **"MATrix LABoratory, R2012a"**. The MathWorks Inc., Natick, MA, <www.mathworks.com/>. Acessado em 01/09/2016. 2012.

Mizushima, D. M. **"Otimização de parâmetros de suspensão veicular com algoritmo heurístico QPSO"**, 2017. 15f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

Sammonds, G. M., Fray, M., Mansfield, N. J. **"Effect of long term driving on driver discomfort and its relationship with seat fidgets and movements"**. Appl. Ergon. 58: 119-127. 2017. DOI: 10.1016/j.apergo.2016.05.009.

Sekulic, D., Dedovic, V., Rusov, S., Salinic, S., Obradovic, A. **"Analysis of vibration effects on the comfort of intercity bus users by oscillatory model with ten degrees of freedom"**. Applied Mathematical Modelling, Volume 37, pp.8629-8644. 2013.

Shinokuza, M, Jan, C. M. **"Digital Simulation of Random Process and its applications"**. Journal of Sound and Vibration, v. 25-1. pp. 111-128, 1972.

Spentzas, K., Kanarachos, S. A. **"Design of a non-linear hybrid car suspension system using neural networks"**. Mathematics and Computers in Simulation, Volume 60, pp. 369-378. 2002.

Sun, J., Feng, B., Xu, W. **"Particle swarm optimization with particles having quantum behavior"**, Proceedings of Congress on Evolutionary Computation, Portland, OR, USA, pp.325-331. 2004.

Sun, J., Xu, W., Feng. B. **"A global search strategy of quantum-behaved particle swarm optimization"**. Cybernetics and Intelligent Systems, 2004. IEEE Conference, 1:111-116. 2004.

Sun, L., **"Optimum design of "road-friendly" vehicle suspension systems subjected to rough pavement surfaces"**. Appl. Math. Modelling, 26:635–652, 2002.

Xu, S.-H., Mu, X.-D., Chai, D., Zhao, P. **"Multiobjective quantum-behaved particle swarm optimization algorithm with double-potential well and share-learning"**, Optik, 127:4921-4927. 2016. DOI:.1016/j.ijleo.2016.02.049.

Zamanian, Z., Nikraves, A., Monazzam, M. R., Hassanzadeh, J., Fararouei, M. **"Short-term exposure with vibration and its effect on attention"**. J Environ. Health Sci. Eng. 12(1):135. 2014. DOI: 10.1186/s40201-014-0135-1

Zhou, D.-Z., Li, Y., Jiang, B., Wang, J. **"A Novel Multiobjective Quantum-Behaved Particle Swarm Optimization Based on the Ring Model"**, Mathematical Problems in Engineering. 1-15. 2016. DOI: 10.1155/2016/4968938.

Lee C.K. and Cheng Y.C. **"Application of uniform design and QPSO in the sensitivity problem a railway vehicle system"**. Procedia Engineering, 79:427-436. 2014. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.06.364.

APÊNDICE

Tabela A.1 – Parâmetros nominais geométricos e inerciais do modelo numérico do ônibus.
Adaptado de Sekulik *et al.*, 2013.

Parâmetro	Descrição	Valor Nominal
l	Distância entre eixos.	5,65 m
a	Distância do eixo dianteiro para o centro de gravidade (CG) do ônibus.	3,61 m
b	Distância do eixo traseiro para o centro de gravidade (CG) do ônibus.	2,04 m
f_1	Distância das rodas dianteiras para ao eixo simetria do ônibus.	1,00 m
e_1	Distância das dos elementos da suspensão dianteira para o eixo de simetria do eixo dianteiro e eixo longitudinal x, respectivamente.	0,70 m
f_2	Distância das rodas traseiras para ao eixo simetria do ônibus.	1,00 m
e_2	Distância das dos elementos da suspensão traseira para o eixo de simetria do eixo dianteiro e eixo longitudinal x, respectivamente.	0,80 m
S_1	Distância do motorista para o eixo longitudinal x.	0,65 m
S_2	Distância do motorista para o eixo lateral y.	5,45 m
S_3	Distância do passageiro 1 para o eixo longitudinal x.	0,80 m
S_4	Distância do passageiro 1 para o eixo lateral y.	0,50 m
S_5	Distância do passageiro 2 para o eixo longitudinal x.	0,40 m
S_6	Distância do passageiro 2 para o eixo lateral y.	4,20 m
m_v	Massa do motorista e assento.	100 kg
m_{p1}	Massa do passageiro 1 e assento.	90 kg
m_{p2}	Massa do passageiro 2 e assento.	90 kg
m	Massa suspensa do ônibus completamente ocupado.	15890 kg
m_{pm}	Massa do eixo dianteiro.	746 kg
m_{zm}	Massa do eixo traseiro.	1355 kg
J_x	Momento de inércia de massa da massa suspense relativa ao eixo x.	13000 kg m ²
J_y	Momento de inércia de massa da massa suspense relativa ao eixo y.	150000 kg m ²
J_{x1}	Momento de inércia de massa do eixo dianteiro em relação ao seu CG.	350 kg m ²
J_{x2}	Momento de inércia de massa do eixo traseiro em relação ao seu CG.	620 kg m ²

Tabela A.2 – Parâmetros nominais de rigidezes e amortecimentos do modelo numérico do ônibus. Adaptado de Sekulik *et al.*, 2013.

Parâmetro	Descrição	Valor nominal
k_{sv}	Rigidez da suspensão do assento do motorista.	10000 N/m
c_{sv}	Amortecimento da suspensão do assento do motorista.	750 Ns/m
k_{sp1}, k_{sp2}	Rigidez da suspensão do assento dos passageiros 1 e 2.	40000 N/m
c_{sp1}, c_{sp2}	Amortecimento da suspensão do assento dos passageiros 1 e 2.	220 Ns/m
k_p	Rigidez da bolsa pneumática da suspensão dianteira.	175000 N/m
c_1	Amortecimento da suspensão dianteira.	20000 Ns/m
c_p	Amortecimento equivalente dos lados direitos e esquerdo do eixo dianteiro.	40000 Ns/m
k_2	Rigidez da bolsa pneumática suspensão traseira.	200000 N/m
k_z	Rigidez equivalente dos lados direitos e esquerdo do eixo traseiro.	408650 N/m
c_2	Amortecimento da suspensão traseira.	22500 Ns/m
c_z	Amortecimento equivalente dos lados direitos e esquerdo do eixo traseiro.	45973 Ns/m
k_{pp}	Rigidez do pneu dianteiro e traseiro.	1000000 N/m
k_{zp}	Rigidez equivalente de pneu para o eixo traseiro esquerdo e direito.	2000000 N/m
c_{pp}	Amortecimento do pneu dianteiro e traseiro.	150 Ns/m
c_{zp}	Amortecimento equivalente de pneu para o eixo traseiro esquerdo e direito.	300 Ns/m

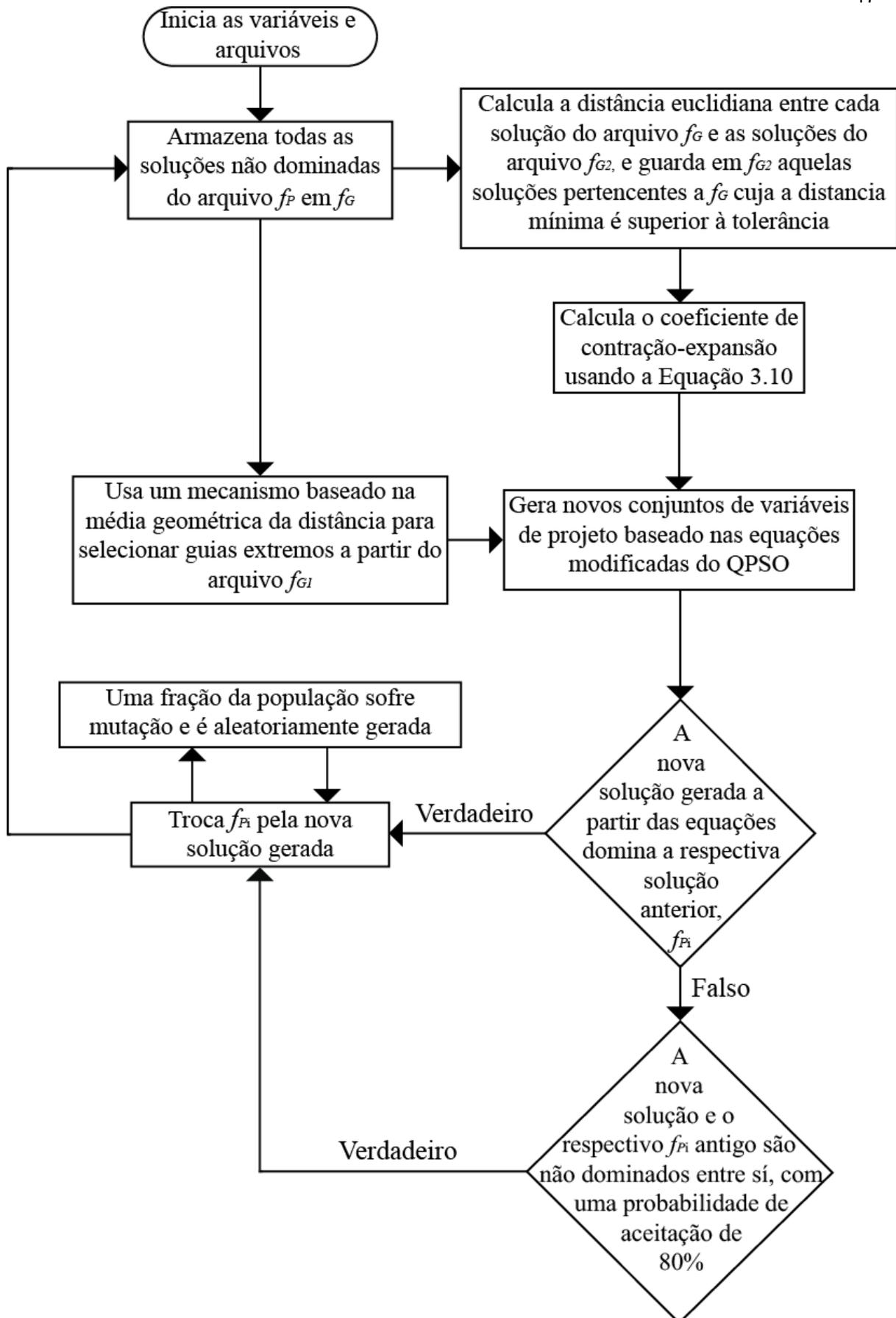


Figura A.1 – Fluxograma do algoritmo proposto, MOQPSO.

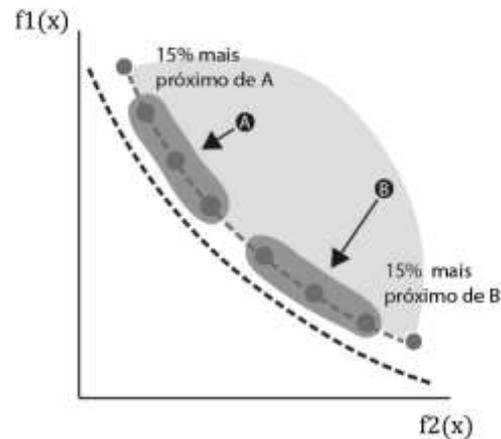


Figura A.2 – Mecanismo implementado no algoritmo proposto para aumentar a convergência baseado no guia mais próximo.

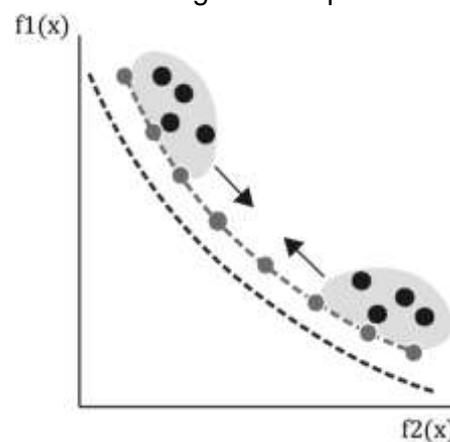


Figura A.3 – Mecanismo implementado no algoritmo proposto para aumentar a amplitude e o espalhamento baseado nos guias extremos.

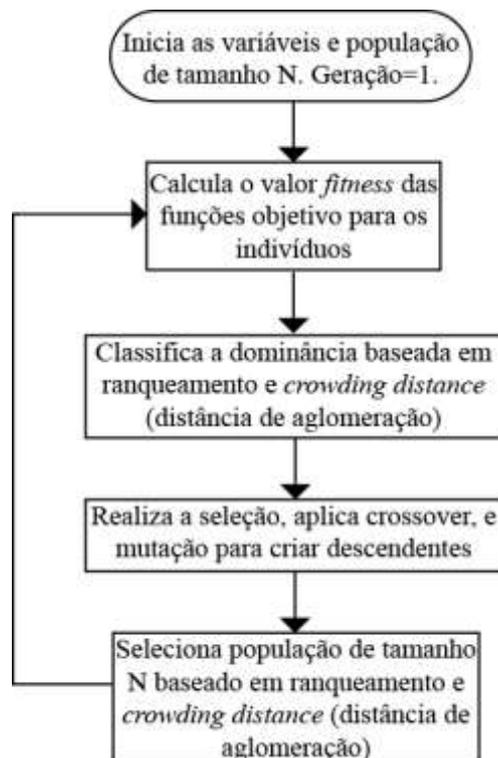


Figura A.4 – Fluxograma simplificado do algoritmo NSGA-II, baseado em Deb *et al.*, 2002.

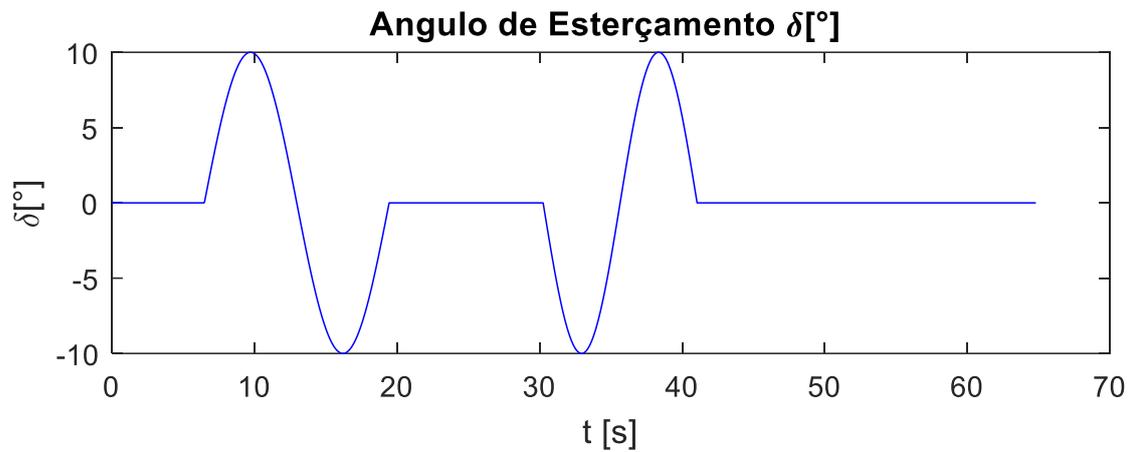


Figura A.5 – Ângulo de esterçamento para a realização da manobra DLC.

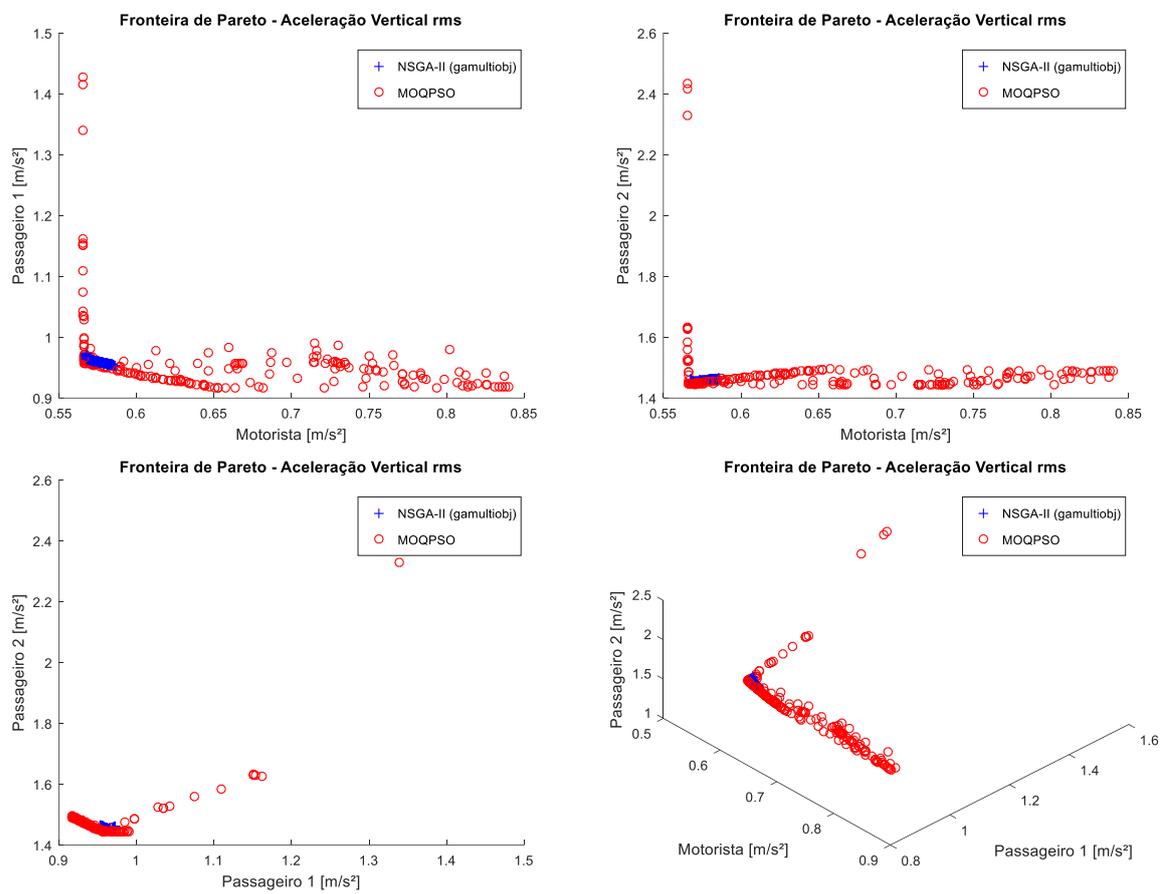


Figura A.6 – Comparação das Fronteiras de Pareto obtidas pela função *gamultiobj* do MATLAB e pelo MOQPISO. Aceleração vertical *rms* para o motorista, passageiro 1, e passageiro 2.

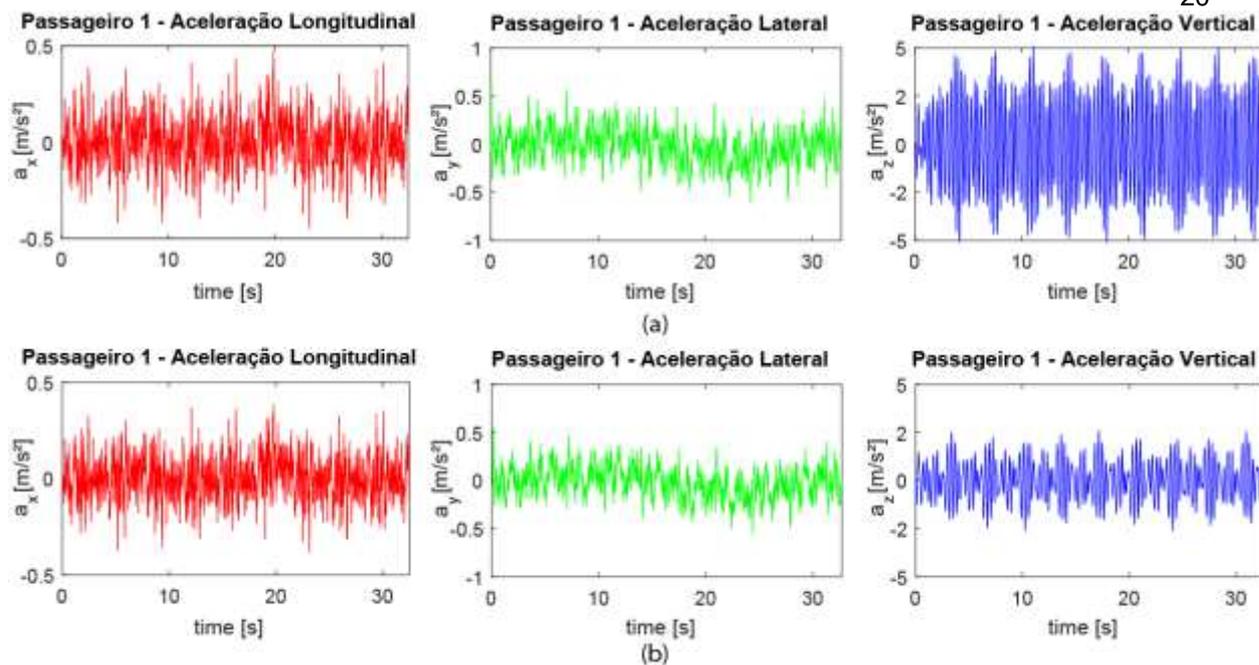


Figura A.7 – Sinal típico de aceleração longitudinal, lateral e vertical para o passageiro 1:(a) Gerado a partir dos parâmetros nominais das variáveis de projeto H, e (b) Solução otimizada A.

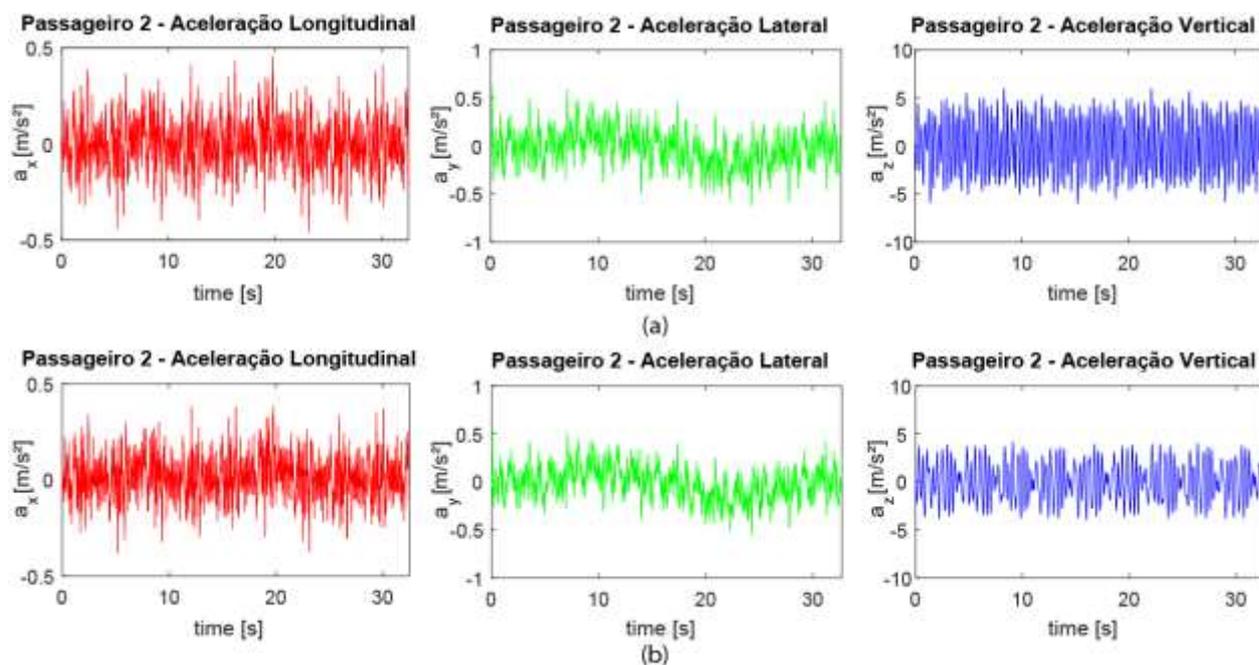


Figura A.8 – Sinal típico de aceleração longitudinal, lateral e vertical para o passageiro 2:(a) Gerado a partir dos parâmetros nominais das variáveis de projeto H, e (b) Solução otimizada A.