

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO DOS PARÂMETROS DA SUSPENSÃO DE UMA
MOTOCICLETA

por

Vitor Felippi Tomasi

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, Dezembro de 2019.

CIP - Catalogação na Publicação

Tomasi, Vitor Felippi
OTIMIZAÇÃO MULTI OBJETIVO DOS PARÂMETROS DA
SUSPENSÃO DE UMA MOTOCICLETA / Vitor Felippi Tomasi.
-- 2019.
25 f.
Orientador: Herbert Martins Gomes.

Coorientador: Ewerton Grotti.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto
Alegre, BR-RS, 2019.

1. Motocicleta. 2. Otimização multiobjetivo. 3.
Koch Index. 4. Modelamento dinâmico. 5. Modelo
Biodinâmico. I. Gomes, Herbert Martins, orient. II.
Grotti, Ewerton, coorient. III. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Vitor Felippi Tomasi

OTIMIZAÇÃO MULTI OBJETIVO DOS PARÂMETROS DA SUSPENSÃO DE UMA
MOTOCICLETA

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
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Mário Roland Sobczyk Sobrinho
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Mecânica dos Sólidos**

Orientador: Herbert Martins Gomes

Coorientador: Ewerton Grotti

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Herbert Martins Gomes

Prof. Dr. Edson Hikaro Aseka

Prof. Dr. Rogério José Marczak

Porto Alegre, Dezembro de 2019.

Dedico este TCC aos meus pais, Gilberto e Liziane, os quais me forneceram apoio e permitiram que eu buscasse meus sonhos, aos meus familiares, que me proporcionaram uma base familiar muito sólida e com muito carinho. Agradeço a minha namorada, Cecília, por ser meu porto seguro, estar sempre do meu lado me ajudando a passar pelos momentos difíceis e compartilhando os momentos bons.

*“O que vale não é o quanto se vive...
Mas como se vive.”
Martin Luther King*

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – 2019

OTIMIZAÇÃO MULTI OBJETIVO DOS PARÂMETROS DA SUSPENSÃO DE
UMA MOTOCICLETA

Tomasi, Vitor Felippi.

vitorftomasi@hotmail.com

Resumo. *O uso de motocicletas como meio de transporte vem aumentando ano após ano. O projeto de suspensão deste tipo de veículo, em sua concepção, passa pela análise do tipo de utilização que se fará da motocicleta além de aspectos estéticos, ergonômicos, de conforto e de segurança. Neste sentido, a vibração é a principal variável influente para o conforto, originada da via e nas manobras de aceleração, desaceleração e vibração do motor. Este trabalho propõe o estudo multiobjetivo sobre redução de vibração no piloto e também melhora da dirigibilidade por meio da análise do Koch Index. A modelagem do sistema de suspensão da motocicleta proposto nesse trabalho inclui 5-GDL (graus de liberdade) para dinâmica vertical, 4-GDL para dinâmica lateral e 12-GDL no modelo biodinâmico. Seis parâmetros de rigidez, amortecimento e posição do centro de gravidade são selecionados como variáveis de projeto, além de três funções objetivo, a fim de verificar o comportamento das fronteiras de Pareto geradas pelos algoritmos de otimização. A motocicleta foi submetida a uma manobra de troca simples de faixa e a uma pista com rugosidade classe B (ISO 8606, 1995). Os resultados mostram que os novos parâmetros obtidos através da otimização geraram uma melhora grande na dirigibilidade da motocicleta, associado a uma redução na vibração sentida pelo piloto. O algoritmo utilizado no estudo em questão concorda com estudos anteriores, mostrando-se adequado.*

Palavras-chave: *motocicleta, otimização multiobjetivo, Koch Index, modelamento dinâmico, modelo biodinâmico.*

Abstract. *The use of motorcycles as a means of transportation has been increasing year after year. The suspension design of this type of vehicle, in its conception, goes through the analysis of the type of use that will be made of the motorcycle besides aesthetic, ergonomic, comfort and safety aspects. In this sense, vibration is the main influential variable for comfort, originating from the track and in the engine acceleration, deceleration and vibration maneuvers. This paper proposes a multiobjective study on pilot vibration reduction and also improving drivability through Koch Index analysis. The modeling of the motorcycle suspension system proposed in this paper includes 5-DOF (degrees of freedom) for vertical dynamics, 4-DOF for lateral dynamics and 12-DOF in the biodynamic model. Six parameters of stiffness, damping, and center of gravity position are selected as design variables and three objective functions to verify the behavior of the Pareto boundaries generated by the optimization algorithms. The motorcycle was subjected to a simple lane change maneuver and a class B roughened track (ISO 8606, 1995). The results show that the new parameters obtained through the optimization generated a great improvement in the motorcycle maneuverability, associated with a reduction in the vibration felt by the rider. The algorithm used in the study in question agrees with previous studies, proving to be adequate.*

Keywords: *motorcycle, multi-objective optimization, Koch index, dynamic modeling, biodynamic model.*

1. INTRODUÇÃO

O uso de motocicletas como meio de transporte tem crescido vertiginosamente no Brasil. A estimativa é que as motos irão compor 1/3 da frota de veículos em 2020 (Senado Federal, 2012). Em 45% das cidades do Brasil a quantidade de motos chega a ser superior ao de carros. Segundo a CNM (2019), o aumento expressivo de motos no país se deve à facilidade do crédito, ao baixo preço das prestações deste tipo de veículo, aos incentivos e isenções do governo federal ao mercado, além da deficiência do transporte público. Aliado a este crescimento, o número de acidentes relacionados a este meio de transporte também aumentou vertiginosamente. Com a crescente demanda de aplicativos de entrega de comidas e bebidas e com a opção pelos moto-taxis, uma pessoa estar em cima de uma moto por diversas horas do dia, ou ter este meio como o de trabalho tornou-se comum no Brasil.

O projeto de motocicletas leva em conta uma série de fatores importantes para a segurança do piloto e que asseguram a dirigibilidade e o conforto, este relacionado principalmente a vibração. Parte dos acidentes relatados devem-se à imprudência (de motoristas, pilotos e pedestres), falta de manutenção das motocicletas, assim como das condições de tráfego atualmente existentes das vias públicas congestionadas. Por outro lado, este tipo de veículo oferece baixo custo de aquisição, baixo custo de manutenção, economia de combustível além de contribuir com níveis bem menos elevados na poluição de cidades em comparação com carros, caminhões e ônibus.

O estudo dos efeitos da vibração neste meio de transporte tem sido motivo de trabalhos da UFRGS (Schio e Gomes, 2017) referentes à avaliação dos riscos que este meio de transporte pode trazer aos seus usuários assim como o nível de conforto sentido. O sistema de suspensão destes veículos é o principal responsável pela absorção das vibrações oriundas da via, de forma que o seu projeto ótimo poderá trazer benefícios para os seus pilotos. Esta vibração advém principalmente das irregularidades das vias, forma de condução da moto, sua dirigibilidade, velocidade e condições de tráfego. O objetivo principal da suspensão da motocicleta é obter boa dirigibilidade e conforto ao piloto e eventual passageiro, sendo independente das condições de pavimentação.

A simulação numérica e projeto de motos em situações realistas possibilita ter estimativas de seu comportamento dinâmico sob diversas condições de forma rápida e segura, de forma que se torna possível a otimização de seus parâmetros a fim de minimizar os efeitos nocivos de vibração nos usuários, sem prejudicar muito a dirigibilidade. Há poucos trabalhos que tratam este problema sob o ponto de vista mais geral do comportamento dinâmico da moto e sob o ponto de vista do piloto.

A literatura de simulação de motos não é tão vasta quando de veículo automotores, mas apresenta trabalhos relevantes para a simulação, sendo a obra de Vittore Cossalter (2006) um marco no modelamento computacional dinâmicos. O tema da dirigibilidade (*handling*) é uma constante na literatura. Massaro et al. (2016) analisa a validade do uso de simuladores para avaliar a dirigibilidade em motos, empregando testes de laboratório, em campo, telemetria e simuladores assim como comparações pra mesmos pilotos em pistas e motos reais e nas equivalentes obtidas em simuladores. Eles concluem que foi possível simular as mais importantes características desejáveis, entre elas a dirigibilidade, restando algumas outras a serem melhoradas como a ergonomia assim como a simulação para direção esportiva em motos de competição e a realidade virtual.

Uma abordagem de simulação por suspensão telescópica invertida para otimizar a dirigibilidade foi proposta por Tholeti et al. (2013). Norma ISO 2631 de conforto foi utilizada para quantificar o conforto com a suspensão proposta e a simulação é feita no domínio da frequência para apenas ¼ de suspensão, variando-se parâmetros como rigidez, amortecimento e razão de massa do modelo.

Em seu trabalho, Cossalter e Sadauckas (2006) propõem métricas quantitativas para avaliar a manobrabilidade e dirigibilidade experimentais de motocicletas em manobras de troca simples de linha. Basicamente o Koch *Index* (KI) e o LCI (*Lane Change Index*) e LCYI (*Lane Change Yaw Index*) são as métricas usadas para quantificar estas características nas motos de rua e de passeio. Valores discrepantes são encontrados (KI entre 1 e 3.5 e LCI entre 0.9 e 2.5) para diversas situações e tipos de motos.

A otimização baseada em nuvem de partículas quânticas (QPSO) foi proposta por Sun, et al. (2004), e tem sido usada em diferentes aplicações devido à sua rapidez e garantia de convergência. Lee e Cheng (2014) usaram o QPSO para resolver um problema de sensibilidade em um sistema de veículo ferroviário com catorze graus de liberdade. Mais recentemente, Mizushima (2017) e Grotti (2018) otimizam suspensões passivas de ônibus usando o QPSO com abordagem monobjetiva e multiobjetiva, respectivamente.

O modelo de pneu tem grande influência no comportamento dinâmico de uma motocicleta, isso porque os pneus são causadores de forças e momentos. Pacejka (2012) propôs em sua obra um modelo semi-empírico para calcular as forças em estado permanente e as características de momento de pneus para uso em estudos de dinâmica de veículos, esse modelo é baseado na chamada *Fórmula Mágica*. A partir dessa fórmula o pneu é caracterizado com o auxílio de coeficientes, que depois são utilizados para gerar equações mostrando quanta força vertical e lateral é gerada e também quanto momento no contato é gerado.

O modelo biodinâmico de um ser humano sentado, que representa neste trabalho uma pessoa sentada pilotando uma motocicleta, foi apresentado por Zainal et al (2018), onde o corpo humano é modelado utilizando massas suspensas que são conectadas por molas e amortecedores, que representam as articulações e músculos do corpo, que depois serão expostos a uma vibração, no caso deste trabalho proveniente da motocicleta. O modelo biodinâmico consiste em 12 graus de liberdade, este é uma evolução por apresentar o modelamento do cérebro. São utilizados os parâmetros sugeridos por Zainal et al (2018) para que o modelo se aproxime ao máximo à resposta real do corpo humano sujeito a vibração.

O presente trabalho tem como objetivo modelar e simular numericamente o comportamento de motocicletas tanto na dinâmica vertical quanto na dinâmica lateral levando em conta um modelo biodinâmico de piloto em conjunto. Estimar comportamentos e magnitudes de acelerações na condição de uma manobra de troca simples de faixa e perfazer uma otimização das principais características dinâmicas deste veículo. Com isso, possibilita-se a avaliação de variação de um índice de dirigibilidade chamado de “Koch Index”, busca-se a redução deste índice indicando a melhoria da dirigibilidade destes veículos.

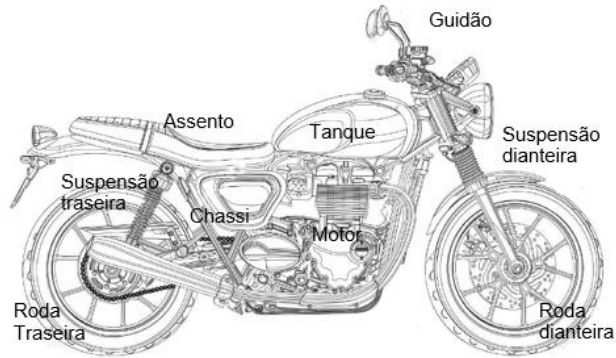
A otimização paramétrica da suspensão é realizada no software Matlab 2012 usando o algoritmo otimizador *Multiobjective Quantum Particle Swarm Optimization* (MOQPSO). Em Grotti (2018), o MOQPSO mostrou melhor desempenho quando comparado com outros algoritmos multiobjetivos já consolidados, como o *Non-dominated Sorted Genetic Algorithm* (NSGA-II). A capacidade de produzir fronteiras de Pareto mais avançadas e espalhadas tanto em testes de benchmark quanto na otimização da suspensão passiva de ônibus foi fator decisivo na escolha do otimizador. O algoritmo possui comportamento baseado na técnica da nuvem de partículas quânticas proposto por Sun, et al. (2004), com *framework* multiobjetivo baseado na técnica de arquivos múltiplos e partículas guias.

2. FUNDAMENTAÇÃO

2.1 Partes essenciais que compõem uma motocicleta

Uma motocicleta pode ser dividida em algumas partes essenciais. Essas partes podem ser observadas na Figura 1. As rodas, juntamente com os pneus, têm características específicas para cada categoria de motocicleta, já que devem ser compatíveis com a capacidade de carga do modelo, e adequadas ao tipo e local de condução da moto. O chassi também tem variações no formato de construção, dependendo da aplicação da motocicleta. Pode ser um chassi tubular de aço carbono, que se divide entre os tipos Diamond frame, berço simples, berço duplo, entre outros, e chassi de liga de alumínio, para resistência e leveza no caso de motos esportivas. O princípio do chassi é o mesmo para entre os diversos modelos, serve de estrutura para fixação dos sistemas de suspensão, motor, assento e tanque. Sendo sua correta geometria muito importante para a segurança e estabilidade da moto (Clube das Oficinas, 2014).

Figura 1 – Principais partes de uma motocicleta.



O assento é onde o piloto fica sentado para pilotar a motocicleta, sendo necessário um design ergonômico que propicie segurança e conforto em qualquer terreno por onde a moto passe. O guidão é a parte por onde o piloto guia a direção da motocicleta, girando o mesmo para os lados, por isso deve também apresentar características ergonômicas.

A suspensão dianteira deve absorver os impactos e as irregularidades do piso e impedir que eles cheguem aos braços do piloto. Também precisa manter-se flexível (não fechar) durante frenagens e desacelerações bruscas, quando o apoio se transfere para a frente, além de manter a borracha do pneu o máximo possível em contato com o chão (Revista Quatro Rodas, 2012). Já o objetivo da suspensão traseira é proporcionar conforto aos usuários da motocicleta e permitir o contato do pneu com o chão o maior tempo possível.

2.2 Equações de movimento para a dinâmica vertical da moto

O modelo da motocicleta em dinâmica vertical utilizado é proposto por Zou et al. (2009), o modelo apresenta cinco graus de liberdade (5-GDL). São eles z_c (deslocamento vertical da carroceria, em metros), z_{uf} (deslocamento vertical da suspensão dianteira, em metros), z_{ur} (deslocamento vertical da suspensão traseira, em metros), z_a (deslocamento vertical do assento, em metros) e θ (deslocamento angular de arfagem, em radianos).

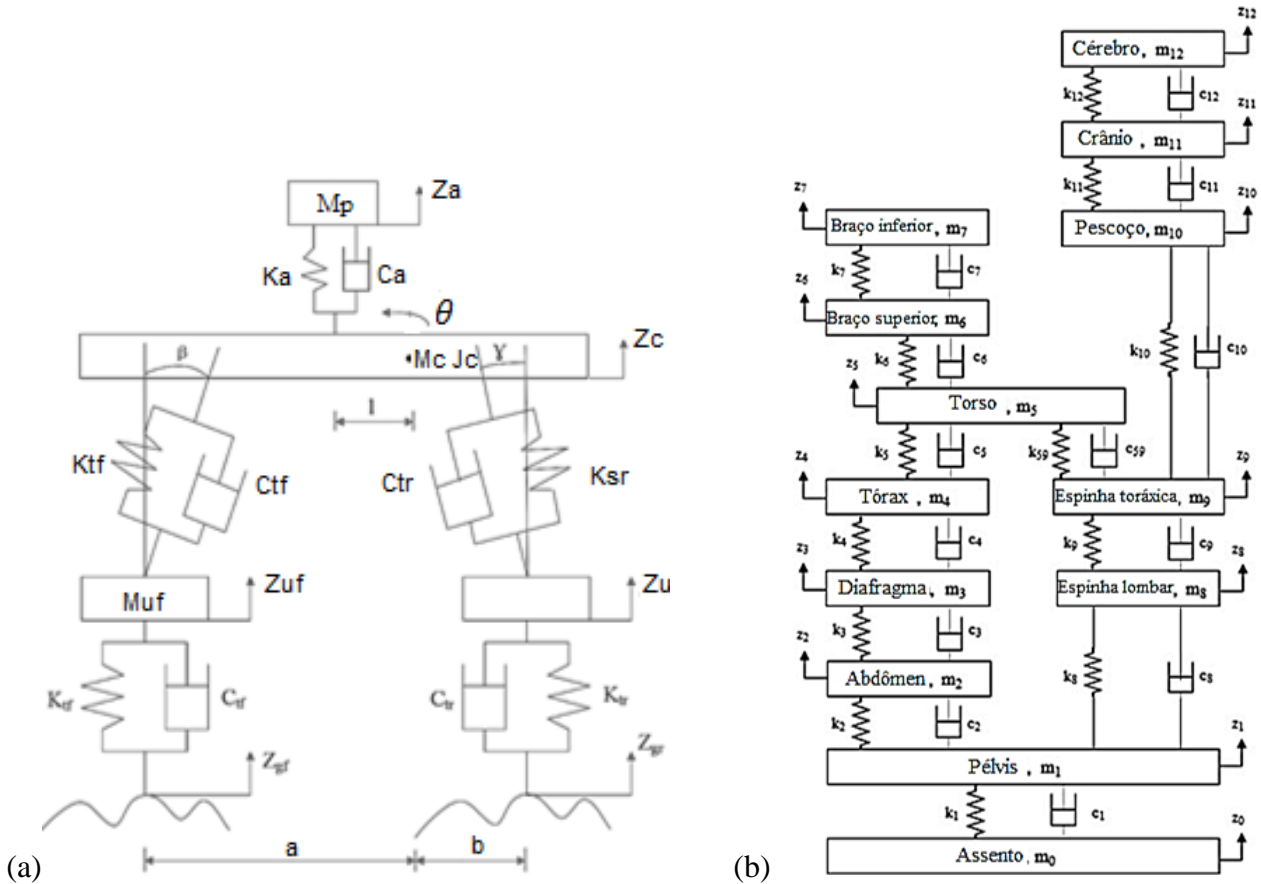
O desenho esquemático que representa esse modelo de 5-GDL pode ser observado na Figura 2(a), onde são apresentadas as rigidezes (K_{tf} , K_{tr}), amortecimentos (C_{tf} , C_{tr}) e massas (M_{tf} , M_{tr}) dos pneus dianteiro e traseiro respectivamente, rigidezes (K_{sf} , K_{sr}), amortecimentos (C_{sf} , C_{sr}) e massas (M_{sf} , M_{sr}) da suspensão dianteira e traseira respectivamente. A massa do corpo da moto é representada por (M_c), a rigidez do assento por (K_a), o amortecimento do assento por (C_a) e finalmente a massa do piloto por (M_p), que no caso deste trabalho é a soma de todas as massas do modelo biodinâmico de 12-GDL, l é a distância do piloto para o CG e a e b são as distâncias dos eixos dianteiro e traseiro para o CG. Neste trabalho este modelo é expandido para 17 GDL incluindo o modelo do biodinâmico do piloto com 12 GDL, que será descrito posteriormente.

Para analisar esse modelo é necessária a avaliação das equações diferenciais do movimento, que podem ser obtidas através do Lagrangeano das equações de energia cinética, energia potencial e energia dissipada do sistema. As equações diferenciais do movimento são montadas na forma matricial, compondo um conjunto de matrizes que analisa a dinâmica vertical da motocicleta. As equações e matrizes estão descritas no artigo original [Zou et al., 2009]. A equação matricial acoplada no tempo é mostrada na Equação 1. O método de Newmark de integração numérica é aplicado para resolver estas equações.

$$[M]\ddot{\vec{x}} + [C]\dot{\vec{x}} + [K]\vec{x} = \vec{f}(t) \quad (1)$$

onde $[M]$, $[C]$ e $[K]$ são as matrizes de massa, amortecimento e rigidez, \vec{f} é o vetor de forças externas excitadoras e \vec{x} , $\vec{\dot{x}}$ e $\vec{\ddot{x}}$ são os vetores de deslocamento, velocidade e aceleração.

Figura 2 – (a) Modelo esquemático de uma motocicleta com 5-GDL. (Zou et al., 2009, adaptado). (b) Modelo esquemático do corpo humano sentado com 12-GDL (Zeinal et al., 2018, adaptado).



2.3 Modelo biodinâmico do piloto

O piloto é modelado em dinâmica vertical com doze graus de liberdade (12-GDL), sendo representado em cérebro, crânio, pescoço, braços inferiores e superiores, torso, tórax, diafragma, abdômen, espinha torácica, espinha lombar e pélvis. Conforme Zeinal et al. (2018), o modelo proposto mostra que o corpo humano sujeito a vibrações, apresenta impacto significativo no cérebro e crânio, justificando esse modelo. O sistema usado para modelar o corpo humano sentado é um do tipo massa-mola-amortecedor, como pode ser observado na Figura 2(b).

O piloto está em contato pontual com o assento, e é assim que ele se liga à motocicleta. Os valores utilizados para as massas, coeficientes de amortecimento e coeficientes elásticos podem ser observados na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros do modelo biodinâmico de 12-GDL (Zeinal et al., 2018, adaptado).

Modelo	Massas (kg)	Amortecimentos (Ns/m)	Rigidezes (N/m)
Biodinâmico 12 GDL	$m_1=27,230; m_2=5,906;$	$c_1=370,8; c_2=292,3;$	$k_1=25016,0; k_2=877,0;$
	$m_3=0,454; m_4=1,362;$	$c_3=292,3; c_4=292,3;$	$k_3=877,0; k_4=877,0;$
	$m_5=32,697; m_6=5,470;$	$c_{54}=292,3; c_{59}=3581,6;$	$k_{54}=877,0; k_{59}=52621,0;$
	$m_7=5,297; m_8=2,002;$	$c_6=3581,6; c_7=3581,6;$	$k_6=67542,0; k_7=67542,0;$
	$m_9=4,806; m_{10}=1,084;$	$c_8=3581,6; c_9=3581,6;$	$k_8=67542,0; k_9=67542,0;$
	$m_{11}=3,500; m_{12}=1,500$	$c_{10}=3581,6; c_{11}=450,0; c_{12}=450,0$	$k_{10}=67542,0; k_{11}=180000,0; k_{12}=156000,0$

2.4 Equações de movimento para a dinâmica lateral da moto

O modelo da motocicleta em dinâmica lateral apresenta quatro graus de liberdade (4-GDL). São eles x_b (deslocamento longitudinal do corpo da moto, dado em metros), y_b (deslocamento lateral do corpo da moto, também em metros), ψ (deslocamento angular de guinada, em radianos) e φ (deslocamento angular de rolagem, em radianos).

Segundo Drehmer (2017), a dinâmica lateral do veículo é desenvolvida por meio da decomposição de forças nos pneus e da decomposição de forças em função das componentes de velocidades no corpo da moto. O movimento longitudinal é descrito pela Equação 2, o movimento lateral é descrito pela Equação 3, a dinâmica de guinada é descrita pela Equação 4 e a rolagem pela Equação 5:

$$m_t \ddot{x}_b = F_{x1} + F_{x2} + m_b h \Phi \ddot{\psi} + m_t \dot{y}_b \dot{\psi} - m_b h \dot{\Phi} \dot{\psi} - f_r m_t g - \frac{1}{2} C_D A_f \rho \dot{x}_b^2 \quad (2)$$

$$m_t \ddot{y}_b = F_{y1} + F_{y2} - m_t \dot{x}_b \dot{\psi} - m_b h \ddot{\Phi} \quad (3)$$

$$I_z \ddot{\psi} = a(F_{y1}) - b(F_{y2}) + m_b h \Phi \ddot{x}_b - m_b h \dot{x}_b \dot{\Phi} + I_{xz} \ddot{\Phi} \quad (4)$$

$$I_x \ddot{\Phi} = m_t \ddot{z}_b - m_t g h \quad (5)$$

O significado das variáveis, assim como o que cada termo representa e como são relacionadas as equações entre si, além do desenvolvimento das equações pode ser observado na tese original [Drehmer, 2017 (p. 109-112)].

2.5 Equações do modelo de pneus de Pacejka

O modelo adotado para os pneus foi proposto por Bakker em 1987, sendo melhorado significativamente por Pacejka (2012), sendo conhecido a partir desse momento pela fórmula mágica de Pacejka. Ela utiliza uma série de correlações para determinar coeficientes e calcular forças e momentos envolvidos dos pneus, baseados nos eixos locais dos pneus e na força vertical de compressão do pneu com o solo [Drehmer, 2017]. A Equação 6 mostra a força em x e a Equação 7 mostra a força em y dos pneus para $i = 1, 2$ (dianteiro, traseiro).

$$F_{l,xi} = F_{zi} D_i \sin[C_i t g^{-1}(B_i \kappa_i - E_i(B_i \kappa_i - t g^{-1}(B_i \kappa_i)))] \quad (6)$$

$$F_{l,yi} = F_{zi} D_i \sin[C_i t g^{-1}(B_i \alpha_i - E_i(B_i \alpha_i - t g^{-1}(B_i \alpha_i)))] \quad (7)$$

onde, os coeficientes B_i , C_i , D_i e E_i que são utilizados na fórmula mágica e o que cada um representa pode ser observado no artigo original [Pacejka, 2012]. A diferença entre as duas equações está no escorregamento dos pneus, representado pelo coeficiente κ_i , e no ângulo de deslizamento, representado por α_i , que é função da velocidade longitudinal da motocicleta.

2.6 O algoritmo Newmark para integração no tempo

O método de Newmark é um método de integração numérica direta de tipo passo a passo utilizado para resolver equações diferenciais de movimento (Newmark, 1959). É largamente utilizado para avaliar numericamente a resposta dinâmica de estruturas, visto que não exige o cálculo preliminar das características dinâmicas da estrutura, evitando-se um considerável esforço computacional. Existem duas classes de métodos de integração direta, implícitos e explícitos, segundo Rao (2011), o método de Newmark é o mais competente dos métodos implícitos.

Este método procura satisfazer as equações diferenciais de movimento no instante $t+\Delta t$, para calcular a resposta neste mesmo instante. As funções que representam as variações de deslocamento, velocidade e aceleração, no instante $t+\Delta t$, são dadas pelas Equações 8, 9 e 10, respectivamente.

$$\vec{x}(t_{i+1}) = (a_0 \mathbf{M} + a_5 \mathbf{C} + \mathbf{K})^{-1} \{ \vec{F}(t_{i+1}) + \mathbf{M} [a_0 \vec{x}(t_i) + a_1 \dot{\vec{x}}(t_i) + a_2 \ddot{\vec{x}}(t_i)] + \mathbf{C} [a_5 \vec{x}(t_i) + a_6 \dot{\vec{x}}(t_i) + a_7 \ddot{\vec{x}}(t_i)] \} \quad (8)$$

$$\dot{\vec{x}}(t_{i+1}) = a_5 [\vec{x}(t_{i+1}) - \vec{x}(t_i)] - a_6 \dot{\vec{x}}(t_i) - a_7 \ddot{\vec{x}}(t_i) \quad (9)$$

$$\vec{x}(t_{i+1}) = a_0[\vec{x}(t_{i+1}) - \vec{x}(t_i)] - a_1\vec{x}(t_i) - a_2\vec{x}(t_i) \quad (10)$$

onde, $\vec{x}(t_{i+1})$, $\dot{\vec{x}}(t_{i+1})$ e $\ddot{\vec{x}}(t_{i+1})$ são os vetores deslocamento, velocidade e aceleração no instante $t+\Delta t$, os vetores $\vec{x}(t_i)$, $\dot{\vec{x}}(t_i)$ e $\ddot{\vec{x}}(t_i)$ são os vetores deslocamento, velocidade e aceleração no instante t e a_0, a_1, a_2, a_5, a_6 e a_7 são constantes relacionadas ao método, dadas pela Equação 11.

$$a_0 = \frac{1}{\alpha\Delta t^2}; a_1 = \frac{1}{\alpha\Delta t}; a_2 = \left(\frac{1}{2\alpha} - 1\right); a_5 = \frac{\delta}{\alpha\Delta t}; a_6 = \frac{\delta}{\alpha} - 1; a_7 = \frac{\Delta t}{2}\left(\frac{\delta}{\alpha} - 2\right) \quad (11)$$

Os parâmetros α e δ são cruciais para a estabilidade do método, recomenda-se utilizar 0,25 para α e 0,5 para δ , deste modo o método é incondicionalmente estável (Newmark, 1959). Para o início do método de integração de Newmark é necessário, no primeiro passo de tempo, definir as condições iniciais estabelecidas para os vetores de deslocamento e velocidade, para então calcular o vetor aceleração inicial pela Equação 12.

$$\ddot{\vec{x}}(t_0) = \mathbf{M}^{-1}[\vec{F}(t_0) - \mathbf{C}\dot{\vec{x}}(t_0) - \mathbf{K}\vec{x}(t_0)] \quad (12)$$

onde, $\vec{x}(t_0)$, $\dot{\vec{x}}(t_0)$ e $\ddot{\vec{x}}(t_0)$ são os vetores deslocamento, velocidade e aceleração no instante inicial e $\vec{F}(t_0)$ é o vetor de força de excitação externa inicial.

2.7 Otimização

Otimização é definida como o processo através do qual se obtém o melhor valor para uma função, que minimize ou maximize um objetivo. Para n variáveis de projeto, a otimização por minimização de uma função objetivo pode ser definida matematicamente conforme a Equação 13.

$$\begin{aligned} \text{Minimizar} \quad & f_i(\mathbf{x}), \quad (i = 1,2,3, \dots, M), \mathbf{x} \in R^n \\ \text{Sujeito a} \quad & \Phi_j(\mathbf{x}) = 0, (j = 1,2,3, \dots, J), \\ & \Psi_k(\mathbf{x}) \leq 0, (j = 1,2,3, \dots, K), \end{aligned} \quad (13)$$

onde, $f_i(\mathbf{x})$ são as M funções a serem otimizadas, $\Phi_j(\mathbf{x})$ são as J funções de restrição de igualdade, $\Psi_k(\mathbf{x})$ são as K funções de restrição de desigualdade e \mathbf{x} é o vetor de variáveis de projeto. Tratando-se de múltiplas funções objetivos, no caso de $M > 1$, considera-se um problema de otimização multiobjetivo.

2.8 Otimização multiobjetivo

A otimização multiobjetivo se preocupa com problemas matemáticos que envolvem mais de uma função objetivo a ser otimizada simultaneamente. Neste caso a função objetivo forma um vetor de valores, em contraste com o valor único da função obtido em uma otimização mono objetivo.

Caso essas funções objetivos sejam conflitantes, não se obterá uma solução que minimize todas as funções objetivos simultaneamente, enquanto uma variável pode tornar ótima certa função objetivo, pode tornar as outras funções objetivo piores.

Um engenheiro civil italiano chamado Vilfredo Pareto definiu uma curva de atribuição de recursos que explicita uma relação de *tradeoff* e balanço a ser atendida, ou seja, não existirá uma única solução, mas sim uma série de soluções e dentre elas deve ser escolhida a que for julgada melhor, oferecendo liberdade para a tomada de decisões de um projeto.

Define-se que um vetor solução \mathbf{X}_a é considerada um conjunto solução ótimo de Pareto, se, e somente se, não exista outro vetor solução \mathbf{X}_b que atenda as duas condições de dominância. O conceito de dominância diz que, sendo \mathbf{X}_a e \mathbf{X}_b duas soluções possíveis, de um problema de otimização de minimização com M funções objetivos conflitantes, a solução \mathbf{X}_a domina a solução \mathbf{X}_b se, e somente se, $f_i(\mathbf{X}_a) \leq f_i(\mathbf{X}_b)$ para $i = 1$ até M , e para ao menos um i $f_i(\mathbf{X}_a) < f_i(\mathbf{X}_b)$. Caso a

condição citada não seja violada, ambos os vetores de solução são chamados “não dominados” entre si, e o conjunto de todos os vetores solução não dominados é denominado Fronteira de Pareto.

2.9 Método QPSO e NSGA-II

O método QPSO (*Quantum-Behaved Particle Swarm Optimisation*) é uma importante variação do método PSO (*Particle Swarm Optimisation*) clássico, que foi criado por Kennedy e Eberhart (1995) e é baseado na modelagem do comportamento de grupos sociais de animais como enxame de insetos ou conjunto de pássaros. O QPSO é um algoritmo probabilístico e a função iterativa é muito diferente do método PSO, visto que ela não necessita de vetores de velocidade para as partículas e tem menos parâmetros para serem ajustados.

Este método é motivado pela mecânica quântica e pela análise dinâmica de trajetória do método PSO, em que o estado de cada partícula pode ser descrito por uma função de onda $\Psi(x)$ (Equação 14). A probabilidade de se encontrar uma partícula em uma determinada posição é descrita pela função densidade de probabilidade $|\Psi(x)|^2$, após utilizar o método estocástico de Monte Carlo, a posição de cada partícula é obtida pela Equação 15.

$$\Psi(x) = \frac{1}{\sqrt{L}} e^{-\frac{|p-x|}{L}} \quad (14)$$

$$x = p + \frac{L}{2} \ln\left(\frac{1}{u}\right), \quad u \sim U(0,1) \quad (15)$$

onde p é uma variável randômica expressa pela Equação 16. O parâmetro L caracteriza a criatividade da partícula, descrita pela Equação 17.

$$p = \varphi P + (1 - \varphi)G, \quad \varphi \sim U(0,1) \quad (16)$$

$$L = 2\alpha|x - mbest| \quad (17)$$

onde P e G representam a melhor experiência da partícula do enxame respectivamente, o parâmetro α é conhecido como coeficiente de expansão e $mbest$ é a média da melhor posição de cada partícula do enxame de NP indivíduos.

O coeficiente de expansão é o parâmetro mais importante do QPSO, ele é fundamental para a dinâmica das partículas e convergência do algoritmo. Sun et al. (2012) sugere que a partícula converge quando $\alpha < 1,78$. O método mais utilizado para definir o valor de α é selecionar o valor inicial, $\alpha_{inicial}$, e ir diminuindo esse valor linearmente a cada iteração até atingir o valor escolhido de α_{final} . A expressão que representa a atualização da posição de cada partícula i , na dimensão j , na iteração n está expressa na Equação 18. Diferentemente do PSO que atualiza a velocidade das partículas, o QPSO expressa diretamente a posição posterior conforme a experiência do enxame.

$$x_{i,n+1}^j = p_{i,n}^j \pm \alpha |mbest_n^j - x_{i,n}^j| \ln\left(\frac{1}{u_{i,n+1}^j}\right), \quad u \sim U(0,1) \quad (18)$$

O método NSGA-II (*Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II*) é um algoritmo genético de otimização muito popular no meio científico. Esses algoritmos são baseados nos princípios da genética populacional, onde sistemas de indivíduos que interagem com um ambiente, evoluem através de mecanismos de reprodução, seleção e mutação. Análogos ao processo evolutivo de Darwin, os indivíduos mais adaptados ao ambiente são selecionados e criam uma nova geração.

Diversos algoritmos genéticos foram sugeridos nos últimos 20 anos. A principal razão para isso, segundo Deb et al. (2002), é a habilidade desses algoritmos gerarem múltiplas soluções ótimas de Pareto em apenas uma simulação de função objetivo. Ainda segundo Deb et al. (2002), o algoritmo NSGA-II é uma evolução do seu antecessor, NSGA, tendo sido corrigidas as principais críticas feitas a ele nos últimos anos: alta complexidade computacional para classificação de dominância, falta de elitismo (permite a cópia dos melhores candidatos diretamente para a próxima geração), e a

necessidade de especificar um parâmetro de compartilhamento (parâmetro usado para garantir a diversidade).

2.10 Método MOQPSO (Multiobjective Quantum Behaved Particle Swarm Optimization)

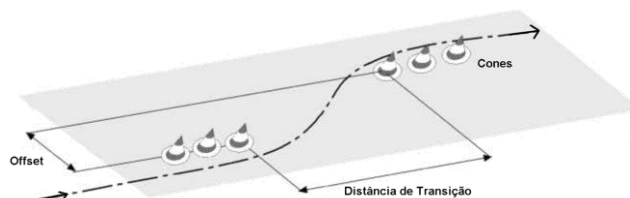
Conforme Grotti (2018), o algoritmo MOQPSO é baseado na Dominância de Pareto, nas equações base do QPSO e na estratégia repositório de banco de dados. Ainda segundo Grotti (2018) a ideia por trás dessa estratégia é manter as melhores posições guardadas em um arquivo externo que sofre manutenção ao final de cada iteração. Além disso, no MOQPSO, cada partícula recebe um guia específico a cada iteração, diferentemente do método QPSO que utiliza um guia único *mbest*. A seleção do guia é feita de duas maneiras, utilizando partículas extremas para ampliar o espalhamento mantendo a diversidade, e utilizando partículas próximas pertencentes à um arquivo criado com as melhores posições globais na iteração atual.

3. METODOLOGIA

3.1 Troca simples de faixa e esterçamento do tipo triangular

A manobra de troca simples de faixa foi abordada por diversos autores, desde sua introdução em 1978 por Zellner e Weir. Esse teste de troca simples de faixa busca quantificar a resposta direcional da motocicleta, em outras palavras, busca analisar a dirigibilidade. Conforme Cossalter e Sadauckas (2006), a troca simples de faixa consiste em três fases: primeiramente a motocicleta anda em linha reta, em velocidade constante, por uma distância (ou período) determinada; em seguida movimento lateral transiente é obtido para mover a motocicleta na direção lateral por uma distância (ou período) determinada, esse movimento é obtido com um *input* de ângulo de esterçamento; por fim a motocicleta retorna a andar em linha reta, com um deslocamento lateral ao caminho de entrada. O esquema da manobra de troca simples de faixa pode ser observado na Figura 3.

Figura 3 – Manobra de troca simples de faixa (Cossalter e Sadauckas, 2006, adaptado).



Para realizar a troca simples de faixa, é aplicado um ângulo de esterçamento no pneu dianteiro da motocicleta. A função do ângulo de esterçamento é do tipo triangular, sendo determinado um ângulo final de esterçamento, e um tempo de esterçamento para ser realizada a manobra, de forma que o ângulo inicial é zero, chega a um valor máximo e retorna a zero, constituindo a troca de faixa com esterçamento triangular. O gráfico do ângulo de esterçamento no tempo pode ser visto na Figura A.1.

3.2 Koch Index

O Koch Index foi criado por Koch em 1978 em sua dissertação para estudar a manobra de entrada de curva. Cossalter e Sadauckas (2006) abordam esse índice para obter um valor quantitativo para a dirigibilidade de diferentes tipos de motocicletas. A Eq. (19) mostra a expressão para o Koch Index, com unidades de Ns^2/rad .

$$KI = \frac{\tau_{m\acute{a}x}}{\dot{\phi}_{m\acute{a}x} V} \quad (19)$$

onde, $\tau_{m\acute{a}x}$ é o torque de esterçamento, $\dot{\phi}_{m\acute{a}x}$ é a taxa de rolagem e V a velocidade da motocicleta.

O Koch Index representa a relação entre o primeiro pico do torque de esterçamento (observado no guidão) e a resposta do primeiro pico da taxa de rolagem do veículo, normalizados pela velocidade. Esses picos representam o início da entrada na curva, onde o piloto deve esterçar a moto e então ela rola para dentro da curva. Cossalter e Sadauckas (2006) ainda explicitam que um baixo valor de Koch Index indica que um torque de esterçamento (esforço) mínimo é necessário para o movimento, e, portanto, apresenta boa dirigibilidade.

3.3 Vetor de Funções Multiobjetivo

Uma das funções objetivo escolhidas para esse trabalho foi o (i) Koch Index, previamente apresentado, por representar um valor quantitativo para a dirigibilidade, um conceito ainda um pouco abstrato quantitativamente, visto que grande parte da literatura disponível avalia a dirigibilidade por meio experimental e qualitativo.

Para contrabalancear a otimização dos parâmetros da motocicleta buscando uma melhor dirigibilidade, escolheu-se avaliar (ii) a aceleração vertical no assento da motocicleta e (iii) cérebro do piloto visando conforto, isso se justifica visto que não seria interessante obter parâmetros para a suspensão da motocicleta que levassem a um projeto excelente no lado de dirigibilidade, mas que não fosse confortável para o piloto. Este vetor de funções objetivo será representado por $f_{obj}=(f_1, f_2, f_3)^T$. Quando da avaliação multiobjetivo, também se fará uso de uma função de utilidade, que representa o conhecimento de um *Expert*, através da soma ponderada do vetor de funções objetivo $\omega_1 f_1 + \omega_2 f_2 + \omega_3 f_3$ de forma a obter um valor único comparável e representar o projeto final adotado.

3.4 Conforto em termos de acelerações

Dependendo da intensidade e da frequência de oscilação do movimento sentido pelo piloto de uma moto, isto pode afetar tanto o seu conforto quanto a sua saúde. Apesar da definição de conforto ser um tato dependente para cada indivíduo, especificamente para vibração há um consenso, representado por algumas normas, do que possa ser considerado confortável em termos de aceleração sentida. A Norma ISO 2631-1 (1997) no item C.2.3 define faixas (que se sobrepõem) para estes valores. Na Tabela 2 estão indicados estes valores de referência.

Tabela 2 – Referências de conforto a ambientes com vibração segundo a ISO 2631-1 (1997).

Faixa de amplitudes [m/s ²]	Índice de conforto
< 0,315	Não desconfortável
entre 0,315 – 0,63	Um pouco desconfortável
entre 0,5 – 1,0	Levemente desconfortável
entre 0,8 – 1,6	Desconfortável
entre 1,25 – 2,5	Muito desconfortável
> 2,0	Extremamente desconfortável

3.5 Geração de irregularidades de pista padronizadas

Para uma simulação adequada que represente mais fielmente a condição encontrada na prática pela moto ao trafegar em diversos tipos de pistas, esta deve levar em conta a presença de irregularidades nos trajetos. Eles, aliado às manobras de esterçamento e manobras realizadas pelo piloto, também influenciarão especialmente a dinâmica vertical do movimento, como também, a partir das interações com os outros graus de liberdade, na dinâmica lateral da moto. A forma usual de geração é a apresentada por Shinozuka e Jan (1972) aliado à definição de Densidades Espectrais de Potência de rugosidades padronizadas de pistas dadas pela Norma ISO 8608 (2016): $G_{\xi}(n) = C(n/n_0)^{-w_1}$ para $n \leq n_0$ e $G_{\xi}(n) = C(n/n_0)^{-w_2}$ para $n \geq n_0$, onde G_{ξ} é a densidade espectral de potência para a rugosidade de pista (m²/ciclo/m), n significa o número de onda (ciclo/m), C é o coeficiente de

rugosidade da pista ($m^3/ciclo$), e w é o coeficiente de ajuste. Nas simulações foi utilizado o perfil de norma tipo B. A geração das irregularidades (z) segue o indicado pela Equação (20):

$$z(t_i) = \sum_{i=1}^{ne} \sqrt{G_a(f_i)\Delta f} \sin(2\pi f_i t_i + \varphi_i), \quad (20)$$

onde φ_i é o ângulo de fase, uniformemente distribuídos entre 0 e 2π , f_i são as frequências obtidas pela densidade espectral mencionada (discretizada por ne linhas espectrais).

4. RESULTADOS

4.1 Avaliação da influência do modelo biodinâmico

No modelo da motocicleta original de 5 GDL, o piloto é representado apenas por 1 GDL de massa fixa, o modelo biodinâmico proposto representa o piloto usando modelo com 12 GDL. Ao realizar essa melhoria no modelo, deve ser observado se existem diferenças no comportamento dinâmico da motocicleta, justificando a implementação. Para isso realizou-se a manobra de troca simples de faixa utilizando os parâmetros nominais da suspensão da motocicleta, com o modelo biodinâmico ativo e inativo, observando possíveis mudanças no comportamento dinâmico da motocicleta. Para desativar o modelo biodinâmico, alterou-se os parâmetros de rigidez e amortecimento do mesmo para valores elevados (10^5 vezes maior que o nominal). Os valores nominais para as variáveis de projeto encontram-se na Tabela 3, esses valores representam a motocicleta BMW F800R a partir de 2010, retirados de sua ficha técnica constante em Cossalter (2006). Essa motocicleta é classificada como pertencente à classe *Sport*.

Tabela 3 – Valores de propriedades nominais da moto em estudo.

Variável	Significado	Valor Nominal	Unidades
C_{sre}	Amortecimento equivalente suspensão traseira	2000,0	Ns/m
C_{sfe}	Amortecimento equivalente suspensão dianteira	2200,0	Ns/m
K_{sre}	Rigidez equivalente suspensão traseira	30000,0	N/m
K_{sfe}	Rigidez equivalente suspensão dianteira	14000,0	N/m
l	Posição geométrica do piloto em relação ao CG da moto	0,0	m
a	Distância do CG da moto para a roda dianteira	0,7	m

A Tabela 4 apresenta o resultado do Koch Index, de acelerações RMS verticais e laterais e forças de contato para simulações com modelo biodinâmico ativo e desativado para estes valores nominais.

Tabela 4 – Resultados para Koch Index e RMS de alguns GLD da dinâmica lateral e vertical da moto, com o modelo biodinâmico ativado e desativado.

Variável	Graus de Liberdade	Biodinâmico Desativado	Biodinâmico Ativo	Unidades
KI	Koch Index	2,149	2,138	Ns ² /rad
$F_{y,d}$	Força lateral de contato pneu dianteiro	671,660	671,660	N
$F_{z,t}$	Força vertical contato roda traseira	1463,700	1463,800	N
$F_{z,d}$	Força vertical contato roda dianteira	1630,4	1630,100	N
\dot{x}_b	Aceleração longitudinal RMS carroceria	0,512	0,513	m/s ²
\dot{y}_b	Aceleração lateral RMS carroceria	3,933	3,937	m/s ²
$\ddot{\phi}$	Aceleração de rolagem	1,663	1,684	rad/s ²
a_{car}	Aceleração vertical RMS da carroceria	1,174	1,167	m/s ²
a_{ass}	Aceleração vertical RMS do assento	0,569	0,816	m/s ²
a_{brain}	Aceleração vertical RMS do cérebro	0,569	0,299	m/s ²

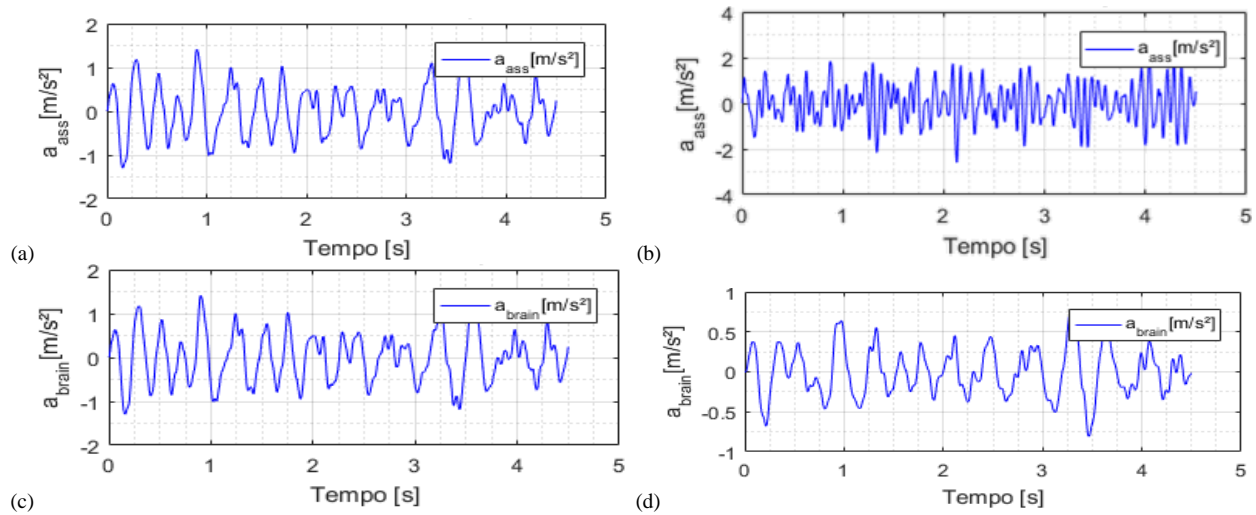
Percebe-se que a presença do biodinâmico ativo, aumentou a aceleração RMS no assento (43%), ao mesmo tempo que diminuiu a aceleração do cérebro (47%). O Koch Index reduziu 0,5% e os outros valores referentes ao corpo da moto, praticamente não se alteraram. Em um outro teste, para um caso de apenas manobra de troca de faixa e irregularidade do tipo *Bump* senoidal de altura 0,05

m e comprimento de 1 m ocorrendo no meio da troca, a diferença dos picos da força na roda traseira chegam a 0,2% para mais, no caso do biodinâmico ativo, e no caso da aceleração no assento, esta diferença chega a 159%. Desta forma as otimizações seguintes serão feitas com o modelo biodinâmico ativo.

Segundo a ISO 2631-1 (1997) a aceleração do assento do piloto na condição de modelo biodinâmico desativado poderia ser classificada como de pouco desconfortável a levemente desconfortável. Na condição do biodinâmico ativo, neste mesmo ponto, a aceleração pode ser classificada como de levemente desconfortável a desconfortável.

Nas Figuras 4(a) e 4(b) pode-se observar a comparação entre os sinais de aceleração no assento com e sem o modelo biodinâmico ativo, nas Figuras 4(c) e 4(d) a comparação entre os sinais de aceleração no cérebro com e sem o modelo biodinâmico ativo.

Figura 4 – Sinal no tempo para, (a) aceleração no assento com biodinâmico desativado, e (b) com biodinâmico ativo, (c) aceleração no cérebro com biodinâmico desativado e (d) com biodinâmico ativo.



4.2 Otimizações multiobjetivo e curvas de Pareto

As variáveis de projeto escolhidas foram as rigidezes e amortecimentos equivalentes da suspensão dianteira e traseira da moto (C_{sre} , C_{sfe} , K_{sre} , K_{sfe}), a posição geométrica do piloto em relação ao CG da moto (l), e a distância do CG da moto para a roda dianteira (a). O espaço limite para variação das variáveis de projeto foram definidos em $\pm 25\%$ em torno dos valores nominais das rigidezes e amortecimentos, e $\pm 0,5$ m em torno dos valores nominais das variáveis geométricas. A moto realiza a troca de faixa com perfil de pista com rugosidade tipo B, segundo a norma ISSO 8608 (2016), e com velocidade de 80 km/h. A trajetória realizada pela motocicleta pode ser observada na Figura A.2. As irregularidades da pista são iguais para todas as iterações e o gráfico das irregularidades no tempo para cada pneu pode ser observado na Figura A.3

A otimização realizada com o NSGA-II usou os seguintes parâmetros: Fração de *crossover* ($cr=0,8$); Fração de Pareto ($pf=0,9$); População ($n=60$); Tipo de mecanismo para o espalhamento ($distancecrowding=$ 'phenotype'); Gerações ($T=250$), 14297 chamadas da função objetivo; Todos os parâmetros foram testados com valores diferentes durante a fase de calibração. Populações entre 30 e 100 foram usadas, onde 60 mostrou-se o melhor valor para o problema específico.

Para a otimização com o MOQPSO os seguintes parâmetros foram usados: número de partículas ($n=60$); Limite de tolerância ($tol_1=0,001$); Limite de contração expansão inicial ($\beta_0=1,3$); Limite de contração expansão final ($\beta_1=0,3$); Porcentagem de indivíduos mais próximos pertencentes à fronteira de a ser usado como guia ($guid_perc=0,15$); Probabilidade do guia mais próximo ser usado ao invés do guia extremo ($guid_prox=0,30$); Probabilidade de mutação ($mutation=0,12$); Número de

iterações ($T=210$), 14090 chamadas da função objetivo. Novamente, todos os parâmetros foram testados com diferentes valores durante a fase de calibração.

Um teste de dominância entre as duas fronteiras de Pareto mostrou que, das 60 partículas da fronteira do NSGA-II, apenas 43 são não dominadas (72%), enquanto das 149 partículas da fronteira do MOQPSO, 140 são não dominadas (94%). Esta diferença de dominância indica uma melhor convergência da fronteira de Pareto gerada pelo MOQPSO, quando comparada com àquela gerada pelo NSGA-II.

Para a função de utilidade descrita na Seção 3.3, utilizaram-se os valores dos coeficientes: $\omega_1=0,7$ para o Koch Index, $\omega_2=0,3$ para a aceleração no assento e $\omega_3=0,0$ para a aceleração na cabeça. Esta escolha de valores prioriza a otimização voltada para melhoria da dirigibilidade em detrimento da aceleração do assento (conforto do piloto). Excluiu-se da função de utilidade a aceleração na cabeça ($\omega_3=0$), por esta não ser concorrente com a aceleração no assento. Desta forma são apresentados os resultados na Tabela 5, onde a solução do MOQPSO apresentou uma função de utilidade menor (indicando uma solução preferencial).

Tabela 5 – Comparativo do resultado da função de utilidade aplicada às duas fronteiras de Pareto, geradas pelo MOQPSO e pelo NSGA-II.

Solução da Função de Utilidade										
	K_{sfe} (N/m)	K_{sre} (N/m)	C_{sfe} (Ns/m)	C_{sre} (Ns/m)	a (m)	l (m)	KI (Ns ² /rad)	a_{ass} (m/s ²)	a_{brain} (m/s ²)	Função de Utilidade
MOQPSO	16184	22500	1500,0	1650,0	1,2000	-0,052618	0,71229	0,79617	0,27061	0,73745
NSGA-II	14589	32219	1500,0	1812,3	1,1873	0,188360	0,64211	1,3852	0,28246	0,86504
Nominal	14000	30000	2000	2200	0,7	0	2,13790	0,8156	0,29930	1,74121

Note que, apesar da função de utilidade ser menor para o MOQPSO, ambas as soluções são não dominadas entre si. Estas soluções estão marcadas na fronteira de Pareto da Figura 5 como um quadrado. A Figura 5 mostra as fronteiras de Pareto para, (a) $f_1 \times f_2$, (b) $f_1 \times f_3$, (c) $f_2 \times f_3$ e (d) para $f_1 \times f_2 \times f_3$. Ao comparar os resultados é possível notar que a aceleração no assento e na cabeça são não concorrentes entre si.

4.3 Comparações da solução definida por *Expert* e solução nominal

Conforme observado na Seção 4.2, com o método de otimização MOQPSO obteve-se uma solução melhor para a função de utilidade definida pelo *Expert* do que o método NSGA-II, portanto todos os gráficos e valores a seguir representam a melhor solução obtida pelo método MOQPSO.

A Tabela 6 apresenta o resultado do Koch Index, de acelerações RMS verticais e laterais e forças de contato para simulação utilizando as variáveis de projeto com valores nominais e para a solução otimizada da função de utilidade definida.

Figura 5 – Fronteiras de Pareto (a) $f_1 \times f_2$, (b) $f_1 \times f_3$, (c) $f_2 \times f_3$ e (d) para $f_1 \times f_2 \times f_3$. Retângulos indicam os respectivos valores para a Função de Utilidade.

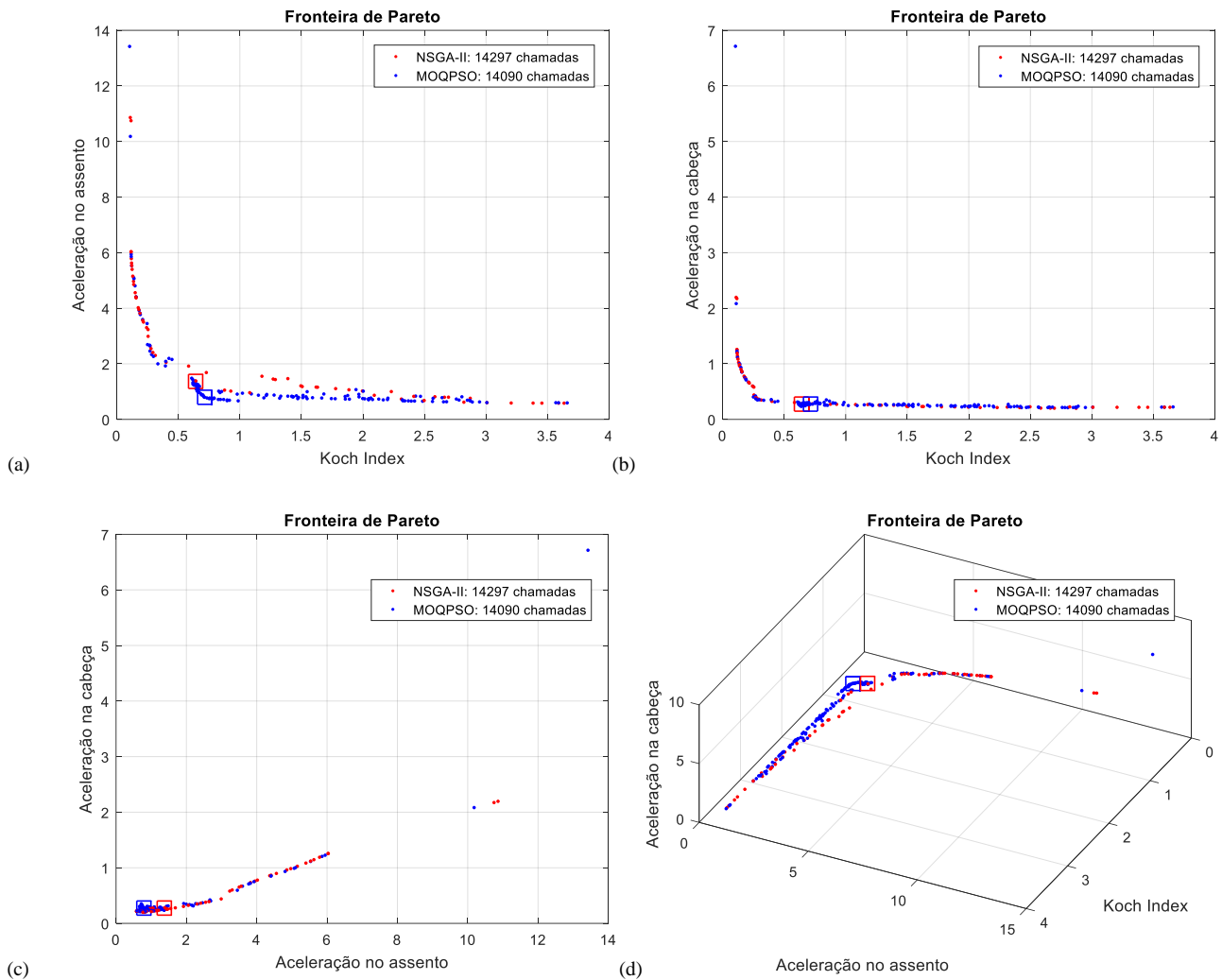
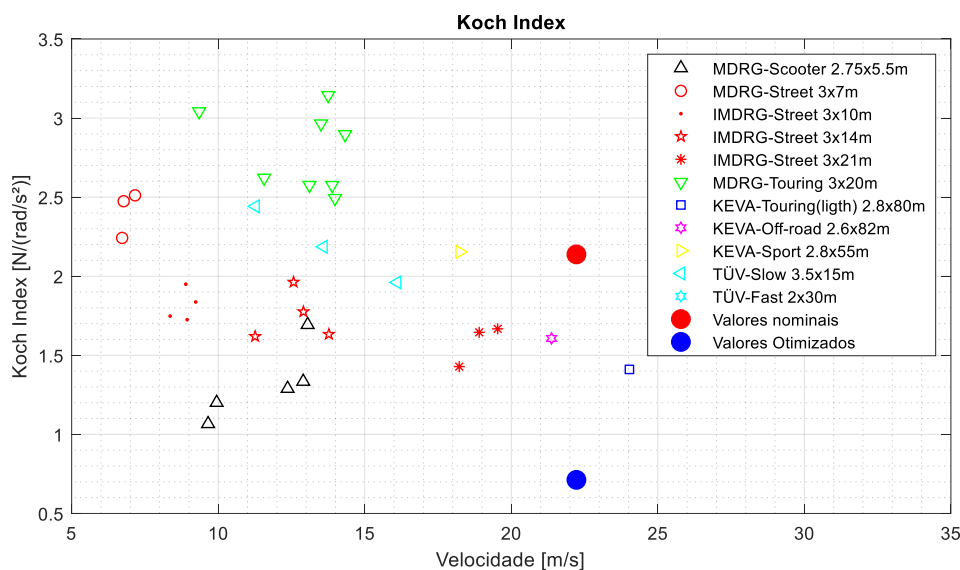


Tabela 6 – Resultados para Koch Index, valores RMS para os GDL da dinâmica lateral e alguns GDL da dinâmica vertical da moto, com valores nominais e após otimização.

Variável	Graus de Liberdade	Variáveis Nominais	Variáveis Otimizadas	Unidades
KI	Koch Index	2,1379	0,7123	Ns^2/rad
$F_{y,d}$	Força lateral de contato pneu dianteiro	671,660	219,640	N
$F_{z,d}$	Força vertical de contato pneu dianteiro	1630,100	729,420	N
$M_{z,d}$	Momento aplicado pelo pneu dianteiro	3,7112	1,2689	Nm
$F_{y,t}$	Força lateral de contato pneu traseiro	623,260	1049,600	N
$F_{z,t}$	Força vertical de contato pneu traseiro	1463,800	2380,800	N
$M_{z,t}$	Momento aplicado pelo pneu traseiro	3,0658	4,2582	Nm
\dot{x}_b	Aceleração longitudinal RMS carroceria	0,5125	0,2699	m/s^2
\dot{y}_b	Aceleração lateral RMS carroceria	3,9373	3,5675	m/s^2
$\dot{\psi}$	Aceleração de guinada	3,7986	4,5531	rad/s^2
$\dot{\phi}$	Aceleração de rolagem	1,6836	1,2384	rad/s^2
a_{car}	Aceleração vertical RMS da carroceria	1,1674	1,1514	m/s^2
a_{ass}	Aceleração vertical RMS do assento	0,8156	0,7962	m/s^2
a_{brain}	Aceleração vertical RMS do cérebro	0,2993	0,2706	m/s^2

Observa-se a que após a otimização o valor para o Koch Index reduziu em 66,6%, isso indica uma melhora quantitativa de 3 vezes na dirigibilidade em comparação com os valores nominais, para esta pista e esta manobra especificamente. A Figura 6 mostra dados compilados de Koch Index pela velocidade de diversos tipos de motocicletas, conforme Cossalter e Sadauckas, 2006, assim como o ponto para a moto em estudo neste trabalho com parâmetros nominais e após a otimização. Antes classificada como uma motocicleta *sport*, após a otimização percebe-se que a motocicleta atingiu valores melhores do que qualquer outro modelo catalogado no estudo.

Figura 6 –Valores compilados para Koch Index por velocidade para diversos modelos, valor para moto em estudo com parâmetros nominais e após otimização.

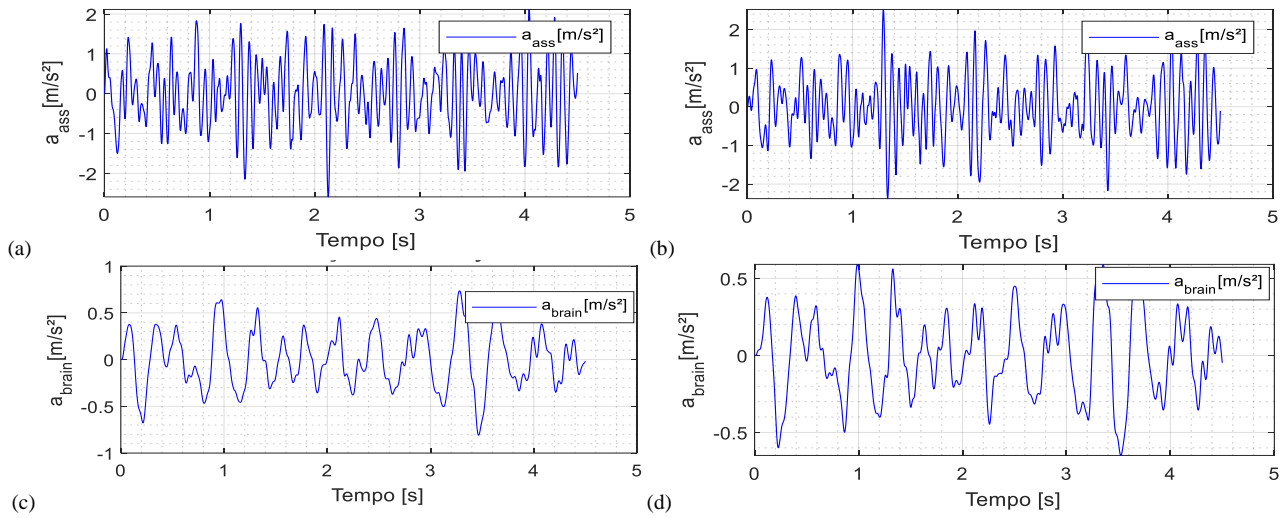


As forças de contato observadas nos pneus dianteiros foram reduzidas para: força lateral (67,3%), força vertical (55,3%) e momento (65,8%). Isto mostra que o momento necessário para o esterçamento da motocicleta reduziu, indicando mais uma vez melhora na dirigibilidade. Para os pneus traseiros observa-se um aumento na força lateral (59%), na força vertical (61%) e no momento (72%). Estas são alterações menores do que no pneu dianteiro e acontecem devido a uma compensação para a motocicleta permanecer na trajetória da curva, sem derrapar. Uma vez que o pneu traseiro não é esterçado isso não influencia na dirigibilidade. A Figura A.4 mostra o sinal no tempo das forças verticais, laterais e momentos para ambos os pneus.

Observa-se na dinâmica lateral que houve redução para a aceleração longitudinal da carroceria (47,3%), aceleração lateral da carroceria (9,4%) e aceleração de rolagem da carroceria (26,4%), isso demonstra um aumento de estabilidade, uma vez que os movimentos laterais se tornam mais suaves. Para a aceleração de guinada da carroceria, houve um aumento no seu valor (19,9%), isso permite que a motocicleta realize o movimento de curva com maior agilidade, resultando em melhor dirigibilidade. As Figuras A.5 e A.6 mostram o sinal no tempo dos GDL da dinâmica lateral antes e depois da otimização, respectivamente.

No que diz respeito a dinâmica vertical da motocicleta, observa-se uma redução pequena na aceleração vertical da carroceria (1,4%), uma redução mais significativa é observada na aceleração vertical do cérebro do piloto (9,6%). Segundo a ISO 2631-1 (1997) a aceleração do assento do piloto na condição de parâmetros nominais poderia ser classificada como de levemente desconfortável a desconfortável. Após a otimização houve uma redução na aceleração do assento (2,4%), o que leva a classificação da motocicleta para levemente desconfortável apenas, configurando uma melhora no conforto. A Figura 7 mostra o sinal no tempo para a aceleração no assento e no cérebro do piloto antes e após a otimização.

Figura 7 – Sinal no tempo para, (a) aceleração no assento com parâmetros nominais, e (b) com parâmetros otimizados, (c) aceleração no cérebro com parâmetros nominais e (d) com parâmetros otimizados.



5. CONCLUSÕES

Este trabalho propôs a otimização multiobjetivo de um modelo de moto visando a dirigibilidade e conforto. Para tanto foi proposto um modelo que inclui a dinâmica vertical (5GDL), a dinâmica lateral (4 GDL) e um modelo de dinâmica vertical (12 GDL) para representar o piloto. Os casos investigados partiram da moto em velocidade constante (80 km/h) executando uma manobra de troca de faixa com rugosidade de pista tipo B padronizada pela norma ISO 2631-1 (1997). Foi investigada a importância do modelamento detalhado do piloto e percebeu-se que, no caso estudado, as maiores modificações encontradas estavam na estimativa das acelerações no assento e na cabeça (cérebro) do piloto, mostrando assim que para realizar uma análise profunda de conforto, ou sobre os efeitos da aceleração no corpo humano, o modelo biodinâmico é interessante.

Para as otimizações multiobjetivo o Koch index, a aceleração vertical do assento e na cabeça foram levadas em conta e posteriormente agrupadas por uma função de utilidade definida por um especialista. As variáveis de projeto escolhidas foram C_{sre} , C_{sfe} , K_{sre} , K_{sfe} , l e a . Observa-se que as variáveis de projeto C_{sfe} e l atingiram seus limites inferior e superior respectivamente, indicando que ainda possa existir uma solução melhor do que a encontrada no presente trabalho, mas os limites se justificam para representarem valores atingíveis na realidade sem prejudicar o desempenho da motocicleta.

A solução ótima encontrada mostrou uma redução significativa no valor do Koch Index após a otimização, indicando uma melhora de 3 vezes na dirigibilidade, para a pista e manobra estudados. Quanto ao conforto, houve uma redução pequena na aceleração do assento (2,4%), mas foi suficiente para retirar a motocicleta da categoria desconfortável. A partir das curvas de Pareto, concluiu-se também que a aceleração no cérebro do motorista e no assento são não concorrentes.

O exemplo presente neste trabalho concorda com testes anteriores utilizando o algoritmo MOQPSO na otimização de suspensões veiculares. O MOQPSO teve 94% de suas partículas não dominadas, enquanto que o NSGA-II teve 72% das partículas não dominadas, o que mostra uma melhor convergência da fronteira de Pareto gerada pelo MOQPSO.

Para trabalhos futuros, recomenda-se um experimento para medir os valores de Koch Index para a moto demonstrada nesse trabalho, ou qualquer outra, visto que o algoritmo funciona para quaisquer parâmetros selecionados. É válido também a mudança das funções objetivo, como espaço de trabalho da suspensão (explorar Figura A.7) ou aceleração lateral dos pneus (para verificar limite de aderência), e também mudança da função de utilidade, visando outro objetivo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Clube das Oficinas. “**Estudo: principais componentes das motos.**” 2014. Acessado em 30/09/2019. Disponível em <<http://clubedasoficinas.com.br/2014/01/estudo-principais-componentes-das-motos/>>

Cossalter, V. “**Motorcycle Dynamics**”, 2nd. Ed., Lulu.com Ed., 2006. ISSN:9781447532767.

Cossalter, V., Sadauckas, J. “**Elaboration and quantitative assessment of manoeuvrability for motorcycle lane change**”, Vehicle System Dynamics, V.44, No. 12, December, pp.903-920. 2006.

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.

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.**” 2017. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica).

EBC. Empresa Brasil de Comunicação. “**Pesquisa da Confederação Nacional dos Municípios**”. 02/07/2018. Acessado em 01/09/2019. Disponível em: <<http://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2018-07/numero-de-motos-e-maior-que-o-de-carros-em-45-das-cidades>>

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.

Grotti, E. “**Multi-objective optimization of bus suspension parameters based on quantum particle model.**” 2018. 15f. Monografia.

ISO 2631-1, 1997. **Mechanical vibration and shock – Evaluation of human exposure to whole-body vibration – Part 1: General requirements.** International Organization for Standardization, Geneva, 2nd edition.

ISO 8608:2016, **Mechanical vibration – Road surface profiles – Reporting of measured data,** International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2016.

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.

Massaro, M, Cossalter, V., Sadauckas, J., Lot, R. “**Using Simulators for the Assessment of Handling of Motorcycles**”. Proceedings, Bicycle and Motorcycle Dynamics, Symposium on the Dynamics and Control of Single Track Vehicles, pp.21-23, September, Milwaukee, Wisconsin USA. 2016.

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.

Motosblog. “**Ficha técnica BMW F800R 2010-2020**”. Acessado em 05/11/2019. Disponível em: <https://fichatecnica.motosblog.com.br/FichaTecnica/BMW/F_800_R_2010>.

Newmark, N. M. “**A Method Of Computation For Structural Dynamics**”; Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 85 (EM3) 67-94. 1959.

Pacejka, H. B. **“Tire characteristics and vehicle handling and stability. Tire and vehicle dynamics”**, Elsevier Ltd, 2012.

Rao, S. S. **Mechanical Vibrations**. 5th Edition, Prentice Hall. 1112 p. 2011.

Revista Quatro Rodas. **“A importância da suspensão dianteira.”** 15/10/2012. Acessado em 30/09/2019. Disponível em <<https://quatrorodas.abril.com.br/noticias/a-importancia-da-suspensao-dianteira/>>

Schio, R., Gomes, H. M. **“Medição de exposição a vibrações para VCI e VMB em usuários de motocicletas”** Revista Liberato: educação, ciência e tecnologia. Novo Hamburgo, RS, Vol. 18, n. 30, jul-dez, pp.227-244, 2017.

Senado Federal. **“Invasão sobre duas rodas: Denatran confirma rápido crescimento da frota de motos no trânsito brasileiro e grande número de motociclistas não habilitados”**. Revista de audiências públicas do Senado Federal. Ano 4, No. 13, Novembro de 2012. Acessado em 01/09/2019. Disponível em <<http://www.senado.gov.br/noticias/Jornal/emdiscussao/motos/habilitacao/invasao-sobre-duas-rodas-departamento-nacional-de-transito-denatran-confirma-rapido-crescimento-da-frota-de-motos-no-transito-brasileiro-e-grande-numero-de-motociclistas-nao-habilitados.aspx>>

Shinozuka, M., Jan, C. M., **“Digital Simulation of Random Process and its applications. Journal of Sound and Vibration”**, 25, 111-118, 1972.

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.

Tholeti, R. K., Parimi, A., Shaikh, A. M., Prashant, B., Yogaraja, V. **“To Optimize Motorcycle Ride Comfort and Handling Parameters for Inverted Telescopic Suspension”**. SIAT Symposium on international automotive technology, India, 2013.

Zainal, N.A., Zakaria, M. A., Baarath, K. **“A study on the exposure of vertical vibration towards the brain on seated human driver model”**, Intelligent Manufacturing & Mechatronics, 2018.

Zou, X., Shi, X., Shi, Q., Xiao, S. **“Motorcycle Dynamics Modeling and Simulation Based on Road Simulation.”** Applied Mechanics and Materials Vols. 16-19 pp 307-312, 2009.

APÊNDICE

Figura A.1 – Ângulo de esterçamento da roda dianteira no tempo.

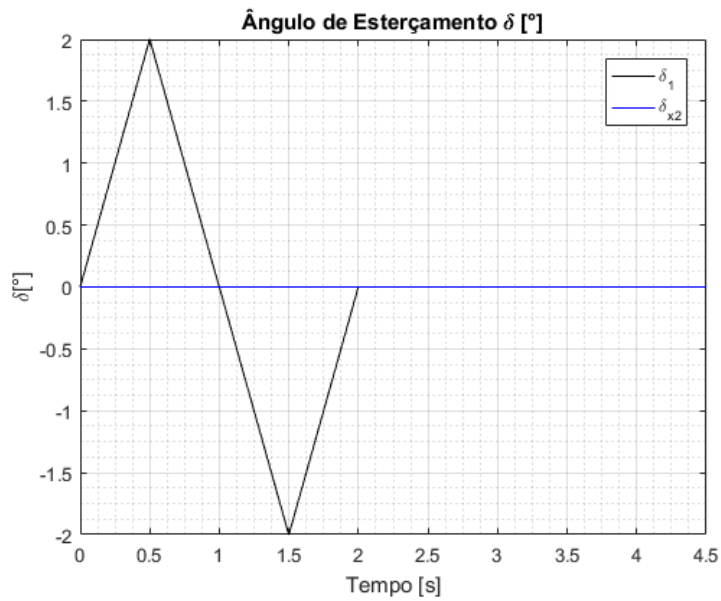


Figura A.2 – Trajetória percorrida pela motocicleta na manobra de mudança simples de faixa.

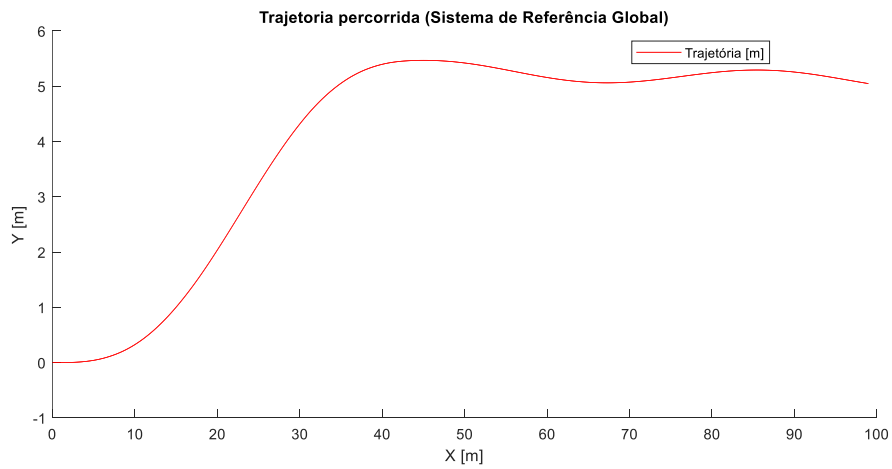


Figura A.3 – Irregularidades da pista para ambos os pneus no tempo.



Figura A.4 – Sinal no tempo de ambos pneus para, (a) forças verticais, (b) forças laterais e (c) momentos aplicados com parâmetros nominais. E com parâmetros otimizados, (d), (e) e (f) respectivamente.

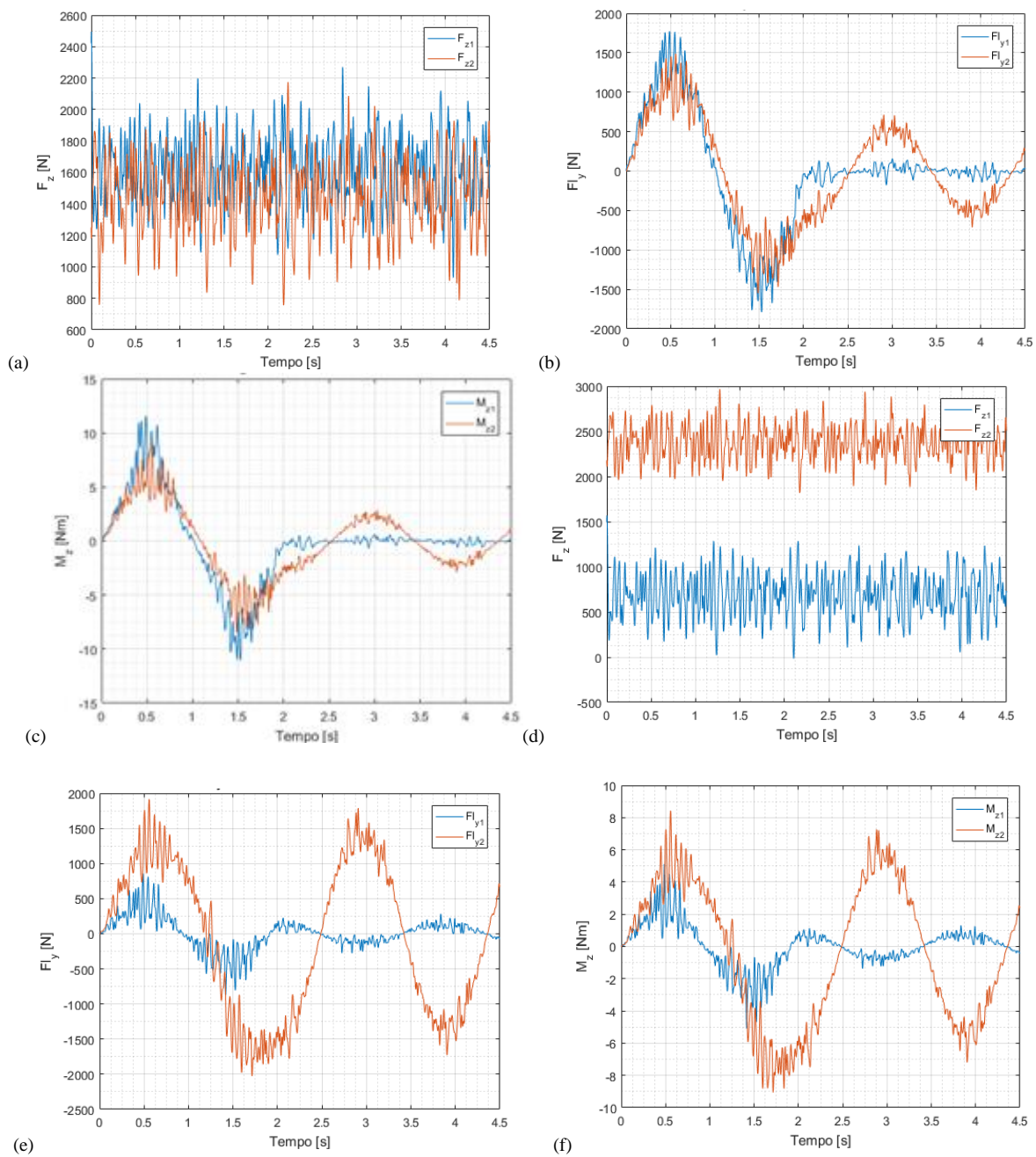
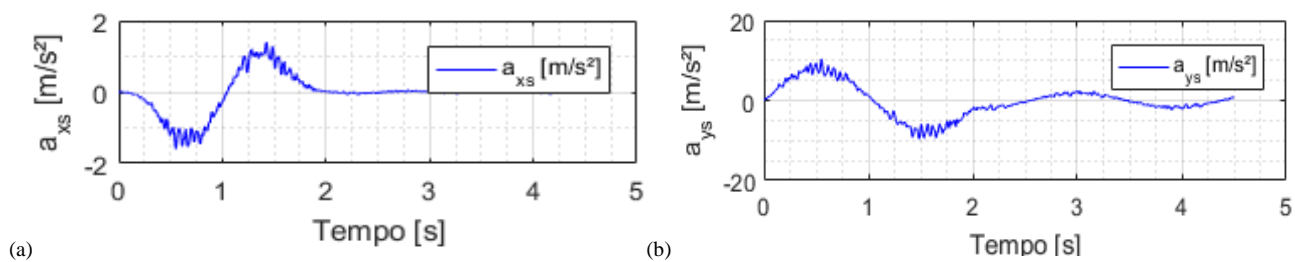


Figura A.5 – Sinal no tempo para, (a) aceleração longitudinal, (b) aceleração lateral, (c) aceleração de guinada e (d) aceleração de rolagem com parâmetros nominais.



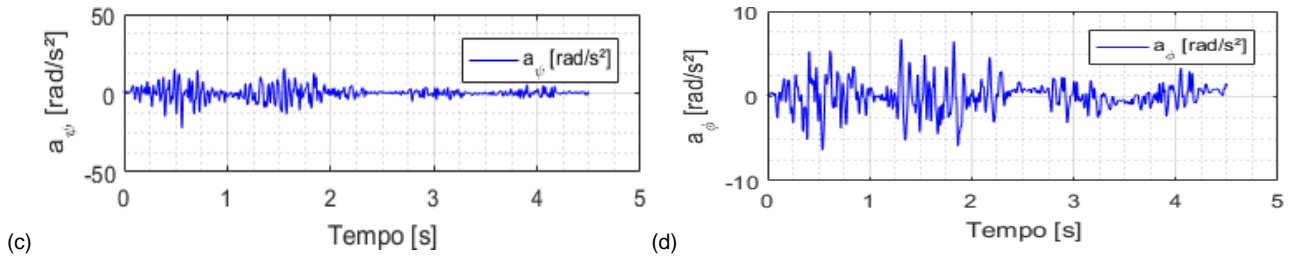


Figura A.6 – Sinal no tempo para, (a) aceleração longitudinal, (b) aceleração lateral, (c) aceleração de guinada e (d) aceleração de rolagem com parâmetros otimizados.

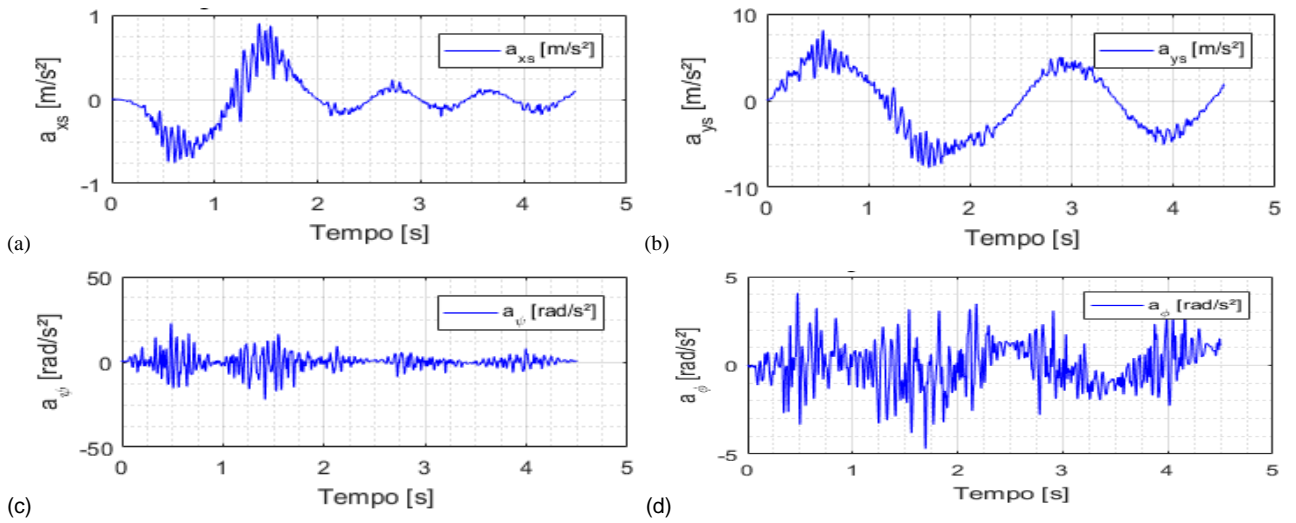


Figura A.7 – Espaço de trabalho da suspensão dianteira e traseira com parâmetros nominais (a) e com parâmetros otimizados (b).

