

COLEÇÃO **DESAFIOS** DAS **ENGENHARIAS:**

ENGENHARIA MECÂNICA



HENRIQUE AJUZ HOLZMANN
JOÃO DALLAMUTA
(ORGANIZADORES)

Atena
Editora
Ano 2021

COLEÇÃO
DESAFIOS
DAS
ENGENHARIAS:

ENGENHARIA MECÂNICA



HENRIQUE AJUZ HOLZMANN
JOÃO DALLAMUTA
(ORGANIZADORES)

Atena
Editora
Ano 2021

Editora chefe

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Assistentes editoriais

Natalia Oliveira

Flávia Roberta Barão

Bibliotecária

Janaina Ramos

Projeto gráfico

Natália Sandrini de Azevedo

Camila Alves de Cremo

Luiza Alves Batista

Maria Alice Pinheiro

Imagens da capa

iStock

Edição de arte

Luiza Alves Batista

Revisão

Os autores

2021 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do Texto © 2021 Os autores

Copyright da Edição © 2021 Atena Editora

Direitos para esta edição cedidos à Atena Editora pelos autores.

Open access publication by Atena Editora



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição Creative Commons. Atribuição-Não-Comercial-NãoDerivativos 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0).

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores, inclusive não representam necessariamente a posição oficial da Atena Editora. Permitido o *download* da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Todos os manuscritos foram previamente submetidos à avaliação cega pelos pares, membros do Conselho Editorial desta Editora, tendo sido aprovados para a publicação com base em critérios de neutralidade e imparcialidade acadêmica.

A Atena Editora é comprometida em garantir a integridade editorial em todas as etapas do processo de publicação, evitando plágio, dados ou resultados fraudulentos e impedindo que interesses financeiros comprometam os padrões éticos da publicação. Situações suspeitas de má conduta científica serão investigadas sob o mais alto padrão de rigor acadêmico e ético.

Conselho Editorial

Ciências Humanas e Sociais Aplicadas

Prof. Dr. Alexandre Jose Schumacher – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Paraná

Prof. Dr. Américo Junior Nunes da Silva – Universidade do Estado da Bahia

Profª Drª Andréa Cristina Marques de Araújo – Universidade Fernando Pessoa

Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Dr. Antonio Gasparetto Júnior – Instituto Federal do Sudeste de Minas Gerais

Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília

Prof. Dr. Arnaldo Oliveira Souza Júnior – Universidade Federal do Piauí
 Prof. Dr. Carlos Antonio de Souza Moraes – Universidade Federal Fluminense
 Prof. Dr. Crisóstomo Lima do Nascimento – Universidade Federal Fluminense
 Prof^a Dr^a Cristina Gaio – Universidade de Lisboa
 Prof. Dr. Daniel Richard Sant'Ana – Universidade de Brasília
 Prof. Dr. Deyvison de Lima Oliveira – Universidade Federal de Rondônia
 Prof^a Dr^a Dilma Antunes Silva – Universidade Federal de São Paulo
 Prof. Dr. Edvaldo Antunes de Farias – Universidade Estácio de Sá
 Prof. Dr. Elson Ferreira Costa – Universidade do Estado do Pará
 Prof. Dr. Eloi Martins Senhora – Universidade Federal de Roraima
 Prof. Dr. Gustavo Henrique Cepolini Ferreira – Universidade Estadual de Montes Claros
 Prof. Dr. Humberto Costa – Universidade Federal do Paraná
 Prof^a Dr^a Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionale delle Figlie de Maria Ausiliatrice
 Prof. Dr. Jadson Correia de Oliveira – Universidade Católica do Salvador
 Prof. Dr. José Luis Montesillo-Cedillo – Universidad Autónoma del Estado de México
 Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense
 Prof^a Dr^a Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins
 Prof. Dr. Luis Ricardo Fernandes da Costa – Universidade Estadual de Montes Claros
 Prof^a Dr^a Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
 Prof. Dr. Marcelo Pereira da Silva – Pontifícia Universidade Católica de Campinas
 Prof^a Dr^a Maria Luzia da Silva Santana – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
 Prof. Dr. Miguel Rodrigues Netto – Universidade do Estado de Mato Grosso
 Prof. Dr. Pablo Ricardo de Lima Falcão – Universidade de Pernambuco
 Prof^a Dr^a Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa
 Prof^a Dr^a Rita de Cássia da Silva Oliveira – Universidade Estadual de Ponta Grossa
 Prof. Dr. Rui Maia Diamantino – Universidade Salvador
 Prof. Dr. Saulo Cerqueira de Aguiar Soares – Universidade Federal do Piauí
 Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
 Prof^a Dr^a Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande
 Prof^a Dr^a Vanessa Ribeiro Simon Cavalcanti – Universidade Católica do Salvador
 Prof. Dr. William Cleber Domingues Silva – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
 Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

Ciências Agrárias e Multidisciplinar

Prof. Dr. Alexandre Igor Azevedo Pereira – Instituto Federal Goiano
 Prof. Dr. Arinaldo Pereira da Silva – Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará
 Prof. Dr. Antonio Pasqualetto – Pontifícia Universidade Católica de Goiás
 Prof^a Dr^a Carla Cristina Bauermann Brasil – Universidade Federal de Santa Maria
 Prof. Dr. Cleberton Correia Santos – Universidade Federal da Grande Dourados
 Prof^a Dr^a Diocléa Almeida Seabra Silva – Universidade Federal Rural da Amazônia
 Prof. Dr. Écio Souza Diniz – Universidade Federal de Viçosa
 Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul
 Prof. Dr. Fágner Cavalcante Patrocínio dos Santos – Universidade Federal do Ceará
 Prof^a Dr^a Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
 Prof. Dr. Jael Soares Batista – Universidade Federal Rural do Semi-Árido
 Prof. Dr. Jayme Augusto Peres – Universidade Estadual do Centro-Oeste
 Prof. Dr. Júlio César Ribeiro – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
 Prof^a Dr^a Lina Raquel Santos Araújo – Universidade Estadual do Ceará
 Prof. Dr. Pedro Manuel Villa – Universidade Federal de Viçosa
 Prof^a Dr^a Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão
 Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará
 Prof^a Dr^a Talita de Santos Matos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

Prof. Dr. Tiago da Silva Teófilo – Universidade Federal Rural do Semi-Árido
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas

Ciências Biológicas e da Saúde

Prof. Dr. André Ribeiro da Silva – Universidade de Brasília
Profª Drª Anelise Levay Murari – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Benedito Rodrigues da Silva Neto – Universidade Federal de Goiás
Profª Drª Daniela Reis Joaquim de Freitas – Universidade Federal do Piauí
Profª Drª Débora Luana Ribeiro Pessoa – Universidade Federal do Maranhão
Prof. Dr. Douglas Siqueira de Almeida Chaves – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Edson da Silva – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri
Profª Drª Elizabeth Cordeiro Fernandes – Faculdade Integrada Medicina
Profª Drª Eleuza Rodrigues Machado – Faculdade Anhanguera de Brasília
Profª Drª Elane Schwinden Prudêncio – Universidade Federal de Santa Catarina
Profª Drª Eysler Gonçalves Maia Brasil – Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira
Prof. Dr. Ferlando Lima Santos – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Profª Drª Fernanda Miguel de Andrade – Universidade Federal de Pernambuco
Prof. Dr. Fernando Mendes – Instituto Politécnico de Coimbra – Escola Superior de Saúde de Coimbra
Profª Drª Gabriela Vieira do Amaral – Universidade de Vassouras
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria
Prof. Dr. Helio Franklin Rodrigues de Almeida – Universidade Federal de Rondônia
Profª Drª Iara Lúcia Tescarollo – Universidade São Francisco
Prof. Dr. Igor Luiz Vieira de Lima Santos – Universidade Federal de Campina Grande
Prof. Dr. Jefferson Thiago Souza – Universidade Estadual do Ceará
Prof. Dr. Jesus Rodrigues Lemos – Universidade Federal do Piauí
Prof. Dr. Jônatas de França Barros – Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. José Max Barbosa de Oliveira Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
Prof. Dr. Luís Paulo Souza e Souza – Universidade Federal do Amazonas
Profª Drª Magnólia de Araújo Campos – Universidade Federal de Campina Grande
Prof. Dr. Marcus Fernando da Silva Praxedes – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Profª Drª Maria Tatiane Gonçalves Sá – Universidade do Estado do Pará
Profª Drª Mylena Andréa Oliveira Torres – Universidade Ceuma
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Paulo Inada – Universidade Estadual de Maringá
Prof. Dr. Rafael Henrique Silva – Hospital Universitário da Universidade Federal da Grande Dourados
Profª Drª Regiane Luz Carvalho – Centro Universitário das Faculdades Associadas de Ensino
Profª Drª Renata Mendes de Freitas – Universidade Federal de Juiz de Fora
Profª Drª Vanessa da Fontoura Custódio Monteiro – Universidade do Vale do Sapucaí
Profª Drª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande
Profª Drª Welma Emidio da Silva – Universidade Federal Rural de Pernambuco

Ciências Exatas e da Terra e Engenharias

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto
Profª Drª Ana Grasielle Dionísio Corrêa – Universidade Presbiteriana Mackenzie
Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás
Profª Drª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná
Prof. Dr. Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Prof. Dr. Douglas Gonçalves da Silva – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Profª Drª Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro

Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará
 Profª Dra. Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho
 Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande
 Profª Drª Luciana do Nascimento Mendes – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte
 Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá
 Prof. Dr. Marco Aurélio Kistemann Junior – Universidade Federal de Juiz de Fora
 Profª Drª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba
 Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
 Profª Drª Priscila Tessmer Scaglioni – Universidade Federal de Pelotas
 Prof. Dr. Sidney Gonçalves de Lima – Universidade Federal do Piauí
 Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

Linguística, Letras e Artes

Profª Drª Adriana Demite Stephani – Universidade Federal do Tocantins
 Profª Drª Angeli Rose do Nascimento – Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro
 Profª Drª Carolina Fernandes da Silva Mandaji – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
 Profª Drª Denise Rocha – Universidade Federal do Ceará
 Profª Drª Edna Alencar da Silva Rivera – Instituto Federal de São Paulo
 Profª Drª Fernanda Tonelli – Instituto Federal de São Paulo,
 Prof. Dr. Fabiano Tadeu Grazioli – Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões
 Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná
 Profª Drª Keyla Christina Almeida Portela – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Paraná
 Profª Drª Miranilde Oliveira Neves – Instituto de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará
 Profª Drª Sandra Regina Gardacho Pietrobon – Universidade Estadual do Centro-Oeste
 Profª Drª Sheila Marta Carregosa Rocha – Universidade do Estado da Bahia

Diagramação: Maria Alice Pinheiro
Correção: Mariane Aparecida Freitas
Revisão: Os autores
Organizadores: Henrique Ajuz Holzmann
João Dallamuta

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)	
C691	<p>Coleção desafios das engenharias: engenharia mecânica / Organizadores Henrique Ajuz Holzmann, João Dallamuta. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2021.</p> <p>Formato: PDF Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader Modo de acesso: World Wide Web Inclui bibliografia ISBN 978-65-5983-259-0 DOI: https://doi.org/10.22533/at.ed.590212107</p> <p>1. Engenharia mecânica. I. Holzmann, Henrique Ajuz (Organizador). II. Dallamuta, João (Organizador). III. Título. CDD 621</p>
Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166	

Atena Editora
Ponta Grossa – Paraná – Brasil
Telefone: +55 (42) 3323-5493
www.atenaeditora.com.br
contato@atenaeditora.com.br

DECLARAÇÃO DOS AUTORES

Os autores desta obra: 1. Atestam não possuir qualquer interesse comercial que constitua um conflito de interesses em relação ao artigo científico publicado; 2. Declaram que participaram ativamente da construção dos respectivos manuscritos, preferencialmente na: a) Concepção do estudo, e/ou aquisição de dados, e/ou análise e interpretação de dados; b) Elaboração do artigo ou revisão com vistas a tornar o material intelectualmente relevante; c) Aprovação final do manuscrito para submissão.; 3. Certificam que os artigos científicos publicados estão completamente isentos de dados e/ou resultados fraudulentos; 4. Confirmam a citação e a referência correta de todos os dados e de interpretações de dados de outras pesquisas; 5. Reconhecem terem informado todas as fontes de financiamento recebidas para a consecução da pesquisa; 6. Autorizam a edição da obra, que incluem os registros de ficha catalográfica, ISBN, DOI e demais indexadores, projeto visual e criação de capa, diagramação de miolo, assim como lançamento e divulgação da mesma conforme critérios da Atena Editora.

DECLARAÇÃO DA EDITORA

A Atena Editora declara, para os devidos fins de direito, que: 1. A presente publicação constitui apenas transferência temporária dos direitos autorais, direito sobre a publicação, inclusive não constitui responsabilidade solidária na criação dos manuscritos publicados, nos termos previstos na Lei sobre direitos autorais (Lei 9610/98), no art. 184 do Código penal e no art. 927 do Código Civil; 2. Autoriza e incentiva os autores a assinarem contratos com repositórios institucionais, com fins exclusivos de divulgação da obra, desde que com o devido reconhecimento de autoria e edição e sem qualquer finalidade comercial; 3. Todos os e-book são *open access*, desta forma não os comercializa em seu site, sites parceiros, plataformas de *e-commerce*, ou qualquer outro meio virtual ou físico, portanto, está isenta de repasses de direitos autorais aos autores; 4. Todos os membros do conselho editorial são doutores e vinculados a instituições de ensino superior públicas, conforme recomendação da CAPES para obtenção do Qualis livro; 5. Não cede, comercializa ou autoriza a utilização dos nomes e e-mails dos autores, bem como nenhum outro dado dos mesmos, para qualquer finalidade que não o escopo da divulgação desta obra.

APRESENTAÇÃO

A Engenharia Mecânica pode ser definida como o ramo da engenharia que aplica os princípios de física e ciência dos materiais para a concepção, análise, fabricação e manutenção de sistemas mecânicos. O aumento no interesse por essa área se dá principalmente pela escassez de matérias primas, a necessidade de novos materiais que possuam melhores características físicas e químicas e a necessidade de reaproveitamento dos resíduos em geral. Além disso a busca pela otimização no desenvolvimento de projetos, leva cada vez mais a simulação de processos, buscando uma redução de custos e de tempo.

Neste livro são apresentados trabalho teóricos e práticos, relacionados a área de mecânica, materiais e automação, dando um panorama dos assuntos em pesquisa atualmente. A caracterização dos materiais é de extrema importância, visto que afeta diretamente aos projetos e sua execução dentro de premissas técnicas e econômicas. Pode-se ainda estabelecer que estas características levam a alterações quase que imediatas no projeto, sendo uma modificação constante na busca por melhores respostas e resultados.

De abordagem objetiva, a obra se mostra de grande relevância para graduandos, alunos de pós-graduação, docentes e profissionais, apresentando temáticas e metodologias diversificadas, em situações reais. Sendo hoje que utilizar dos conhecimentos científicos de uma maneira eficaz e eficiente é um dos desafios dos novos engenheiros.

Boa leitura

Henrique Ajuz Holzmann
João Dallamuta

SUMÁRIO


CAPÍTULO 1..... 1

MODELAGEM DE UM MANIPULADOR PARALELO 3RRR PARA INCLUSÃO DE ELOS FLEXÍVEIS

André Vecchione Segura

Fernanda Thaís Colombo

Maíra Martins da Silva

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5902121071>


CAPÍTULO 2..... 9

MODELAGEM NUMÉRICA DE SUSPENSÃO DE ¼ DE VEÍCULO

Lucas Alves Torres

Lucas Messias Cunha de Araújo

João Gabriel Paulino de Souza

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5902121072>


CAPÍTULO 3..... 20

OTIMIZAÇÃO PARAMÉTRICA DA SUSPENSÃO DE UM CAMINHÃO COM RESTRIÇÃO DE CONFIABILIDADE

José Gilberto Picoral Filho

Ewerton Grotti

Herbert Martins Gomes


 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5902121073>

CAPÍTULO 4..... 38

ANÁLISE DE FADIGA PARA OS AÇOS ABNT 1045 E ABNT 4140 PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Brenda Martins Fernandes

Reny Angela Renzetti


 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5902121074>

CAPÍTULO 5..... 48

ANÁLISE PARAMÉTRICA DAS FREQUÊNCIAS DOMINANTES DE UM VIOLÃO ACÚSTICO

Marco Túlio Santana Alves

Felipe Iglesias


 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5902121075>

CAPÍTULO 6..... 56

VORTEX-INDUCED VIBRATIONS MODEL WITH 2 DEGREES OF FREEDOM OF RIGID CYLINDERS NEAR A FIXED WALL BASED ON WAKE OSCILLATOR

Rafael Fehér

Juan Pablo Julca Avila


 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5902121076>

CAPÍTULO 7.....67

AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS DE UM COLETOR SOLAR DE TUBO EVACUADO ECCÊNTRICO

Mavd de Paula Ribeiro Teles

Kamal Abdel Radi Ismail

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5902121077>

CAPÍTULO 8.....79

RADIÔMETRO SOLAR DE BAIXO CUSTO USANDO A PLATAFORMA ABERTA ARDUINO

Elson Avallone

Cristiano Pansanato

Átila Negretti Faro

Dionísio Igor Alves da Silva

Jhonatas Wendel da Silva

Guilherme Biazzi Gonçalves

Mário César Ito

Rafael Paiva Garcia

Paulo César Mioralli

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5902121078>


CAPÍTULO 9.....92

TURBULENT FORCED CONVECTION IN THE THERMAL ENTRANCE OF RECTANGULAR DUCTS: ANALYSIS FOR DIFFERENT MODELS OF VELOCITY DISTRIBUTION AND MOMENTUM EDDY DIFFUSIVITY

Dhiego Luiz de Andrade Veloso

Carlos Antônio Cabral dos Santos

Fábio Araújo de Lima


 <https://doi.org/10.22533/at.ed.5902121079>

CAPÍTULO 10.....109

SELEÇÕES DE SUBSTITUIÇÃO EM UM ALGORITMO GENÉTICO DE CODIFICAÇÃO REAL APLICADO À OTIMIZAÇÃO DE UM CICLO RANKINE ORGÂNICO DE DUPLO ESTÁGIO

Guilherme de Paula Prado

Renan Manozzo Galante

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.59021210710>

CAPÍTULO 11.....124

DINÂMICA LINEAR PLANA DE UM TUBO ENGASTADO TRANSPORTANDO FLUIDO COM UMA MASSA ANEXADA NA EXTREMIDADE LIVRE

Milton Aparicio de Oliveira


 <https://doi.org/10.22533/at.ed.59021210711>

CAPÍTULO 12..... 138

SENSOR CAPACITIVO PARA DETECÇÃO DE FRAÇÃO DE VAZIO EM ESCOAMENTO BIFÁSICO ÁGUA-AR

Anderson Giacomeli Fortes

Jeferson Diehl de Oliveira

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.59021210712>

CAPÍTULO 13..... 150

STUDY OF STATIC AND DYNAMIC LEVELS OF UNDERGROUND AQUIFER WELLS TO MAINTAIN THEIR BALANCE LEVEL IN THE PROVINCE OF ICA - 2014

Primitivo Bacilio Hernández Hernández

Omar Michael Hernández García


Aníbal Bacilio Hernández García

Jessenia Leonor Loayza Gutiérrez

Walter Merma Cruz

Marcos Luís Quispe Pérez

Edward Paul Sueros Ticona

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.59021210713>

CAPÍTULO 14..... 164

SISTEMAS COMPUTACIONAIS INTELIGENTES E CONTROLE AVANÇADO COM ÊNFASE EM MAPAS COGNITIVOS FUZZY EM SISTEMAS DINÂMICOS APLICADOS EM DIFERENTES ÁREAS, COM ÊNFASE EM ROBÓTICA

Márcio Mendonça

Marina Souza Gazotto

Marina Sandrini

Marta Rúbia Pereira dos Santos


Rodrigo Henrique Cunha Palácios

Fábio Rodrigo Milanez

Lillyane Rodrigues Cintra

Francisco de Assis Scannavino Junior

Wagner Fontes Godoy

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.59021210714>

CAPÍTULO 15..... 181


ROBÔ AUTÔNOMO PARA ESTACIONAMENTO

Lucas Netto Luzente de Almeida

Graziele Barreto da Costa Almeida

Heitor Gomes de Souza Batista

Armando Carlos de Pina Filho

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.59021210715>

CAPÍTULO 16..... 193

PROTOTIPAGEM RÁPIDA 3D APLICADA AO ÂMBITO UNIVERSITÁRIO

Vitória de Oliveira Mattos

Lucas Ruzzon de Jesus Ortega

Rafael Issao Fukai

Milena de Sousa Ferreira
João Pedro Monterani Laguna
Marcelo Sampaio Martins


 <https://doi.org/10.22533/at.ed.59021210716>

CAPÍTULO 17..... 199

**UMA SOLUÇÃO ANALÍTICA PARA EFEITOS MECÂNICOS EM TUMORES SÓLIDOS
AVASCULARIZADOS**

Francisco Jose Vargas da Silva

Fernando Pereira Duda

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.59021210717>

SOBRE OS ORGANIZADORES 206

ÍNDICE REMISSIVO..... 207

OTIMIZAÇÃO PARAMÉTRICA DA SUSPENSÃO DE UM CAMINHÃO COM RESTRIÇÃO DE CONFIABILIDADE

Data de aceite: 01/07/2021

Data de submissão: 06/05/2021

José Gilberto Picoral Filho

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Canoas – Rio Grande do Sul
<http://lattes.cnpq.br/4332164485428439>

Ewerton Grotti

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Porto Alegre – Rio Grande do Sul
<http://lattes.cnpq.br/0029413260718816>

Herbert Martins Gomes

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Porto Alegre – Rio Grande do Sul
<http://lattes.cnpq.br/9590878975154230>

RESUMO: Este trabalho busca investigar a aplicação do índice de confiabilidade (β) em uma otimização dos parâmetros de rigidez e amortecimento da suspensão de um caminhão. Para tanto, o algoritmo heurístico PSO (Particle Swarm Optimization) é usado em conjunto com o algoritmo FORM (First Order Reliability Method), que restringe o espaço da função objetivo pelo índice de confiabilidade para o conforto do motorista. Três otimizações distintas foram realizadas para três funções objetivo diferentes. Na primeira otimização, a função objetivo escolhida foi a minimização da aceleração RMS (Root Mean Square) no assento do motorista, e na segunda e terceira otimização as funções objetivo foram a minimização do máximo deslocamento relativo das rodas para

o eixo da suspensão e o máximo deslocamento relativo das suspensões para a carroceria respectivamente. Todas as otimizações tiveram restrição de confiabilidade para o conforto de $\beta \geq 2$. Ao final, a primeira otimização resultou em um conjunto de parâmetros com índice de confiabilidade $\beta_{otm1} = 4,36$, e uma redução da aceleração vertical sob o motorista de 30%. As demais otimizações mantiveram $\beta_{otm2,3} = 2$, indicando restrição ativa nas otimizações. Uma simulação por Monte-Carlo também foi realizada, na qual foi possível evidenciar o comportamento do índice de confiabilidade perante as variáveis de projeto.

PALAVRAS - CHAVE: Otimização baseada em confiabilidade. Suspensão. PSO. Caminhão. Vibração.

PARAMETRIC OPTIMIZATION OF THE SUSPENSION OF A TRUCK WITH RELIABILITY RESTRICTION

ABSTRACT: This work investigates the reliability index (β) application in the optimization of the suspension parameters of a truck. The algorithm PSO (Particle Swarm Optimization) is used to perform the optimization, and the FORM (First Order Reliability Method) serves as constraint, calculating the reliability index for driver comfort. Three optimizations were performed using different objective functions. In the first optimization, the objective function chosen was the RMS (Root Mean Square) acceleration in the driver's seat, and in the second and third optimization, the objective functions were the relative displacement of the wheel to the

suspension axle and the relative displacement of the suspension to the bodywork respectively. All the optimizations have the same reliability constraint for objective function of $\beta \geq 2$. For the first optimization it was obtained a solution with a reliability index $\beta_{otm1} = 4,36$, and a reduction in driver's vertical acceleration of 33%. The other two optimizations maintained $\beta_{otm2,3} = 2$, indicating an active constraint. A Monte-Carlo simulation was also carried out, where it was possible to point the behavior of the reliability index against the design variables.

KEYWORDS: Reliability-based Optimization, Suspension, PSO, Truck, Vibration.

1 | INTRODUÇÃO

Um dos desafios da indústria automobilística é a busca incessante pela redução da vibração nos passageiros e motoristas dos veículos. A vibração gerada pelo motor a combustão e pelas irregularidades da pista sofrem mitigação na suspensão do veículo e no assento, inevitavelmente chegando aos passageiros e motorista de forma reduzida. Dependendo de sua intensidade, frequência e tempo de exposição, esta vibração pode causar inúmeros problemas: aqueles decorrentes do desconforto (como falta de atenção e sonolência, por exemplo) ou dos problemas de saúde (desgaste nas vértebras e ou articulações, entre outros).

Este trabalho busca investigar a aplicação do índice de confiabilidade (β) em uma otimização dos parâmetros de rigidez e amortecimento da suspensão de um caminhão com o objetivo de reduzir as chances de que os limites de exposição e conforto sejam atingidos, assumindo-se uma variabilidade inerente aos parâmetros de massa do problema e certo nível de confiabilidade.

2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Outros autores já exploraram a aplicação do índice de confiabilidade na otimização. Este campo é comumente referido como RBDO (*Reliability-Based Design Optimization*). Grujicic et al., 2009, aplicou o RBDO em uma otimização para aumentar a vida em fadiga de elementos da suspensão de um veículo. O autor usou o programa de elementos finitos ABAQUS, em conjunto com a inserção de variáveis aleatórias provenientes dos métodos de fabricação. A partir disso, pode avaliar o efeito das incertezas induzidas pelo processamento de materiais nas propriedades físicas dos mesmos, assim como os efeitos oriundos da fabricação de componentes sobre as mesmas propriedades.

Um estudo do efeito das incertezas na otimização estrutural foi proposto por Gomes (2010). Para isso elaborou uma comparação entre resultados obtidos através de distintas formulações do problema de otimização estrutural, dentre as quais a otimização baseada na confiabilidade, o que possibilitou ainda avaliar a relação entre economia e segurança.

Pino (2017) realizou um estudo da otimização fundamentada na confiabilidade. O objetivo desse foi minimizar a função de custo (peso) de estruturas treliçadas sujeitas a restrições de segurança mínimas. Para solução do problema de confiabilidade foi utilizado

o método FORM (*First Order Reliability Method*) , com o algoritmo melhorado por Hasofer e Lind.

Outro trabalho relevante na área da RBDO é o apresentado por Alves (2018), onde o objetivo era estudar a otimização baseada na confiabilidade de pórticos de concreto armado. A abordagem utilizada permitiu calcular o grau de confiabilidade, assim como o risco de falha do sistema estrutural de cada elemento isoladamente. A análise foi feita através do cálculo da probabilidade de falha da estrutura mediante a avaliação dos estados limites pelo método FORM, mesmo método apresentado neste trabalho.

O tema de otimização de suspensão veicular e de seus componentes levando em conta as incertezas presentes é vasto e pode ser encontrado em diversos trabalhos como nos de Zhang (2015), Yang (2015), Lee et al., 2017, e Fang et al., 2013, para citar apenas alguns. Entretanto estes artigos não utilizam a abordagem pelo método FORM, e nem as incertezas presentes neste artigo aplicado a caminhões.

3 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Modelo de dinâmica vertical

O modelo do veículo usado neste trabalho é um caminhão baú com três eixos, sendo dois traseiros trativos e o dianteiro não-trativo. Na Figura 1 (a) encontra-se um utilitário comercial com as características de layout do chassi em conformidade com o modelo em estudo, assim como a mesma categoria (baú).

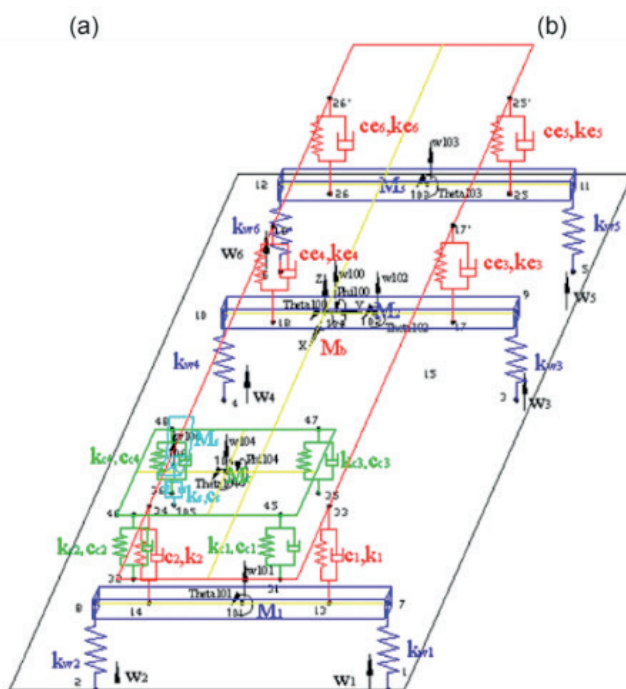


Figura 1. (a) Modelo comercial de caminhão tipo “truck” baú, extraído das Especificações VW Constellation 24.280”, (2006). (b) Modelo simplificado para a suspensão vertical com 19 graus de liberdade.

Este modelo numérico de suspensão utilizado neste trabalho é o mesmo detalhado em Li, (2006). Tal modelo possui 19 graus de liberdade, sendo eles: deslocamento do assento do motorista (w_{106}); deslocamento da cabine (w_{104}); rolagem da cabine (α_{104}); arfagem da cabine (φ_{104}); deslocamento do chassi (w_{100}); rolagem do chassi (α_{100}); arfagem do chassi (φ_{100}); deslocamento do eixo de direção (w_{101}); rolagem do eixo de direção (α_{101}); deslocamento do eixo central (w_{102}); rolagem do eixo central (α_{102}); deslocamento do eixo

traseiro (w_{103}); rolagem do eixo traseiro (α_{103}); deslocamento da roda de direção esquerda posterior (w_1); deslocamento da roda de direção direita posterior (w_2); deslocamento da roda esquerda intermediária (w_3); deslocamento da roda direita intermediária (w_4); deslocamento da roda esquerda traseira (w_5); deslocamento da roda direita traseira (w_6). A Figura 1 ilustra o modelo oscilatório da suspensão do caminhão, indicando as rigidezes e amortecimentos equivalentes. A tabela 1 mostra as propriedades inerciais, as rigidezes, amortecimentos, e algumas dimensões geométricas importantes do modelo numérico. Informações detalhadas sobre a criação do modelo, bem como a dedução das rigidezes e amortecimentos efetivos, e dimensões geométricas do modelo, e referências acerca das variáveis podem ser encontradas em Li, (2006).

Massas [Kg]					
M_s	M_c	M_b	M_1	M_2	M_3
120	500	19000	450	1025	1025
Momentos de Inércia de massa [Kgm ²]					
I_{c_x}	I_{c_y}	I_{b_x}	I_{b_y}	I_{1_x}	I_{2_x}
150	100	7800	7800	280	510
Rigidezes [N/m]					
K_s	$K_{c_1}, K_{c_2}, K_{c_3}, K_{c_4}$	K_1, K_2	K_3, K_4, K_5, K_6	K_{w_1}, K_{w_2}	$K_{w_3}, K_{w_4}, K_{w_5}, K_{w_6}$
$2,00 \times 10^4$	$1,00 \times 10^5$	$1,02 \times 10^5$	$2,09 \times 10^5$	$6,90 \times 10^5$	$1,38 \times 10^6$
Amortecimentos [Ns/m]					
c_s	$C_{c_1}, C_{c_2}, C_{c_3}, C_{c_4}$	C_1, C_2	C_3, C_4, C_5, C_6		
$2,00 \times 10^2$	$7,50 \times 10^2$	7028	14090,78		

Tabela 1. Parâmetros do modelo numérico da suspensão do caminhão, adaptado de Li, B. (2006).

onde: M_s corresponde à massa do banco mais a massa do motorista, M_c à massa da cabine, M_b à massa suspensa (exceto massa da cabine), M_1 à massa não suspensa do eixo dianteiro, M_2 à massa não suspensa do eixo central, M_3 à massa não suspensa do eixo traseiro, I_{c_x} à inércia da cabine em torno do eixo X (rolagem), I_{c_y} à inércia da cabine em torno do eixo Y (arfagem), I_{b_x} à inércia da massa da mola, excluindo a cabine, em torno do eixo X (rolagem), I_{b_y} à inércia da massa suspensa, excluindo a cabine, em torno do eixo Y (arfagem), I_{1_x} à inércia da massa não suspensa do eixo dianteiro (rolagem), I_{2_x} à inércia da massa não suspensa do eixo central (rolagem), I_{3_x} e corresponde à inércia da massa não suspensa do eixo traseiro (rolagem). K_s é a rigidez do assento, $K_{c_1}, K_{c_2}, K_{c_3}, K_{c_4}$ são as rigidezes dos apoios da cabine, K_1, K_2 , as rigidezes da suspensão dianteira esquerda e direita, K_3, K_4, K_5, K_6 as rigidezes das suspensões dos dois eixos traseiros e o índice w se refere à rigidez das rodas. Os valores de amortecimento correspondentes têm a letra C. O modelo numérico da suspensão é resolvido no tempo pelo método de Newmark, similar àquele usado em Mizushima, (2017), para a solução dos deslocamentos e rotações ao longo do tempo de um modelo de suspensão de ônibus. Maiores detalhes sobre o método

podem ser encontrados no trabalho mencionado.

O modelo numérico da suspensão foi validado mediante a comparação entre os resultados e valores obtidos empiricamente através de acelerômetros instalados em um veículo correspondente ao modelo, sendo as condições a que o veículo foi submetido similares à simulada. A instalação e aferição dos dados foram conforme a metodologia indicada na ISO 2361 - 1, 1997. Na Tabela 2 tem-se a comparação entre as acelerações obtidas através da simulação computacional e mediante experimento *in situ*, onde a_1 se refere à aceleração vertical no acento do motorista, a_8 é aceleração vertical no centro do eixo dianteiro, e a_{12} é aceleração vertical no centro do terceiro eixo. As variáveis com *máx* e *mín*, apontam para os valores máximos ou mínimos correspondentes.

Resultados	a_1rms	$a_1máx$	$a_1mín$	a_8rms	$a_8máx$	$a_8mín$	$a_{12}rms$	$a_{12}máx$	$a_{12}mín$
Numéricos	0.481	3.045	-2.477	0.414	1.919	-2.216	0.220	0.584	-1.287
Experimentais	0.332	3.282	-2.300	0.225	2.624	-1.833	0.196	0.566	-1.312

Tabela 2. Resultados obtidos empiricamente e através de simulação computacional utilizando o modelo de estudo.

3.2 Algoritmo de otimização baseado em enxame de partículas (PSO)

Problemas de otimização são comuns na engenharia. Dentre os algoritmos mais usados, duas grandes vertentes se destacam: os algoritmos heurísticos, mais robustos e computacionalmente custosos, e os determinísticos, menos robustos e mais rápidos. Os algoritmos heurísticos tem tomado destaque devido à natureza complexa presente na maior parte dos problemas de otimização de engenharia, uma vez que algoritmos determinísticos possuem dificuldade para lidar com problemas mal comportados.

O algoritmo usado para lidar com o problema foco deste trabalho é o PSO (*Particle Swarm Optimization*), proposto por Kennedy e Eberhart, (1995). O PSO se baseia no comportamento de animais sociais como pássaros e peixes, se apoiando no conceito de aprendizado social. As equações 1 e 2 descrevem a atualização da posição e velocidade das variáveis de projeto ao longo das iterações.

$$v_{i,j}^{k+1} = \chi[\omega v_i^k + \lambda_1 r_1 (xlb_{i,j}^k - x_{i,j}^k) + \lambda_2 r_2 (xgb_{i,j}^k - x_{i,j}^k)] \quad (1)$$

$$x_{i,j}^{k+1} = x_{i,j}^k + v_{i,j}^k \Delta t \quad (2)$$

onde, ω é o momento de inércia, $x_{i,j}^{k+1}$ é o valor na iteração k das variáveis de projeto j da partícula i , $xlb_{i,j}^k$ é o melhor conjunto de variáveis de projeto j encontrada

pela partícula i , $v_{i,j}^k$ é a velocidade atualizada da partícula i , $xbest_j^k$ é o melhor conjunto de variáveis de projeto encontrado por toda a população, r_1 e r_2 são valores aleatórios entre zero e um, λ_1 é o componente cognitivo individual, λ_2 é o componente cognitivo coletivo e Δt é o intervalo de tempo.

Como critério de parada, usou-se as distancias entre dois melhores globais respectivos, aliado a um cálculo baseado no coeficiente de variação das soluções. Quando ambos os critérios são satisfeitos, a convergência é assumida e o algoritmo de otimização finaliza as iterações.

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

Para classificar a vibração sobre o motorista do caminhão, usou-se a ISO 2631-1, 1997. A tabela 2 aponta os limites para a aceleração ponderada RMS (a_{rms}) sobre o assento do motorista. A equação 3 é usada para calcular a aceleração RMS (a_{rms}) em um intervalo de tempo $t_1 \leq t \leq t_2$.

$$a_{rms} = \sqrt{\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} [a(t)]^2 dt} \tag{3}$$

Para avaliar a aceleração para a saúde e para o conforto é indicado a passagem de um filtro sobre o valor da aceleração de forma a ressaltar frequências importantes que possam resultar em ressonância (e portanto dano) no corpo humano, assim como atenuar outras acelerações em frequências que não afetem a parte do corpo correspondente. Para a vibração vertical de pessoa sentada recebendo vibração pelas nádegas, a curva de ponderação W_k é a indicada. A aceleração RMS ponderada correspondente (a_{rms}) é obtida pela soma da multiplicação das acelerações RMS em cada banda de frequência pelos respectivos valores da curva de ponderação indicado na norma, e este deve ser o valor usado para comparativo da Tabela 3.

Conforto (ISO 2361-1, 1997)	
Não desconfortável	$\leq 0,315 \text{ m/s}^2$
Um pouco desconfortável	$0,315 \text{ m/s}^2 \text{ a } 0,63 \text{ m/s}^2$
Levemente desconfortável	$0,5 \text{ m/s}^2 \text{ a } 1 \text{ m/s}^2$
Desconfortável	$0,8 \text{ m/s}^2 \text{ a } 1,6 \text{ m/s}^2$
Muito desconfortável	$1,25 \text{ m/s}^2 \text{ a } 2,5 \text{ m/s}^2$
Extremamente desconfortável	$\geq 2,0 \text{ m/s}^2$

Tabela 3. Limites de aceleração para conforto. Adaptado da norma ISO 2631-1, 1997.

*valores implícitos para uma exposição diária de 8 h usando eq. B.1 da ISO 2631-1, 1997.

3.4 Método FORM (First Order Reliability Method)

O método FORM é usado para calcular a confiabilidade de um determinado sistema a partir de uma função de estado limite. O método aproxima a equação de estado limite à uma função linear. A linearização da equação de estado limite ocorre através de uma expansão em série de Taylor, onde a mesma é limitada aos termos de primeira ordem. A metodologia tem como base o pressuposto de que o ponto de projeto é o ponto sobre o domínio de falha com maior probabilidade de acontecer, assim promover a linearização da equação de estado limite nesse local minimizaria o erro cometido ao se calcular a probabilidade de falha para a equação, conforme Beck (2012) e Ang (2006).

Silva (2010) indica as principais etapas necessárias para implementação do método FORM, para variáveis independentes: Definição da equação de estado limite $g(x) = 0$, da média, e desvios das distribuições que descrevem as variáveis de X ; Definição de um ponto de projeto inicial; Determinação dos parâmetros médias, e desvios padrão equivalentes, no ponto de projeto x para cada variável aleatória X_i que não tenha distribuição normal; Transformação do ponto de projeto inicial para o espaço normalizado; Estimativa do índice de confiabilidade para a equação de estado limite no espaço normal pela distância Euclidiana da origem do sistema até o ponto atual; Cálculo do vetor de cossenos diretores; Determinação do novo ponto de projeto; Transformação do novo ponto de projeto para o espaço original; Repetição do procedimento a partir do item 5 até que o índice de confiabilidade, e x venham a convergir.

3.5 Índice de confiabilidade (β)

O parâmetro utilizado para medir o nível de segurança de um determinado sistema chama-se índice de confiabilidade, denotado por β . Ele está relacionado aproximadamente com a probabilidade de falha do sistema por $P_f = \phi(-\beta)$ e inversamente, $\beta = -\phi^{-1}(P_f)$ com ϕ a função acumulada Normal padrão. Valores elevados de β indicam probabilidade de falha menores, e valores de β mais baixos indicam maior probabilidade de falha. Uma interpretação geométrica pode ser atribuída ao índice de confiabilidade, sendo a mesma a menor distância da origem à equação de estado limite no espaço padronizado. Para isso aplica-se a transformação de Hasofer ao problema de confiabilidade inicial.

3.6 Função de estado limite (FEL)

A confiabilidade permite desenvolver critérios de projeto, avaliando se os riscos de falha são aceitavelmente pequenos. Tem-se assim que o problema *a priori* da confiabilidade é a relação existente entre a resistência R e a solicitação S , sendo que a probabilidade de falha P_f é definida como a probabilidade P da solicitação ser maior ou igual à resistência da estrutura. Além disso, a probabilidade de falha pode ser formulada através da função de estado limite $g(R, S) = R - S$ onde:

$$P_f = P[g(R, S) \leq 0] \quad (4)$$

De maneira geral, a função de estado limite estabelece uma fronteira, a qual separa o domínio de falha daquele que significaria segurança.

3.7 Perfil vertical de pista

A pista escolhida para ser usada na simulação consiste de um perfil liso de 250 metros com uma lombada de dimensões 1,5 m de comprimento e 0,06 m de altura, começando a partir de 20 metros da origem. A figura 3.4 ilustra as dimensões da lombada (extraídas da resolução N°600 de 24 de maio de 2016 para ondulações transversais em trechos urbanos), e a figura 3.5 mostra o perfil da pista para cada uma das seis trilhas dos pneus.

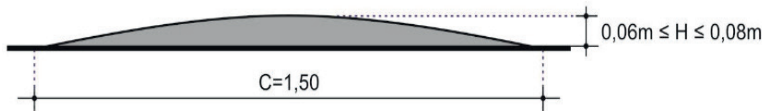
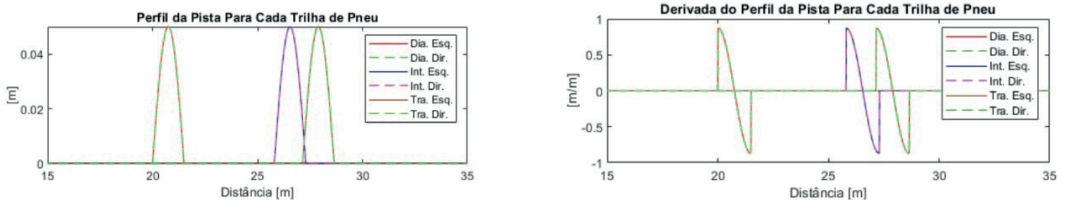


Figura 2. Lombada tipo B, extraída da resolução N°600 de 24 de maio de 2016 para ondulações transversais em trechos urbanos.



(a) (b)

Figura 3. (a) Perfil da pista para cada trilha de pneu com lombada, usada na simulação.

(b) Derivada do perfil de pista cada trilha de pneu.

4 | METODOLOGIA

A fim de reduzir o desconforto sobre o motorista do caminhão, o problema de otimização foi definido como a minimização da aceleração vertical ponderada no motorista do caminhão (a_{wrms}) sujeito à restrição do índice de confiabilidade, $\beta \geq 2$, e restringindo o espaço de busca das variáveis de projeto em 20% para mais e para menos a partir do valor nominal. As variáveis aleatórias consideradas no cálculo do FORM foram as massas do motorista e assento (M_s) e do baú do caminhão (M_b), onde os coeficientes de variação são $CV_{M_s} = 0,33$ e $CV_{M_b} = 0,15$ (lembrando que $CV = \sigma/\mu$), e a velocidade do veículo é de 30

km/h. Assim os problemas de otimização podem ser postos das seguintes formas:

1.º problema de otimização:

$$\text{Minimizar:} \quad f_1(x) = a_{wzrms} \quad (5)$$

$$\text{Sujeito a:} \quad x_i \in [0,80 \cdot x_{i,ref}; 1,20 \cdot x_{i,ref}] \text{ e } \beta \geq 2 \quad i = 1,2 \dots 12$$

onde $f(x)$ é a função objetivo, i se refere à variável de projeto e a_{wzrms} é a aceleração vertical RMS instantânea do motorista. As variáveis de projeto usadas foram as rigidezes e amortecimentos da suspensão e assento do motorista: rigidez do banco do motorista (K_s); as rigidezes verticais da suspensão dianteira esquerda e direita (K_1 e K_2); as rigidezes verticais da suspensão intermediária esquerda e direita (K_3 e K_4); as rigidezes verticais da suspensão traseira esquerda e direita (K_5 e K_6); o amortecimento do banco do motorista (C_s); os amortecimentos verticais da suspensão dianteira esquerda e direita (C_1 e C_2); os amortecimentos verticais da suspensão intermediária esquerda e direita (C_3 e C_4); e os amortecimentos verticais da suspensão traseira esquerda e direita (C_5 e C_6). As variáveis de projeto podem ser conferidas na Tabela 4 junto de seus respectivos valores nominais. É importante ressaltar que as variáveis de projeto esquerdas e direitas foram definidas como iguais para a otimização, resultando em um total de oito variáveis de projeto.

A função de estado limite (f_{el}) foi composta a partir da tabela 2, onde a aceleração ponderada RMS limite escolhida para falha é de $0,8 \text{ m/s}^2$, que corresponde à entrada no estado “desconfortável” segundo a norma ISO2631-1, 1997. A função de estado limite fica então definida como $f_{el} = 0,8 - a_{wzrms}$.

Um novo problema muito similar foi proposto em um segundo momento, onde a numa nova função objetivo foi escolhida, descrita na equação (6), ainda com restrição de confiabilidade para o conforto. Esta escolha da função objetivo se justifica pela redução da altura do centro de massa do veículo, aumentando a estabilidade e a dirigibilidade do caminhão. De maneira geral, reduzir o deslocamento relativo da roda para o eixo da suspensão é algo desejável, assim como manter o conforto do motorista.

Na figura 4 é apresentado um esquema do acoplamento entre os algoritmos usados na solução do primeiro problema proposto.

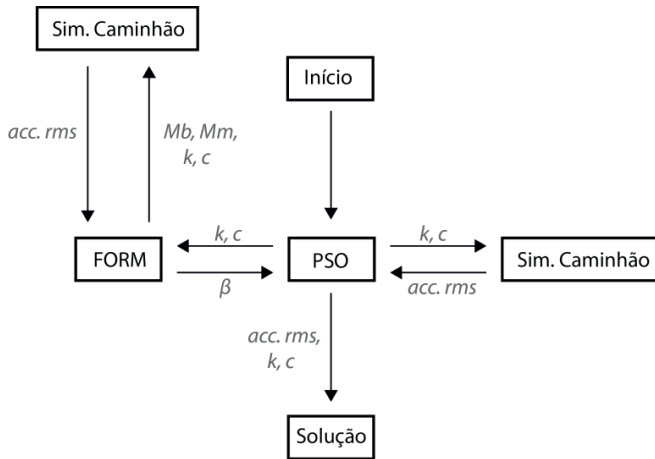


Figura 4. Esquema do acoplamento entre os algoritmos usados na solução do primeiro problema de otimização.

O segundo e terceiro problemas foram resolvidos de forma análoga. Na segunda otimização a função objetivo é minimizar o máximo deslocamento relativo de qualquer das rodas para o eixo da suspensão.

2.º problema de otimização:

$$\text{Minimizar: } f_2(x) = \max(\max(uw_j)) \quad j = 1, 2 \dots 6 \quad (6)$$

$$\text{Sujeito a: } x_i \in [0,80 \cdot x_{i,ref}; 1,20 \cdot x_{i,ref}] \text{ e } \beta \geq 2 \quad i = 1, 2 \dots 12$$

onde uw_j é o deslocamento relativo da roda para o eixo da suspensão e j é relacionado à roda do veículo. As demais variáveis são as mesmas usadas no problema anterior.

Em um terceiro problema, a função objetivo usada foi o máximo deslocamento relativo entre a suspensão e a carroceria de qualquer das rodas, como indicado na equação (7).

3.º problema de otimização:

$$\text{Minimizar: } f_3(x) = \max(\max(u_j)) \quad j = 1, 2 \dots 6 \quad (7)$$

$$\text{Sujeito a: } x_i \in [0,80 \cdot x_{i,ref}; 1,20 \cdot x_{i,ref}] \text{ e } \beta \geq 2 \quad i = 1, 2 \dots 12$$

onde u_j é o deslocamento relativo entre a suspensão e a carroceria. Os parâmetros usados no PSO foram: $Tol = 1 \times 10^{-6}$, $\omega = 0,8$, $\lambda_1 = 2,01$, $\lambda_2 = 2,01$, $alpha = 0,90$, $alpha_t = 0,2$, onde Tol controla a convergência do algoritmo, ω é o fator de momento das partículas, λ_1 é a componente cognitiva individual, λ_2 é a componente cognitiva coletiva, $alpha$ é o fator de redução de mutação, e $alpha_t$ é o fator de chance de

mutação. As variáveis α e α_i não são presentes no PSO tradicional, mas foram usadas nessa versão para melhorar o desempenho do algoritmo, gerando aleatorização do movimento das partículas principalmente na fase inicial da busca.

5 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

O resultado das otimizações estão presentes nas Tabelas 4 e 5 e Figura 7, juntamente com os valores originais das variáveis de projeto para comparação. Lembrando que a primeira otimização se refere à aceleração RMS no assento do motorista (a_{wzrms}), a segunda otimização se refere ao deslocamento máximo relativo da roda para o eixo da suspensão (u_{wj}), e a terceira otimização se refere ao deslocamento máximo relativo entre a suspensão e a carroceria (u_j), todas com restrição para a confiabilidade de conforto, $\beta \geq 2$, e $f_{el} = 0,8 - a_{wzrms}$.

PARÂMETROS	RIGIDEZES			
	K_s [N/m]	k_1ek_2 [N/m]	k_3ek_4 [N/m]	k_5ek_6 [N/m]
Nominal	10000	102000	209000	209000
Otimizado 1	8000 *	81600 *	167200 *	167200 *
Otimizado 2	8613,7	122400**	250800 **	250800 **
Otimizado 3	10172	81600 *	250800 **	250800 **
Ot. 1./Nomin.	0,8 *	0,8 *	0,8 *	0,8 *
Ot. 2./Nomin.	0,86137	1,2 **	1,2 **	1,2 **
Ot. 3./Nomin.	1,01720	0,8 *	1,2 **	1,2 **
PARÂMETROS	AMORTECIMENTOS			
	c_s [Ns/m]	c_1ec_2 [Ns/m]	c_3ec_4 [Ns/m]	c_5ec_6 [Ns/m]
Nominal	200	7028,5	14091	14091
Otimizado 1	240 **	8434,2 **	11272,8 *	11272,8 *
Otimizado 2	240 **	5622,8 *	16909,2 **	16909,2 **
Otimizado 3	240 **	8434,2 **	16909,2 **	16909,2 **
Ot. 1./Nomin.	1,2 **	1,2 **	0,8 *	0,8 *
Ot. 2./Nomin.	1,2 **	0,8 *	1,2 **	1,2 **
Ot. 3./Nomin.	1,2 **	1,2 **	1,2 **	1,2 **

Tabela 4. Resultado das otimizações e variáveis de projeto nominais e otimizadas do modelo numérico da suspensão do caminhão para os três problemas propostos.

- * denota valores incidentes sobre o mínimo do espaço de busca das variáveis de projeto.
- ** denota valores incidentes sobre o máximo do espaço de busca das variáveis de projeto.

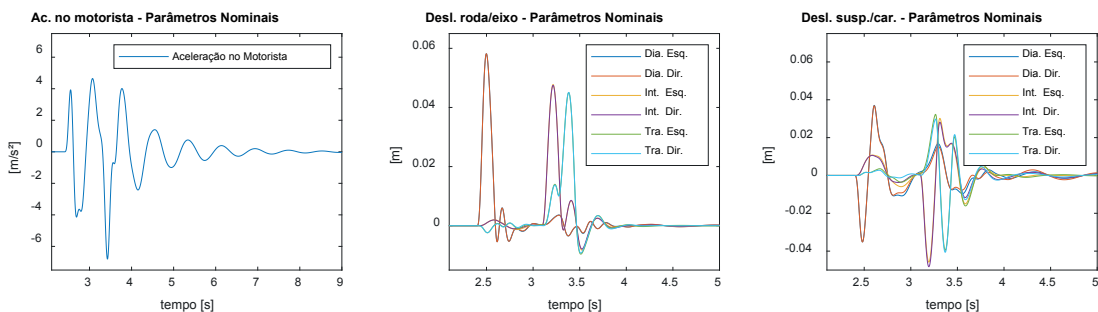
	$a_{wrms}[m/s^2]$	$u_w[m]$	$u[m]$	$\beta[-]$
<i>Nominal</i>	0.5810	0.0582	0.0370	1.7670
<i>Otimizado 1</i>	0.3907	0.0593	0.0348	4.3626
<i>Otimizado 2</i>	0.5338	0.0570	0.0395	2,0000
<i>Otimizado 3</i>	0.5669	0.0593	0.0341	2,0000
<i>Ot. 1/Nominal</i>	0,672461	1,0189	0,940541	2,46893
<i>Ot. 2/Nominal</i>	0,918761	0,979381	1,067568	1,131862
<i>Ot. 3/Nominal</i>	0,975731	1,0189	0,921622	1,131862

Tabela 5. Resultado da otimização em comparação com os valores nominais do modelo numérico da suspensão do caminhão.

Na primeira otimização, a aceleração RMS no banco do motorista, a_{wrms} , foi reduzida em aproximadamente 33% com relação ao seu valor nominal. O índice de confiabilidade β subiu de 1,76 para 4,36, indicando que o projeto está mais confiável.

Note, da Tabela 4 e 5, que a segunda e terceira otimizações tornaram ativas a restrição do índice de confiabilidade ($\beta = 2$). De maneira geral, espaços de trabalho da suspensão são inversamente proporcionais à aceleração no motorista (Sharp e Crolla, 1987). Este comportamento é bem conhecido pela bibliografia, e a ativação da restrição do índice de confiabilidade β (que é inversamente proporcional à aceleração no motorista), é um subproduto deste comportamento.

Na segunda e terceira otimização, as variáveis de projeto tenderam quase todas para seu limite superior, indicando que os parâmetros máximos beneficiam a redução do deslocamento relativo da roda para o eixo da suspensão. Este comportamento é compreensível, uma vez que maiores rigidezes e amortecimentos resultam em uma menor deflexão da suspensão.



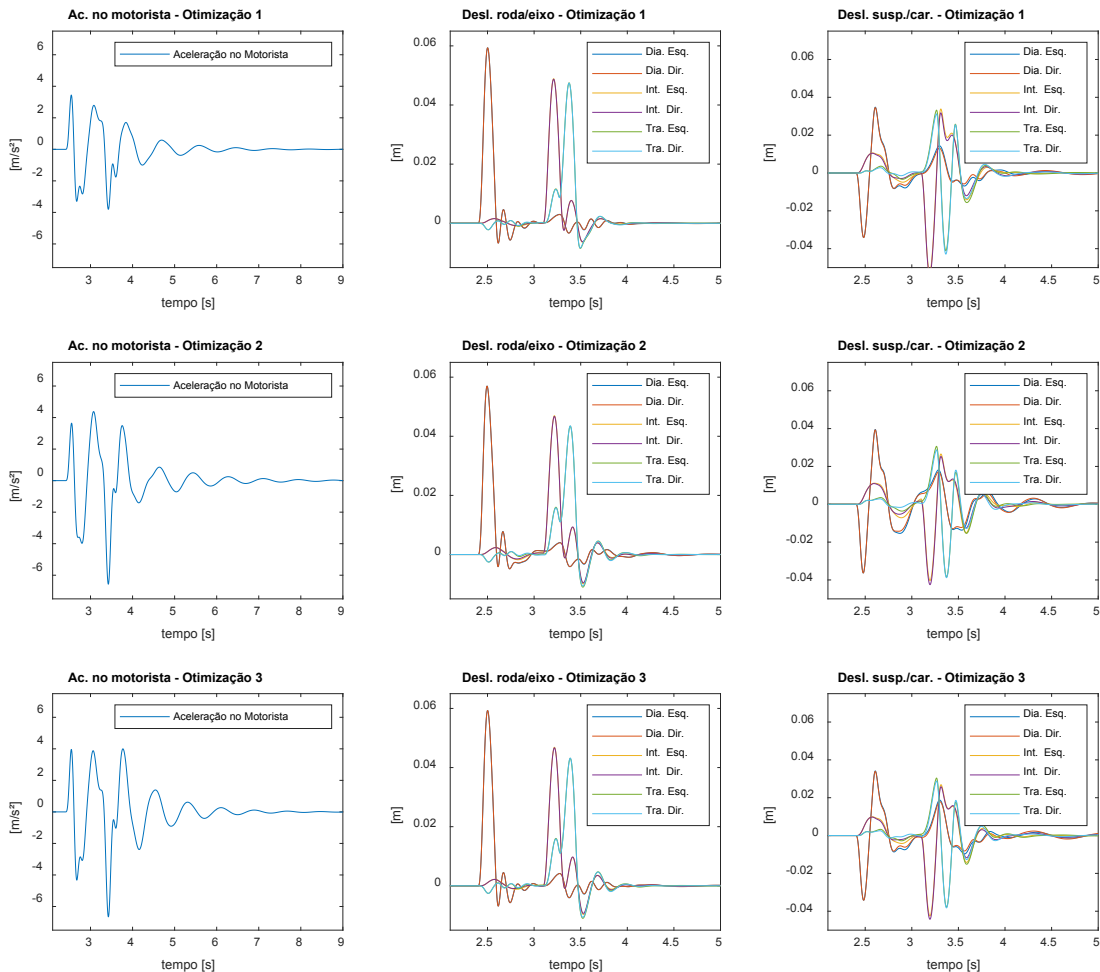


Figura 7. Comportamento dinâmico do modelo da suspensão com parâmetros nominais, e otimizados, para cada uma das funções objetivo.

Por fim, um breve estudo usando o método de Monte-Carlo (Figuras 5 e 6) apontou a influência de cada variável de projeto no índice de confiabilidade β , indicando que algumas variáveis de projeto possuem mais influência sobre o índice de confiabilidade. Para as Figuras 5 e 6, 117000 amostras foram aplicadas ao algoritmo FORM com a mesma função de estado limite usada anteriormente ($f_{el} = 0,8 - a_{zrms}$).

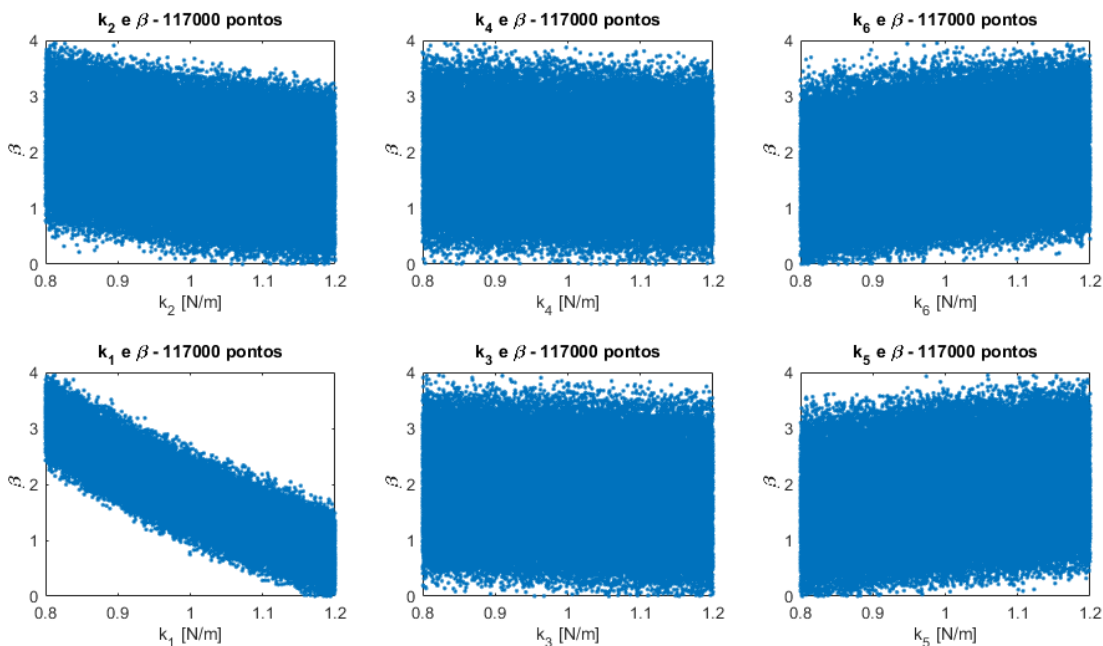


Figura 5. Tendência da influência das variáveis de projeto no índice de confiabilidade β - rigidezes.

As variáveis foram consideradas independentes entre os lados do veículo (variáveis da direita independentes das variáveis da esquerda do caminhão). Note que os parâmetros do assento do motorista k_s e c_s não foram incluídos nessa etapa, uma vez que pode ser inferido das otimizações que estas são as variáveis mais influentes para o índice β . É importante ressaltar que o método de Monte-Carlo não foi usado neste estudo para calcular o índice de confiabilidade, mas sim, para expor as tendências de comportamento entre β e cada variável de projeto. A Figura 6(a) mostra o comportamento entre as funções objetivo β e uw , e a Figura 6(b) serve de referência, indicando qual deveria ser o comportamento entre duas variáveis completamente independentes entre si. As figuras que ilustram a influência do amortecimento foram omitidas, pois não indicaram grandes padrões de tendência.

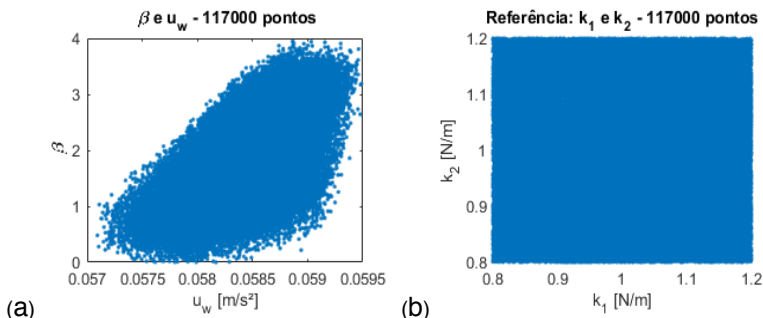


Figura 6 (a). Relação entre β e u_w . Figura (b). Relação entre β e u_w . Figura (c). Referência para duas variáveis aleatórias completamente não correlacionadas entre si.

6 | CONCLUSÃO

Nota-se da tabela 5 que houve uma redução nas acelerações RMS no banco do motorista em cerca de 30% na primeira otimização. O índice de confiabilidade, β , subiu de 2,00 para 4,36, um acréscimo de 118% a partir do valor de referência, indicando que o veículo se encontra agora em uma região muito mais “segura” com relação ao conforto. É importante ressaltar que o método FORM foi bastante custoso durante o processo da otimização, pois para cada cálculo do índice de confiabilidade a função objetivo era chamada cerca de 6 vezes. Todavia, como o índice de confiabilidade foi usado apenas como condição de restrição para o problema de otimização, esta carga computacional foi atenuada: o algoritmo FORM só foi executado quando o ótimo local da partícula ou o global do enxame foi atualizado, pois as demais partículas-soluções já seriam descartadas independente da violação ou não-violação das restrições.

Para a segunda e terceira otimização, a restrição permaneceu ativa com . A segunda otimização gerou uma redução no deslocamento relativo da roda para o eixo da suspensão e um aumento na aceleração RMS do motorista. Este comportamento era esperado, uma vez que a redução da deflexão dos mecanismos da suspensão exige valores de rigidez e amortecimento mais altos, acarretando em um aumento da aceleração RMS no motorista. Esse comportamento pode ser apontado também na simulação com Monte Carlo na figura 6(a), pois não existem pontos-soluções com altos valores de β e u_w simultaneamente. É possível notar na tabela 5, que a otimização 2 e 3 empurraram quase todas as variáveis para os valores máximos a fim de reduzir a deflexão na suspensão.

Dos testes realizados com Monte-Carlo, é possível inferir que a variável de rigidez frontal esquerda, K_{fL} , é mais influente que as demais rigidezes sobre a resposta do modelo da suspensão, gerando nos gráficos da Figura 5 padrões de tendência bem proeminentes. Tal diferença entre a rigidez direita e esquerda é resultado específico da geometria assimétrica do veículo com relação ao assento do motorista, que está posicionado à direita do caminhão.

Conclui-se que o método FORM, a pesar de ser um método aproximado para o cálculo da confiabilidade, pode ser aplicado com êxito à otimização do design da suspensão de veículos, neste caso um caminhão baú. Para trabalhos futuros, deixa-se a sugestão de aplicar o FORM aos deslocamentos roda-suspensão e suspensão-carroceria, também como condições de restrição, e em outros modelos de veículos.

REFERÊNCIAS

ANG, A.H.-S., “**Probability Concepts in Engineering: Emphasis on Applications to Civil and Environmental Engineering**”. Wiley; 2ª Ed. 2006, 432p.

ALVES, B.S., “**Otimização Baseada em Confiabilidade de Pórticos de Concreto Armado**”, 2018. Dissertação de Mestrado- Universidade Federal de Pernambuco, 2018.

BECK, A.T. **Curso de Confiabilidade Estrutural** (meio eletrônico). São Carlos; 2012. Departamento de Engenharia de Estruturas - Universidade de São Paulo.

ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO CAMINHÃO VW CONSTELLATION 24.280. ACESSADO EM: <HTTPS://WWW.SANTAEMILIAMAN.COM.BR/MEDIA/UPLOAD/NOVOS/PRODUTO/CONSTELLATION-24-280-3.PDF>, 7JUL2020.

GOMES, W.J.S., “**Estudo do efeito de incertezas na otimização estrutural**”. 2010. Dissertação -Escola de Engenharia de São Carlos.

GRUJICIC, M. et al. “**Reliability Based Design Optimization for Durability of Ground Vehicle Suspension System Components**”. Journal of Materials Engineering and Performance 91(3):301-313. March 2009. DOI: 10.1007/s11665-009-9482-y.

ISO 2631-1:1997 Mechanical vibration and shock-evaluation of human exposure to whole-body vibration. ISO/TC108/SC4, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 1997.

KENNEDY, J.; EBERHART, E. “**Particle swarm optimization,**” Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks, Perth, WA, Australia, 1995, pp. 1942-1948 vol.4, doi: 10.1109/ICNN.1995.488968.

LI, B., “**3D dynamic modeling and simulation of a multidegree of freedom 3 axle rigid truck with trailing arm bogie suspension**”. M.Sc.Thesis, School of Mechanical, Material and Mechatronic Engineering, University of Wollongong. 2006.

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.

PINO, A.B.T., “**Otimização Baseada em Confiabilidade de Estruturas Treliçadas**”, 2017. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Civil)- Faculdade de Tecnologia, e Ciências Sociais Aplicadas, Brasília, 2017.

Resolução Nº 600 de 24 de maio de 2016 para ondulações transversais. Acessado em: <https://infraestrutura.gov.br/images/Resolucoes/Resolucao6002016_new.pdf>, 7 jul. 2020.

SAKAMOTO, B.S., “**Análise de Confiabilidade Estrutural Utilizando o Método FORM com Múltiplos Modos de Falha para Edifício Alto Submetido à Ação do Vento**”, 2016.Dissertação de Mestrado- Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2016.

SILVA, M. S.“**Introducción a la confiabilidad y evaluación de riesgos: teoría y aplicaciones en ingeniería**”. Bogotá: Universidad de Los Andes, 2010.

SHARP, R.S.,CROLLA, D.A. (1987).“**Road Vehicle Suspension System Design - a review**”. Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility, 16(3):167-192. DOI: 10.1080/00423118708968877.

FANG, J., GAO, Y., SUN, G., LI, Q. “**Multiobjective reliability-based optimization for design of a vehicle door**”. Finite Elements in Analysis and Design. 2013; 67:13-21. <https://doi.org/10.1016/j.finel.2012.11.007>

LEE, U., KANG, N., LEE, I. “**Reliability-Based Design Optimization (RBDO) for Electric Vehicle Market Systems**”. Conference: ASME 2017 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. <https://doi.org/10.1115/DETC2017-68045>

ZHANG, Y. “**Reliability-based robust design optimization of vehicle components, Part I: Theory**”. Front. Mech. Eng. 10, 138–144 (2015). <https://doi.org/10.1007/s11465-015-0333-2>

YANG, R.-J. “**On reliability-based optimization methods for automotive structures**”. International Journal of Materials and Product Technology, 25(1/2/3):3 – 26.<https://doi.org/10.1504/IJMPT.2006.008271>

ÍNDICE REMISSIVO

A

Aços 10, 38, 39, 40, 46

Algoritmo Genético 11, 109, 111, 112, 174

Arduino 11, 79, 80, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 172, 175, 190, 192

C

Campo de temperatura 92, 93

CitationID 112, 116

Citationitems 168

Confiabilidade 10, 20, 21, 22, 27, 28, 29, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 79

Controle Adaptativo 165

Convecção Forçada 92, 93

E

Elementos Finitos 10, 1, 2, 6, 21, 38, 39, 45, 46, 47, 48, 50, 55, 128, 129, 131, 137

Energia renovável 67

Energia Solar 67, 79, 90, 91

EPI's 193, 196, 198

Escoamento bifásico 12, 138, 139, 140, 148

Escoamento Turbulento 92, 93

Estacionamento Autônomo 181

F

Fadiga 10, 21, 38, 39, 40, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 125

Fluido-Estrutura 57, 124

Fração de vazio 12, 138, 139, 140, 142, 145, 146, 147, 148, 149

Frequência 6, 9, 10, 12, 14, 15, 16, 21, 26, 48, 49, 52, 116, 125, 133, 135, 140, 142, 143, 145, 146

Função de transferência 9, 12, 14, 15

G

Graus de liberdade 9, 11, 23

I

Impressão 3D 193, 196

Instrumentação 80, 91, 144, 190

L

Lógica Fuzzy 165

M

Manipulador Flexível 1, 2

Manipulador Paralelo 10, 1, 2, 3, 6

Matriz 128, 129, 130, 131, 135, 166, 170, 187, 199, 200, 201, 203, 205

Modelo Multicorpos 1, 2, 6

N

Nusselt 92, 93, 99, 100, 101, 102, 103, 106

O

Otimização 9, 10, 11, 20, 21, 22, 25, 26, 28, 29, 30, 31, 32, 35, 36, 48, 49, 55, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 116, 118, 119, 120, 121, 170, 175, 177, 192

P

PET 193, 194, 195, 198

Piranômetro 80, 81

Projeto mecatrônico 181

Protótipos 39, 165, 167, 172, 177

R

Radiação térmica 80, 82

Radiômetro 11, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 88, 89, 90, 91

Redes Neurais Artificiais 164, 165, 166, 168

S

Seleção 109, 111, 112, 116, 117, 118, 119, 120, 121, 170, 171, 176, 185

Sensor capacitivo 12, 138, 140, 145

Simulação 9, 2, 3, 6, 17, 20, 25, 28, 35, 38, 40, 43, 44, 45, 46, 135, 167, 169

Sistemas Computacionais Inteligentes 12, 164, 168

Sistemas Dinâmicos 12, 124, 164, 167

Sistemas Térmicos 109, 111

Stress 199

Suspensão 10, 9, 10, 11, 13, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 29, 30, 31, 32, 33, 35, 36, 184

T

Tensão 2, 3, 42, 43, 44, 45, 142, 144, 145, 146, 147, 148, 187, 199, 200, 201, 203, 204

Tumor 199, 200, 201, 202, 203, 204, 205

V

Vibração 1, 2, 5, 9, 10, 13, 16, 17, 20, 21, 26, 50, 133

Violão 10, 48, 49, 50, 51, 54

COLEÇÃO **DESAFIOS** DAS **ENGENHARIAS:**

ENGENHARIA MECÂNICA



www.atenaeditora.com.br



contato@atenaeditora.com.br



[@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)



[facebook.com/atenaeditora.com.br](https://www.facebook.com/atenaeditora.com.br)

Atena
Editora

Ano 2021

COLEÇÃO **DESAFIOS** DAS **ENGENHARIAS:**

ENGENHARIA MECÂNICA



www.atenaeditora.com.br



contato@atenaeditora.com.br



[@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)



facebook.com/atenaeditora.com.br