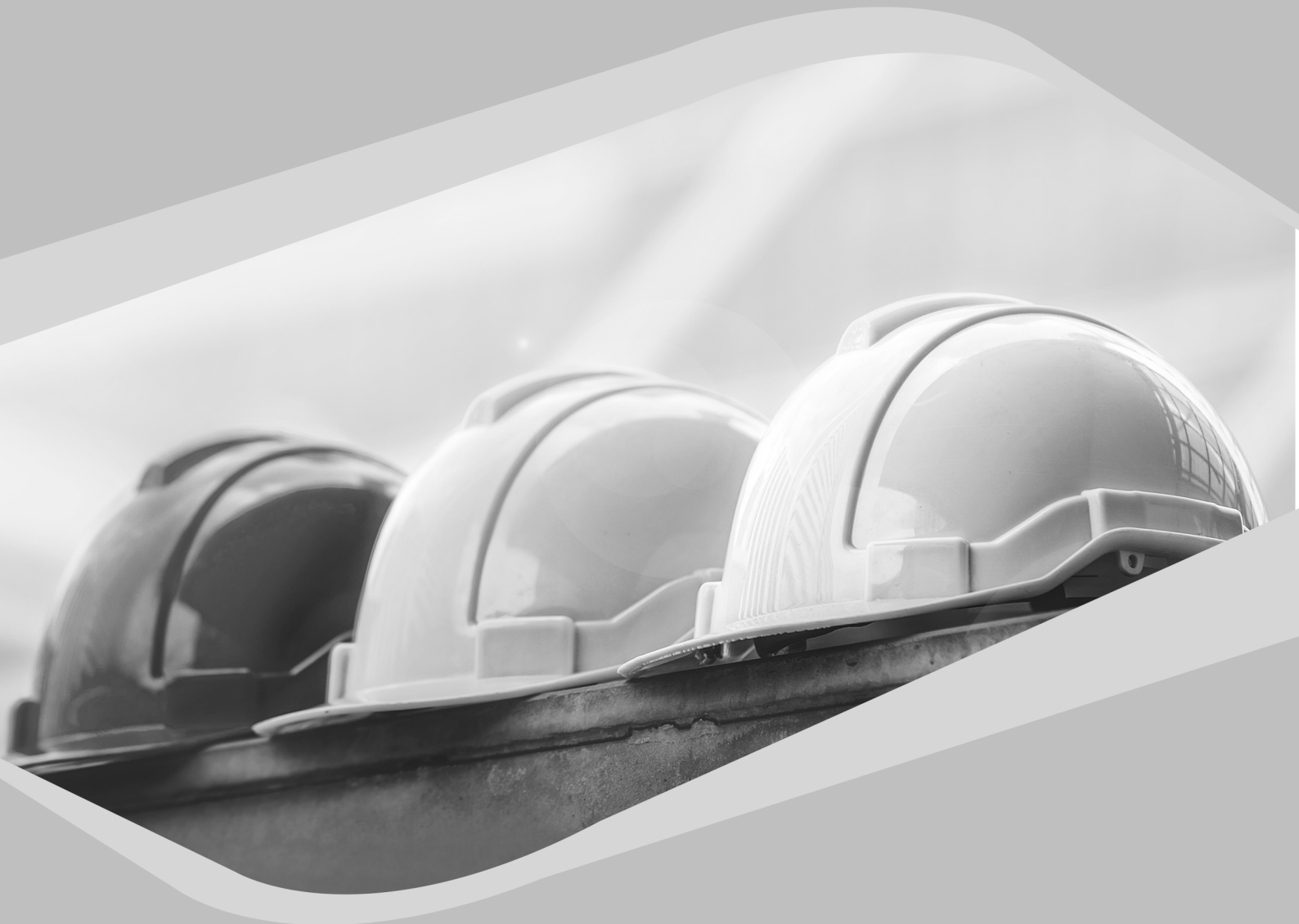


**FRANCIELE BRAGA MACHADO TULLIO
LUCIO MAURO BRAGA MACHADO
(ORGANIZADORES)**



**RESULTADOS DAS PESQUISAS
E INOVAÇÕES NA ÁREA
DAS ENGENHARIAS**

**FRANCIELE BRAGA MACHADO TULLIO
LUCIO MAURO BRAGA MACHADO
(ORGANIZADORES)**



**RESULTADOS DAS PESQUISAS
E INOVAÇÕES NA ÁREA
DAS ENGENHARIAS**

2020 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do Texto © 2020 Os autores

Copyright da Edição © 2020 Atena Editora

Editora Chefe: Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Diagramação: Geraldo Alves

Edição de Arte: Lorena Prestes

Revisão: Os Autores



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição *Creative Commons*. Atribuição 4.0 Internacional (CC BY 4.0).

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores. 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.

Conselho Editorial

Ciências Humanas e Sociais Aplicadas

Profª Drª Adriana Demite Stephani – Universidade Federal do Tocantins

Prof. Dr. Álvaro Augusto de Borba Barreto – Universidade Federal de Pelotas

Prof. Dr. Alexandre Jose Schumacher – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso

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. Carlos Antonio de Souza Moraes – Universidade Federal Fluminense

Prof. Dr. Constantino Ribeiro de Oliveira Junior – Universidade Estadual de Ponta Grossa

Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa

Profª Drª Denise Rocha – Universidade Federal do Ceará

Prof. Dr. Deyvison de Lima Oliveira – Universidade Federal de Rondônia

Prof. Dr. Edvaldo Antunes de Farias – Universidade Estácio de Sá

Prof. Dr. Eloi Martins Senhora – Universidade Federal de Roraima

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 Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionale delle Figlie di Maria Ausiliatrice

Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense

Profª Drª Keyla Christina Almeida Portela – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Mato Grosso

Profª Drª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins

Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte

Prof. Dr. Marcelo Pereira da Silva – Universidade Federal do Maranhão

Profª Drª Miranilde Oliveira Neves – Instituto de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará

Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa

Profª Drª Rita de Cássia da Silva Oliveira – Universidade Estadual de Ponta Grossa

Profª Drª Sandra Regina Gardacho Pietrobon – Universidade Estadual do Centro-Oeste

Profª Drª Sheila Marta Carregosa Rocha – Universidade do Estado da Bahia

Prof. Dr. Rui Maia Diamantino – Universidade Salvador

Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará

Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande

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. Antonio Pasqualetto – Pontifícia Universidade Católica de Goiás

Profª Drª Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná

Profª Drª 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
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Prof. Dr. Júlio César Ribeiro – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Profª Drª Lina Raquel Santos Araújo – Universidade Estadual do Ceará
Prof. Dr. Pedro Manuel Villa – Universidade Federal de Viçosa
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará
Profª Drª 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
Prof. Dr. Edson da Silva – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri
Profª Drª Eleuza Rodrigues Machado – Faculdade Anhanguera de Brasília
Profª Drª Elane Schwinden Prudêncio – Universidade Federal de Santa Catarina
Prof. Dr. Ferlando Lima Santos – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria
Prof. Dr. Igor Luiz Vieira de Lima Santos – Universidade Federal de Campina Grande
Prof. Dr. José Max Barbosa de Oliveira Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
Profª Drª Magnólia de Araújo Campos – Universidade Federal de Campina Grande
Profª Drª Mylena Andréa Oliveira Torres – Universidade Ceuma
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federaci do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Paulo Inada – Universidade Estadual de Maringá
Profª Drª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande

Ciências Exatas e da Terra e Engenharias

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto
Prof. Dr. Alexandre Leite dos Santos Silva – Universidade Federal do Piauí
Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás
Profª Drª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará
Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande
Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá
Profª Drª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

Conselho Técnico Científico

Prof. Msc. Abrãao Carvalho Nogueira – Universidade Federal do Espírito Santo
Prof. Msc. Adalberto Zorzo – Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza
Prof. Dr. Adailson Wagner Sousa de Vasconcelos – Ordem dos Advogados do Brasil/Seccional Paraíba
Prof. Msc. André Flávio Gonçalves Silva – Universidade Federal do Maranhão
Profª Drª Andreza Lopes – Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento Acadêmico
Profª Msc. Bianca Camargo Martins – UniCesumar
Prof. Msc. Carlos Antônio dos Santos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Msc. Cláudia de Araújo Marques – Faculdade de Música do Espírito Santo
Prof. Msc. Daniel da Silva Miranda – Universidade Federal do Pará
Profª Msc. Dayane de Melo Barros – Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Edwaldo Costa – Marinha do Brasil
 Prof. Msc. Eliel Constantino da Silva – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita
 Prof. Msc. Gevair Campos – Instituto Mineiro de Agropecuária
 Prof. Msc. Guilherme Renato Gomes – Universidade Norte do Paraná
 Prof^a Msc. Jaqueline Oliveira Rezende – Universidade Federal de Uberlândia
 Prof. Msc. José Messias Ribeiro Júnior – Instituto Federal de Educação Tecnológica de Pernambuco
 Prof. Msc. Leonardo Tullio – Universidade Estadual de Ponta Grossa
 Prof^a Msc. Lilian Coelho de Freitas – Instituto Federal do Pará
 Prof^a Msc. Liliani Aparecida Sereno Fontes de Medeiros – Consórcio CEDERJ
 Prof^a Dr^a Lívia do Carmo Silva – Universidade Federal de Goiás
 Prof. Msc. Luis Henrique Almeida Castro – Universidade Federal da Grande Dourados
 Prof. Msc. Luan Vinicius Bernardelli – Universidade Estadual de Maringá
 Prof. Msc. Rafael Henrique Silva – Hospital Universitário da Universidade Federal da Grande Dourados
 Prof^a Msc. Renata Luciane Polsaque Young Blood – UniSecal
 Prof^a Msc. Solange Aparecida de Souza Monteiro – Instituto Federal de São Paulo
 Prof. Dr. Welleson Feitosa Gazel – Universidade Paulista

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
 (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)**

R436 Resultados das pesquisas e inovações na área das engenharias [recurso eletrônico] / Organizadores Franciele Braga Machado Tullio, Lucio Mauro Braga Machado. – Ponta Grossa, PR: Atena, 2020.

Formato: PDF
 Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader
 Modo de acesso: World Wide Web
 Inclui bibliografia
 ISBN 978-65-86002-21-8
 DOI 10.22533/at.ed.218200303

1. Engenharia – Pesquisa – Brasil. 2. Inovações tecnológicas.
 3. Tecnologia. I. Tullio, Franciele Braga Machado. II. Machado, Lucio Mauro Braga.

CDD 658.5

Elaborado por Maurício Amormino Júnior | CRB6/2422

Atena Editora
 Ponta Grossa – Paraná - Brasil
www.atenaeditora.com.br
contato@atenaeditora.com.br

APRESENTAÇÃO

A obra “Resultados das Pesquisas e Inovações na Área das Engenharias” contempla dezoito capítulos em que os autores abordam as mais recentes pesquisas e inovações aplicadas nas mais diversas áreas da engenharia.

A constante transformação que a sociedade vem sofrendo é produto de um trabalho de desenvolvimento de pesquisas e tecnologia que aplicadas se tornam inovação.

O estudo sobre materiais e seu comportamento auxiliam na compreensão sobre seu uso em estruturas e eventualmente podem determinar o aparecimento ou não de patologias.

As pesquisas sobre a utilização de ferramentas computacionais permitem o aprimoramento da gestão de diversas atividades e processos de produção.

São abordadas também nessa obra as pesquisas sobre a forma de ensinar, utilizando as tecnologias em favor do processo de ensino e aprendizagem.

Diante disso, esperamos que esta obra instigue o leitor a desenvolver ainda mais pesquisas, auxiliando na constante transformação tecnológica que o mundo vem sofrendo, visando a melhoria da qualidade de vida na sociedade. Boa leitura!

Franciele Braga Machado Tullio
Lucio Mauro Braga Machado

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| CAPÍTULO 1 | 1 |
| ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE JUNTAS SOLDADAS DISSIMILARES NA PROPAGAÇÃO DE TRINCAS | |
| Daniel Nicolau Lima Alves Marcelo Cavalcanti Rodrigues José Gonçalves de Almeida | |
| DOI 10.22533/at.ed.2182003031 | |
| CAPÍTULO 2 | 13 |
| ANÁLISE DE ÍONS DE CLORETO E SUA INFLUÊNCIA NO PROCESSO DE ENVELHECIMENTO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO | |
| Ana Paula dos Santos Pereira Danielle Cristina dos Santos Lisboa Lucas Nadler Rocha Alberto Nunes Rangel Claudemir Gomes de Santana Renata Medeiros Lobo Müller | |
| DOI 10.22533/at.ed.2182003032 | |
| CAPÍTULO 3 | 25 |
| ANÁLISE DO SISTEMA CONSTRUTIVO E SEUS MATERIAIS CONSTITUINTES COM ENFÂSE NO AÇO COMO SOLUÇÃO PARA REFORÇOS ESTRUTURAIS | |
| Marcos Bressan Guimarães Vinícius Marcelo de Oliveira Maicá Diorges Carlos Lopes Rafael Aésio de Oliveira Zaltron Arthur Baggio Pietczak Bianca Milena Girardi Bruna Carolina Jachinski | |
| DOI 10.22533/at.ed.2182003033 | |
| CAPÍTULO 4 | 38 |
| UTILIZAÇÃO DE SIG NA GESTÃO DOS IMPACTOS DA ÁGUA RESIDUAL DA ETE NO MUNICÍPIO DE CANDEIAS – BAHIA | |
| Gisa Maria Gomes de Barros Almeida. Helder Guimarães Aragão. Rodrigo Alves Santos. | |
| DOI 10.22533/at.ed.2182003034 | |
| CAPÍTULO 5 | 47 |
| AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE INSTABILIDADE GLOBAL EM EDIFÍCIOS DE MÚLTIPLOS PAVIMENTOS EM CONCRETO ARMADO COM INCLUSÃO DE NÚCLEOS RÍGIDOS | |
| Thadeu Ribas Lugarini Ana Carolina Virmond Portela Giovannetti | |
| DOI 10.22533/at.ed.2182003035 | |

| | |
|---|------------|
| CAPÍTULO 6 | 58 |
| APLICAÇÃO DAS FERRAMENTAS BIM NO ORÇAMENTO DE OBRA - ESTUDO DE CASO: EDIFÍCIO DASOS | |
| Susan Pessini Sato | |
| Leonardo Padoan dos Santos | |
| Bruno Pscheidt Cenovicz | |
| DOI 10.22533/at.ed.2182003036 | |
| CAPÍTULO 7 | 69 |
| LOW-COST SUNLIGHT CONCENTRATORS TO IMPROVE HEAT TRANSFER DURING WATER SOLAR DISINFECTION | |
| Bruno Ramos Brum | |
| Rossean Golin | |
| Zoraidy Marques de Lima | |
| Danila Soares Caixeta | |
| Eduardo Beraldo de Moraes | |
| DOI 10.22533/at.ed.2182003037 | |
| CAPÍTULO 8 | 81 |
| ESTUDOCOMPARATIVOUSANDODIFERENTESRESINASPARADETERMINAÇÃO DE ISÓTOPOS DE TÓRIO | |
| Mychelle Munyck Linhares Rosa | |
| Maria Helena Tirollo Taddei | |
| Luan Teixeira Vieira Cheberle | |
| Paulo Sergio Cardoso da Silva | |
| Vera Akiko Maihara | |
| DOI 10.22533/at.ed.2182003038 | |
| CAPÍTULO 9 | 88 |
| DESENVOLVIMENTO EM LABORATÓRIO DE UM TUBO DE VENTURI ACOPLADO A UM RESERVATÓRIO PARA MEDIÇÃO DE PRESSÃO, VELOCIDADE E VAZÃO DE FLUIDOS | |
| Joilson Bentes da Silva filho | |
| Adalberto Gomes de Miranda | |
| José Costa de Macêdo Neto | |
| DOI 10.22533/at.ed.2182003039 | |
| CAPÍTULO 10 | 96 |
| PROPOSTADEDESIGNDOCOMPONENTETANQUEMODULARDECOMBUSTÍVEL PARA AERONAVE AS 350 ESQUILO | |
| Abilio Augusto Corrêa | |
| Daniel Brogini de Assis | |
| DOI 10.22533/at.ed.21820030310 | |
| CAPÍTULO 11 | 107 |
| OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE UMA MICROEMPRESA DE DOCES ARTESANAIS DA AMAZÔNIA UTILIZANDO O PDCA | |
| Karla Josiane de Lima Baia | |
| Rita de Cássia Ferreira Xavier | |
| Maria Beatriz Costa de Souza | |
| David Barbosa de Alencar | |
| DOI 10.22533/at.ed.21820030311 | |

| | |
|--|------------|
| CAPÍTULO 12 | 118 |
| AUDITORIA INTERNA COMO PROVIMENTO À GESTÃO DA QUALIDADE: ESTUDO DE CASO EM UMA INDÚSTRIA TÊXTIL | |
| Phelippe Moura da Silva | |
| DOI 10.22533/at.ed.21820030312 | |
| CAPÍTULO 13 | 125 |
| APLICAÇÕES DE REDES DE SENSORES SEM FIO | |
| Arthur M. Barbosa | |
| Paulo Fernandes da Silva Júnior | |
| Ewaldo Eder Carvalho Santana | |
| Marcos Erike Silva Santos | |
| Elder Eldervitch Carneiro de Oliveira | |
| Pedro Carlos de Assis Júnior | |
| Marcelo da Silva Vieira | |
| Rodrigo César Fonseca da Silva | |
| DOI 10.22533/at.ed.21820030313 | |
| CAPÍTULO 14 | 145 |
| A IMPLANTAÇÃO DE UM SISTEMA FÉRREO “CAXIAS DO SUL – PORTO DO RIO GRANDE”: UM ESTUDO DE PERSPECTIVA ECONÔMICO-LOGÍSTICO NO ESCOAMENTO DE CARGAS | |
| Giovanni Luigi Ferreira Schiavon | |
| Helenton Carlos da Silva | |
| DOI 10.22533/at.ed.21820030314 | |
| CAPÍTULO 15 | 155 |
| CONTROLE DE SISTEMAS LINEARES BASEADOS EM LMIS | |
| Ana Flávia de Sousa Freitas | |
| Amanda Viera da Silva | |
| Wallysonn Alves de Souza | |
| Rafael Pimenta Alves | |
| DOI 10.22533/at.ed.21820030315 | |
| CAPÍTULO 16 | 162 |
| APOIO À DECISÃO ASSOCIANDO A COMPOSIÇÃO PROBABILÍSTICA DE PREFERÊNCIAS AO MONTE CARLO AHP (CPP-MCAHP) | |
| Luiz Octávio Gavião | |
| Annibal Parracho Sant’Anna | |
| Gilson Brito Alves Lima | |
| Pauli Adriano de Almada Garcia | |
| Sergio Kostin | |
| DOI 10.22533/at.ed.21820030316 | |
| CAPÍTULO 17 | 178 |
| EVOLUÇÃO DAS PESQUISAS CIENTÍFICAS ACERCA DA APLICABILIDADE DAS METODOLOGIAS ATIVAS DE APRENDIZAGEM NO CURSO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO: UMA ANÁLISE NOS PERIÓDICOS INDEXADOS PELA SCOPUS | |
| Lucas Capita Quarto | |
| Sônia Maria da Fonseca Souza | |
| Cristina de Fátima de Oliveira Brum Augusto de Souza | |

Fabio Luiz Fully Teixeira
Fernanda Castro Manhães

DOI 10.22533/at.ed.21820030317

CAPÍTULO 18 192

PROJETO DE DESIGN DE MASCOTE PARA JOGO MOBILE

Cristina Trentini
Airam Teresa Zago Romcy Sausen
Paulo Sérgio Sausen
Maurício De Campos
Fabiane Volkmer Grossmann

DOI 10.22533/at.ed.21820030318

SOBRE OS ORGANIZADORES..... 198

ÍNDICE REMISSIVO 199

APOIO À DECISÃO ASSOCIANDO A COMPOSIÇÃO PROBABILÍSTICA DE PREFERÊNCIAS AO MONTE CARLO AHP (CPP-MCAHP)

Data de aceite: 27/02/2020

Data de submissão: 03/12/2019

Luiz Octávio Gavião

Escola Superior de Guerra (ESG)

Rio de Janeiro-RJ

Currículo Lattes: <http://lattes.cnpq.br/6602808435828190>

Annibal Parracho Sant'Anna

Universidade Federal Fluminense (UFF)

Niterói-RJ

Currículo Lattes: <http://lattes.cnpq.br/3615688579946805>

Gilson Brito Alves Lima

Universidade Federal Fluminense (UFF)

Niterói-RJ

Currículo Lattes: <http://lattes.cnpq.br/2248567464602970>

Pauli Adriano de Almada Garcia

Universidade Federal Fluminense (UFF)

Volta Redonda - RJ

Currículo Lattes: <http://lattes.cnpq.br/3866888351512590>

Sergio Kostin

Escola Superior de Guerra (ESG)

Rio de Janeiro-RJ

Currículo Lattes: <http://lattes.cnpq.br/9715414576652583>

(AHP) com múltiplos especialistas, em geral, agrega as avaliações paritárias com médias geométricas. Dependendo da assimetria do conjunto de dados, a agregação por média pode provocar distorções. Além disso, existem incertezas epistêmicas embutidas nesse processo tradicional, associadas ao julgamento humano, em decorrência de limitações cognitivas, variações de conhecimento, experiência e parcialidade das avaliações. Para lidar com essas dificuldades, a simulação de Monte Carlo tem sido associada ao AHP, produzindo os modelos MCAHP, com resultados estocásticos. Essa forma de resultado coincide e se adequa à primeira etapa da Composição Probabilística de Preferências (CPP), um método de apoio à decisão probabilístico. A associação da CPP permite ampliar a interpretação dos resultados e estender o MCAHP para diferentes pontos de vista do tomador de decisão. Sendo assim, o presente trabalho desenvolve novo modelo, CPP-MCAHP, comparado ao AHP com médias geométricas e ao AHP estocástico com resultados satisfatórios.

PALAVRAS-CHAVE: CPP-MCAHP, Monte Carlo, AHP Estocástico.

DECISION SUPPORT WITH COMPOSITION OF PROBABILISTIC PREFERENCES AND MONTE CARLO AHP (CPP-MCAHP)

RESUMO: O Processo de Análise Hierárquica

ABSTRACT: The Analytic Hierarchy Process (AHP) with multiple experts usually aggregates the pairwise evaluations with geometric means. Depending on the data set asymmetry, aggregation by average can cause distortions. In addition, there is an uncertainty associated with human judgment, due to cognitive limitations, variations in knowledge and experience, and bias, which imprecise the process. To deal with these difficulties, Monte Carlo simulation has been associated with AHP, creating MCAHP models with stochastic results. This form of result fits the first step of the Composition of Probabilistic Preferences (CPP), a probabilistic multicriteria decision aid method. The association of CPP improves the interpretation of results and extend the MCAHP to different points of view of decision making. A new model is developed here, the CPP-MCAHP, which is compared to AHP with geometric means and stochastic AHP with satisfactory results.

KEYWORDS: CPP-MCAHP. Monte Carlo. Stochastic AHP.

1 | INTRODUÇÃO

O Processo de Análise Hierárquica (AHP) é um método de apoio à decisão multicritério (MCDA), sendo amplamente utilizado como um dos principais métodos na resolução dos mais diversos tipos de problemas complexos (SAATY, 1980). Para a definição da ordem de prioridade das alternativas capazes de solucionar o problema, o método AHP requer a execução das seguintes etapas: (1) definir o objetivo, os critérios de avaliação, eventuais subcritérios e possíveis alternativas, estabelecendo uma estrutura hierárquica ao problema; (2) comparar os elementos de decisão de forma paritária em cada nível da estrutura hierárquica, em relação ao nível superior, com base em uma escala específica; (3) calcular os pesos relativos dos elementos de decisão nos diversos níveis hierárquicos e, por fim, (4) ordenar as alternativas de decisão a partir da agregação dos pesos dos elementos de decisão.

A literatura registra algumas limitações do AHP. Yaraghi et al. (2015) destaca uma limitação em especial, no que se refere à incerteza associada ao julgamento humano, em decorrência de limitações cognitivas dos especialistas, efetivo conhecimento e experiência dos especialistas, parcialidade das avaliações, entre outros aspectos que influenciam os resultados de cada julgamento (KAHNEMAN, 2003). O método AHP assume que os tomadores de decisão estimam, de forma pontual e precisa, suas preferências por critérios, subcritérios e alternativas. Entretanto, essas preferências se baseiam em uma escala semântica de nove pontos, o que embute incerteza ao processo de avaliação (DURBACH; LAHDELMA; SALMINEN, 2014). Embora o método AHP original não aprofunde o problema da incerteza ou imprecisão dos dados de entrada além das avaliações paritárias dessa escala, diversas extensões ao método foram propostas para resolver este problema, usando por exemplo a teoria dos conjuntos *fuzzy* (BUCKLEY, 1985; BOENDER; DE GRAAN; LOOTSMA, 1989),

a teoria da razão aproximada (SALO; HÄMÄLÄINEN, 1995) e técnicas estocásticas (SAATY; VARGAS, 1987; HAUSER; TADIKAMALLA, 1996).

Outra limitação do AHP se refere à possibilidade de inconsistência das avaliações. Em problemas de decisão na vida real, as matrizes de comparação paritária das variáveis (i.e. critérios, subcritérios e alternativas) raramente são consistentes (BOZÓKI; RAPCSÁK, 2008). Para Forman (1993), essa inconsistência é natural, tendo em vista a falta do perfeito conhecimento do tema por parte dos especialistas. Além disso, aquele autor alerta que a inconsistência de ocorrências no dia-a-dia é um aspecto rotineiro, exemplificando o ambiente esportivo, em que não raro um time A vence um time B e este time B vence um time C, porém o time A perde para o time C. As comparações paritárias com esse tipo de relação entre os times A, B e C contribuem para que a razão de consistência não atenda ao padrão inferior a 10%, que corresponde à medida de consistência proposta por Saaty (1980). Posteriormente, o próprio (SAATY, 1990) também reconheceu que uma variedade de circunstâncias, sempre dinâmicas, influenciam as preferências humanas, interferindo na consistência das avaliações.

Com base nessas limitações, diversas aplicações com simulações de Monte Carlo foram associadas ao AHP, um modelo doravante denominado MCAHP neste artigo, embora a literatura também registre o processo de “AHP Estocástico”. Em geral, as simulações são efetuadas com base na transformação das avaliações paritárias, de valores exatos para variáveis aleatórias. A primeira pesquisa nesse sentido foi elaborada por Vargas (1982), empregando distribuições Gamma e Dirichlet. Em Momani; Ahmed (2011) foram utilizadas distribuições triangulares. Em problemas envolvendo múltiplos especialistas, a maioria das aplicações envolve a agregação das avaliações paritárias por média geométrica (ACZÉL; SAATY, 1983; SAATY; VARGAS, 2012). Quando produzem resultados probabilísticos, as abordagens com o MCAHP também utilizam, em geral, médias e desvios-padrão para comparar as distribuições e definir a ordem das alternativas (MOMANI; AHMED, 2011).

Entretanto, a média é uma medida de tendência central em estatística, com a finalidade de resumir um conjunto de dados a um valor, que representa o centro de sua distribuição. Dependendo da assimetria do conjunto de dados, a agregação por média pode provocar distorções aos resultados (HEATHCOTE; POPIEL; MEWHORT, 1991). Por exemplo, se nove entre dez servidores recebem uma unidade monetária por pagamento e um servidor recebe 991 unidades, a média aritmética indica 100 unidades por pagamento. A média geométrica indica 1,99 unidades por pagamento. Embora mais realista que a média aritmética, ao menos para 90% da amostra, a média geométrica representa um valor próximo ao dobro do pagamento para nove servidores e ainda um valor bem inferior para o último pagamento.

Este artigo propõe dois desenvolvimentos estocásticos para o AHP. Inicialmente,

uma variante do modelo MCAHP, que difere das etapas de cálculo de (ROSENBLOOM, 1997), ao não agregar as avaliações paritárias de múltiplos especialistas em uma distribuição de probabilidade. Aqui é proposto um ajuste de cada avaliação, de cada especialista, a uma distribuição de probabilidade. Nesse caso, cada avaliação paritária dos especialistas é associada a um valor mais provável, entre os parâmetros mínimo (i.e. 1/9) e máximo (i.e. 9) da escala de Saaty (1980).

A distribuição Beta PERT, usualmente utilizada para a modelagem de problemas complexos, sob cenário de incerteza, simplifica a ajustagem desses parâmetros disponíveis (i.e. mínimo, mais provável e máximo) (VOSE, 2008). Essas distribuições permitem simular uma quantidade significativa de matrizes para cada especialista, emulando múltiplas avaliações, que seriam inexequíveis de coletar na realidade, em função do tempo disponível e do desgaste do especialista para preencher dez ou cem mil formulários, por exemplo. A ampliação da quantidade de matrizes permite selecionar as avaliações consistentes do especialista, ao manter somente as que apresentam razão de consistência inferior a 10%.

O procedimento de simulação também amplia a quantidade dos resultados das avaliações dos especialistas. Dessa forma, os resultados do AHP também podem ser representados por distribuições de probabilidade. Nesse caso, optou-se por uma distribuição empírica, em função da quantidade de resultados disponíveis para a ajustagem estatística dos dados. A representação dos resultados por distribuição empírica decorre de suas características; primeiro, por seu ajuste à representação gráfica dos dados e não a parâmetros; segundo, por ser a distribuição de referência para avaliar a eficiência de diversas técnicas estatísticas de ajuste de dados (DELIGNETTE-MULLER; DUTANG, 2015; D'AGOSTINO, 2017).

Ao produzir distribuições de probabilidade para os resultados do AHP, o MCAHP se torna atraente à Composição Probabilística de Preferências (CPP). O CPP é um modelo MCDA desenvolvido por Sant'anna; Sant'anna (2001) para o apoio à decisão com abordagem probabilística. A primeira etapa do CPP é justamente a transformação de valores exatos em variáveis aleatórias, assumindo os mesmos argumentos sobre a incerteza associada ao julgamento humano, utilizado no MCAHP. Essa etapa coincide com o resultado probabilístico do MCAHP, permitindo que as avaliações recebam o adequado tratamento por um MCDA específico para a abordagem com dados probabilísticos.

A associação do CPP ao MCAHP é o segundo modelo proposto neste artigo. O CPP-MCAHP enriquece e robustece o emprego do AHP com múltiplos especialistas, por tornar mais realista o julgamento humano, ao explorar as distribuições de probabilidade em sua plenitude, sem a necessidade de agregação em medidas de tendência central. O CPP avalia conjuntamente as alternativas, oferecendo diversas formas de composição dos resultados, e com ampla gama de aplicações

em problemas de apoio à decisão (SANT'ANNA, 2015).

Este artigo foi dividido em cinco seções. Após a introdução, a Seção 2 apresenta os modelos AHP, MCAHP e CPP-MCAHP. A Seção 3 analisa a aplicação desses três modelos em um problema de apoio à decisão, com a estrutura hierárquica do AHP e com avaliações de múltiplos especialistas. A Seção 4, por fim, conclui o artigo. Todos os cálculos foram efetuados em linguagem R (R-CORE-TEAM, 2019).

2 | MODELOS AHP, MCAHP E CPP

Neste artigo, três modelos foram aplicados a um problema de apoio à decisão com estrutura hierárquica, com avaliações paritárias geradas por cinco especialistas. Inicialmente foi utilizado o método AHP, a partir da agregação dos dados dos especialistas por média geométrica. No segundo modelo, MCAHP, foram simulados mil valores aleatórios para cada avaliação paritária dos especialistas, com base em uma distribuição Beta PERT, considerando os seguintes parâmetros: valor mínimo igual a 1/9, valor mais provável igual a avaliação original do especialista e valor máximo igual a 9. No terceiro modelo, o CPP é aplicado aos resultados estocásticos obtidos pelo MCAHP, de forma a avaliar os possíveis resultados para diferentes pontos de vista da tomada de decisão.

2.1 Modelo AHP

O AHP foi desenvolvido por Saaty (1980), para solução de problemas de apoio à decisão. O modelo requer a definição do objetivo do problema, a escolha de atributos (i.e. critérios e eventuais subcritérios) para orientar o processo de avaliação e alternativas, capazes de atenderem ao objetivo inicial. Essa estrutura hierárquica observa, genericamente, o esquema da Fig. 1, sendo “n1, n2, ... , n7” as notações para quantidades não necessariamente iguais de critérios, subcritérios e alternativas.

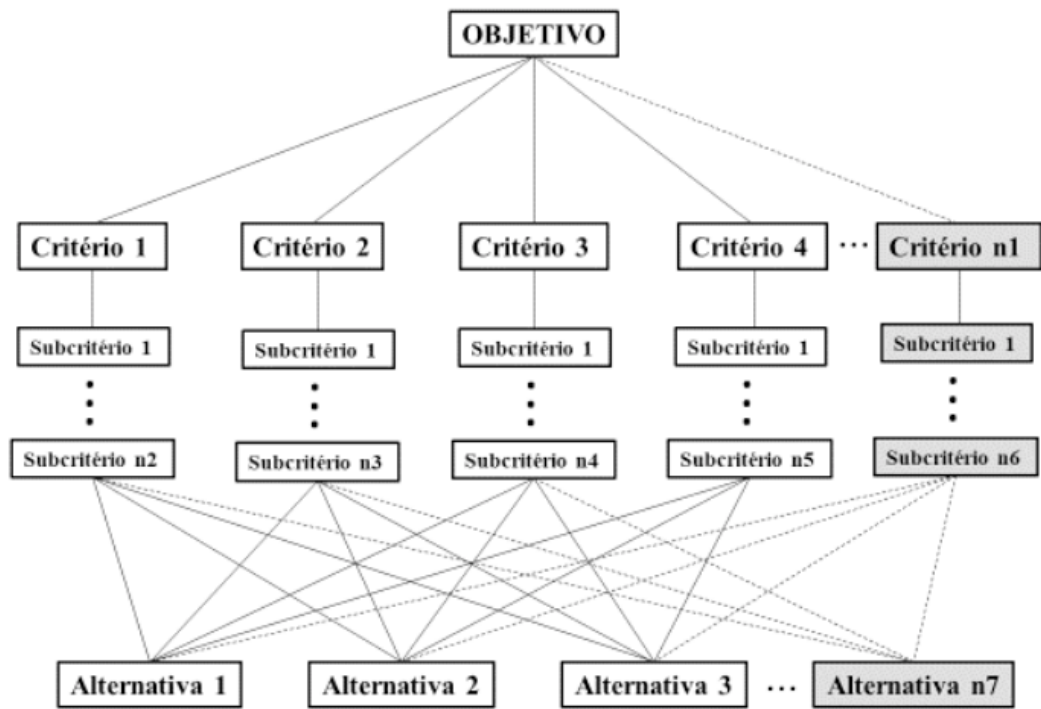


Fig. 1 Estrutura hierárquica de um problema genérico

O AHP requer avaliações para os critérios, eventuais subcritérios e alternativas, efetuadas para um nível acima em sua estrutura. Essas avaliações são paritárias e compõem matrizes com valores da escala proposta por Saaty (1980), na Fig. 2.

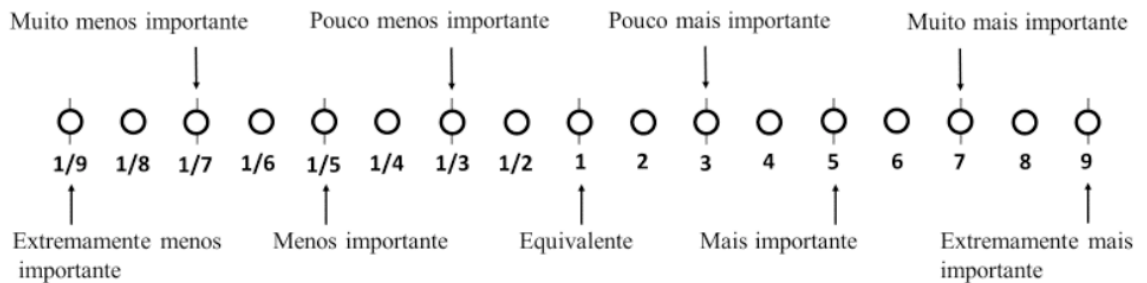


Fig. 2 Escala de Saaty. Fonte: adaptado de Saaty (1980).

O procedimento de cálculo do AHP explora conceitos de álgebra linear. As matrizes de avaliações paritárias são normalizadas por coluna e, em seguida, as médias dos valores das linhas indicam as prioridades de cada alternativa. A razão de consistência das avaliações também pode ser obtida, a partir da divisão de um índice de consistência, obtido da matriz de avaliações, por um índice aleatório para a quantidade de variáveis. A razão de consistência inferior a 10% indica a consistência das avaliações. O detalhamento desse procedimento de cálculo pode ser verificado em Saaty (1980).

2.2 Modelo MCAHP

O modelo estocástico do AHP, aqui proposto, é composto por três etapas.

Inicialmente é efetuada a simulação de Monte Carlo para cada a_{ij} da matriz de avaliações paritárias do AHP. Este artigo explorou a distribuição Beta PERT, com característica assimétrica, assumindo que a avaliação a_{ij} corresponde ao valor modal da distribuição, tendo por limites os extremos valores da escala de Saaty (i.e. mínimo=1/9 e máximo=9), conforme a Fig. 3. A função matemática que define a distribuição Beta PERT está disponível no aplicativo “mc2d”, no banco de dados do software R (POUILLLOT; DELIGNETTE-MULLER, 2010). O aplicativo “mc2d” exige um parâmetro adicional para essas distribuições, denominado *shape*. Este parâmetro está associado à curtose da distribuição: valores elevados indicam desvios-padrão reduzidos, enquanto os valores próximos a zero ampliam o desvio-padrão da distribuição. Neste artigo, padronizou-se o *shape* igual a 10, para todas as distribuições Beta PERT e uma quantidade n de simulações igual a mil.

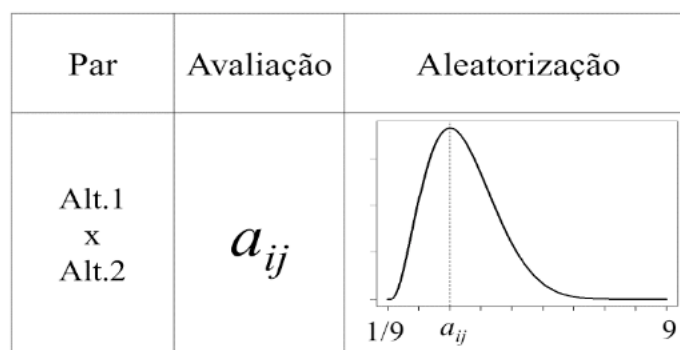


Fig. 3 Aleatorização de uma avaliação paritária

Na 2ª Etapa, efetuaram-se os n cálculos do AHP para cada nova matriz de avaliações, gerada para cada um dos K especialistas, totalizando Kn resultados do AHP. Esses resultados definiram diferentes pesos para cada alternativa, para cada especialista. Esses Kn resultados, para o caso de três alternativas, se distribuíram por seis tipos de combinação para as preferências finais das alternativas: Alt.1-Alt.2-Alt.3; Alt.1-Alt.3-Alt.2; Alt.2-Alt.1-Alt.3; Alt.2-Alt.3-Alt.1; Alt.3-Alt.1-Alt.2 e Alt.3-Alt.2-Alt.1. Na última etapa, o volume de resultados de cada sequência, que caracteriza o mais simples procedimento estocástico, define o resultado do MCAHP.

2.3 Modelo CPP-MCAHP

O CPP-MCAHP é calculado em quatro etapas. Inicialmente são efetuadas as duas etapas iniciais do MCAHP, descritas na Seção 2.2. Entretanto, os n resultados das alternativas são filtrados, de forma a atender a restrição de CR inferiores a 10%. Isto torna irregular o número de simulações preservadas para cada alternativa. Dessa forma, os resultados são ajustados a distribuições empíricas, com base no aplicativo “EnvStats”, disponível na rede do software R (MILLARD, 2013), na 3ª Etapa do modelo. A etapa final corresponde à aplicação do CPP às distribuições

empíricas das alternativas, considerando cada especialista como critério diferente do problema. Esta etapa substitui a aleatorização das alternativas, que corresponde à etapa inicial do CPP.

O CPP foi originalmente proposto por Sant’anna; Sant’anna (2001) e ampliado com novos algoritmos e aplicações em Sant’anna (2015). O método se destina à solução de problemas de apoio à decisão de natureza probabilística. Neste artigo, optou-se por associar o MCAHP com o CPP por eixo, por ampliar os pontos de vista da tomada de decisão dos resultados estocásticos do MCAHP. Desde 2001, mais de uma centena de aplicações do CPP às mais diversas áreas da engenharia e gestão foram levantadas na literatura (GAVIÃO; LIMA, 2017).

Após a etapa inicial de aleatorização das alternativas, são calculadas as probabilidades de cada alternativa ser superior (P.Max) e inferior (P.Min) às demais, conjuntamente, em cada critério, conforme as Equações (1) e (2) (SANT’ANNA et al., 2012). Nesta pesquisa, foram calculadas essas probabilidades para cada especialista j . A notação da i -ésima alternativa está indexada por “ i ” e as demais por “ $-i$ ”. As notações F , f e D são, respectivamente, a função distribuição cumulativa (cdf), a função densidade de probabilidade (pdf) e o domínio das variáveis na escala de Saaty, no intervalo (1/9,9).

$$P.Max_{ij} = \int_{D_{ij}} \left[\prod_j F_{-ij}(x) \right] f_{ij}(x) dx \quad (1)$$

$$P.Min_{ij} = \int_{D_{ij}} \left[1 - F_{-ij}(x) \right] f_{ij}(x) dx \quad (2)$$

Para a ordenação das alternativas, as probabilidades “P.Max_{ij}” e “P.Min_{ij}” são compostas em escores de preferência global, para diferentes pontos de vista do decisor. As composições com base nas “P.Max_{ij}” são denominadas progressistas, por associar a decisão à maximização de ganhos. Nesse caso, os ganhos estão associados às probabilidades de maximizar as preferências. As composições com base nas “P.Min_{ij}” são denominadas conservadoras, por associar a decisão à minimização de perdas, representadas pelas probabilidades de minimizar as preferências. As composições das “P.Max_{ij}” e “P.Min_{ij}” em todos os critérios são denominadas pessimistas, enquanto as otimistas são satisfeitas com a máxima ou mínima preferência em ao menos um critério. Dessa forma, é possível associar a tomada de decisão a quatro pontos de vista, referentes à interseção desses dois eixos progressista-conservador e otimista-pessimista, conforme a Fig.4.

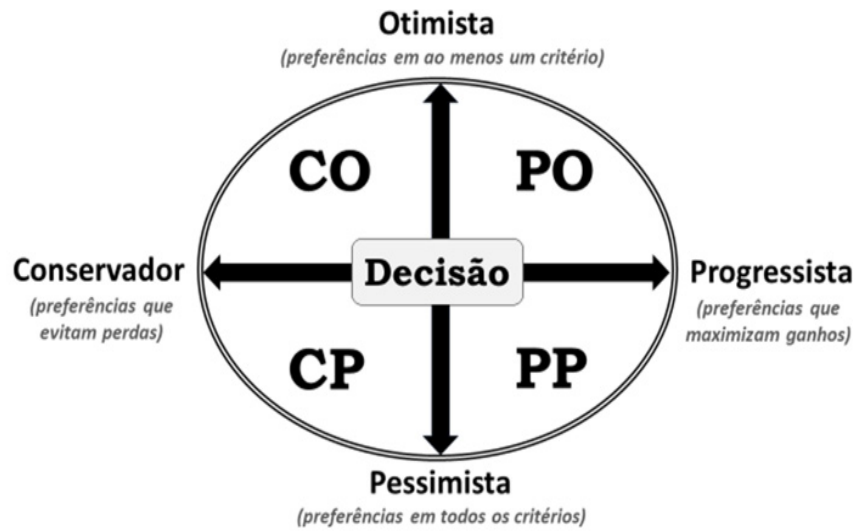


Fig. 4 Pontos de vista da tomada de decisão. Fonte: (GAVIÃO; LIMA, 2017).

Para a condição de independência das avaliações dos especialistas, as seguintes equações determinam os resultados das quatro composições PP, PO, CP e CO, cujos maiores valores numéricos determinam a escolha final das alternativas.

| Ponto de vista | Equações |
|-------------------------|-------------------------------------|
| Progressista-Pessimista | $PP_i = \prod P.Max_{ij}$ |
| Progressista-Otimista | $PO_i = 1 - \prod (1 - P.Max_{ij})$ |
| Conservador-Pessimista | $CP_i = \prod (1 - P.Min_{ij})$ |
| Conservador-Otimista | $CO_i = 1 - \prod P.Min_{ij}$ |

Tabela 2 Equações das composições do CPP por eixo

Fonte: (SANT'ANNA, 2015).

3 | APLICAÇÃO E RESULTADOS

Um problema genérico de ordenação de três alternativas, estruturado de forma hierárquica com quatro critérios foi utilizado neste artigo para ilustrar e comparar os resultados dos modelos indicados na Seção 2. As avaliações paritárias de cinco especialistas foram geradas aleatoriamente, conforme descreve a Fig. 5. Os valores numéricos estão indicados somente nas matrizes triangulares superiores, considerando que a matriz triangular inferior é composta por avaliações inversas $1/a_{ij}$. Na primeira linha de matrizes, designada por "CRIT", constam as avaliações dos quatro critérios, conforme a escala de Saaty, apresentada na Fig. 2. Um valor numérico a_{ij} igual a 3, por exemplo, indica que o critério i é pouco mais importante que o critério j . As demais linhas de matrizes (i.e. C1, C2, C3 e C4) apresentam as

avaliações das alternativas para cada critério, por especialista.

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| C | Esp 1 | Crit 1 | Crit 2 | Crit 3 | Crit 4 | Esp 2 | Crit 1 | Crit 2 | Crit 3 | Crit 4 | Esp 3 | Crit 1 | Crit 2 | Crit 3 | Crit 4 | Esp 4 | Crit 1 | Crit 2 | Crit 3 | Crit 4 | Esp 5 | Crit 1 | Crit 2 | Crit 3 | Crit 4 |
| | Crit 1 | 1 | 1/3 | 1/6 | 1/5 | Crit 1 | 1 | 1/2 | 3 | 4 | Crit 1 | 1 | 4 | 3 | 2 | Crit 1 | 1 | 1 | 1/2 | 1/3 | Crit 1 | 1 | 5 | 1 | 1/2 |
| | Crit 2 | | 1 | 1/4 | 1/7 | Crit 2 | | 1 | 5 | 1/9 | Crit 2 | | 1 | 1 | 4 | Crit 2 | | 1 | 1/3 | 1/2 | Crit 2 | | 1 | 4 | 3 |
| | Crit 3 | | | 1 | 1/3 | Crit 3 | | | 1 | 1/5 | Crit 3 | | | 1 | 1/3 | Crit 3 | | | 1 | 3 | Crit 3 | | | 1 | 1 |
| | Crit 4 | | | | 1 | Crit 4 | | | | 1 | Crit 4 | | | | 1 | Crit 4 | | | | 1 | Crit 4 | | | | 1 |
| C1 | Esp 1 | Alt 1 | Alt 2 | Alt 3 | Esp 2 | Alt 1 | Alt 2 | Alt 3 | Esp 3 | Alt 1 | Alt 2 | Alt 3 | Esp 4 | Alt 1 | Alt 2 | Alt 3 | Esp 5 | Alt 1 | Alt 2 | Alt 3 | | | | | |
| | Alt 1 | 1 | 3 | 1/2 | Alt 1 | 1 | 2 | 1/5 | Alt 1 | 1 | 1 | 1/9 | Alt 1 | 1 | 1/6 | 1 | Alt 1 | 1 | 1/4 | 1/3 | | | | | |
| | Alt 2 | | 1 | 1/2 | Alt 2 | | 1 | 1/3 | Alt 2 | | 1 | 1/2 | Alt 2 | | 1 | 1/5 | Alt 2 | | 1 | 5 | | | | | |
| C2 | Esp 1 | Alt 1 | Alt 2 | Alt 3 | Esp 2 | Alt 1 | Alt 2 | Alt 3 | Esp 3 | Alt 1 | Alt 2 | Alt 3 | Esp 4 | Alt 1 | Alt 2 | Alt 3 | Esp 5 | Alt 1 | Alt 2 | Alt 3 | | | | | |
| | Alt 1 | 1 | 2 | 1 | Alt 1 | 1 | 6 | 1/2 | Alt 1 | 1 | 1/3 | 1/7 | Alt 1 | 1 | 1/3 | 3 | Alt 1 | 1 | 3 | 1/2 | | | | | |
| | Alt 2 | | 1 | 1/5 | Alt 2 | | 1 | 1/3 | Alt 2 | | 1 | 1/3 | Alt 2 | | 1 | 4 | Alt 2 | | 1 | 1/4 | | | | | |
| C3 | Esp 1 | Alt 1 | Alt 2 | Alt 3 | Esp 2 | Alt 1 | Alt 2 | Alt 3 | Esp 3 | Alt 1 | Alt 2 | Alt 3 | Esp 4 | Alt 1 | Alt 2 | Alt 3 | Esp 5 | Alt 1 | Alt 2 | Alt 3 | | | | | |
| | Alt 1 | 1 | 3 | 1/3 | Alt 1 | 1 | 5 | 1 | Alt 1 | 1 | 1/6 | 5 | Alt 1 | 1 | 1/4 | 2 | Alt 1 | 1 | 2 | 1 | | | | | |
| | Alt 2 | | 1 | 2 | Alt 2 | | 1 | 5 | Alt 2 | | 1 | 9 | Alt 2 | | 1 | 1/9 | Alt 2 | | 1 | 1/7 | | | | | |
| C4 | Esp 1 | Alt 1 | Alt 2 | Alt 3 | Esp 2 | Alt 1 | Alt 2 | Alt 3 | Esp 3 | Alt 1 | Alt 2 | Alt 3 | Esp 4 | Alt 1 | Alt 2 | Alt 3 | Esp 5 | Alt 1 | Alt 2 | Alt 3 | | | | | |
| | Alt 1 | 1 | 4 | 1/5 | Alt 1 | 1 | 2 | 4 | Alt 1 | 1 | 1 | 3 | Alt 1 | 1 | 2 | 4 | Alt 1 | 1 | 6 | 1/2 | | | | | |
| | Alt 2 | | 1 | 7 | Alt 2 | | 1 | 3 | Alt 2 | | 1 | 2 | Alt 2 | | 1 | 7 | Alt 2 | | 1 | 1/9 | | | | | |
| | Alt 3 | | | 1 | Alt 3 | | | 1 | Alt 3 | | | 1 | Alt 3 | | | 1 | Alt 3 | | | 1 | | | | | |

Fig. 5 Avaliações paritárias dos Especialistas

As médias geométricas das avaliações dos especialistas se encontram na Fig. 6. Com os dados das matrizes consolidadas dos critérios e das alternativas para cada critério, foi aplicado o AHP, conforme descrito na Seção 2.1. Os resultados, sob a forma de pesos, estão apresentados na Fig. 7.

| Critérios | | | | | Alt - Crit. 1 | | | | Alt - Crit. 2 | | | |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------------|-----------|-----------|-----------|---------------|-----------|-----------|-----------|
| | Crit 1 | Crit 2 | Crit 3 | Crit 4 | | Alt 1 | Alt 2 | Alt 3 | | Alt 1 | Alt 2 | Alt 3 |
| Crit 1 | 1 | 1,2722596 | 0,9440875 | 0,7677039 | Alt 1 | 1 | 0,7578583 | 0,3263828 | Alt 1 | 1 | 1,3195079 | 0,639724 |
| Crit 2 | 0,7860031 | 1 | 1,1075663 | 0,6248304 | Alt 2 | 1,3195079 | 1 | 0,6083643 | Alt 2 | 0,7578583 | 1 | 0,5609776 |
| Crit 3 | 1,0592238 | 0,9028805 | 1 | 0,5818108 | Alt 3 | 3,0638871 | 1,6437518 | 1 | Alt 3 | 1,5631741 | 1,7826025 | 1 |
| Crit 4 | 1,3025855 | 1,6004343 | 1,7187719 | 1 | | | | | | | | |
| | | | | | Alt - Crit. 3 | | | | Alt - Crit. 4 | | | |
| | | | | | | Alt 1 | Alt 2 | Alt 3 | | Alt 1 | Alt 2 | Alt 3 |
| | | | | | Alt 1 | 1 | 1,0456396 | 1,2722596 | Alt 1 | 1 | 2,4914619 | 1,3685109 |
| | | | | | Alt 2 | 0,9563525 | 1 | 1,0739409 | Alt 2 | 0,4013708 | 1 | 2,0082647 |
| | | | | | Alt 3 | 0,7860031 | 0,9311499 | 1 | Alt 3 | 0,7307213 | 0,4979423 | 1 |

Fig. 6 Médias geométricas das avaliações dos Especialistas

Os resultados da aplicação do AHP com as médias geométricas das avaliações indicam que a Alternativa 3, com resultado 0,3488138, é preferível em relação à Alternativa 1 e à Alternativa 2. Das matrizes consolidadas, somente a das avaliações de alternativas para o Critério 4 indicou uma razão de consistência superior a 10%. Entretanto, para efeito de comparação com as outras metodologias, foram mantidos os dados dessa matriz para os cálculos do AHP.

Resultados
do AHP
Médias geométricas

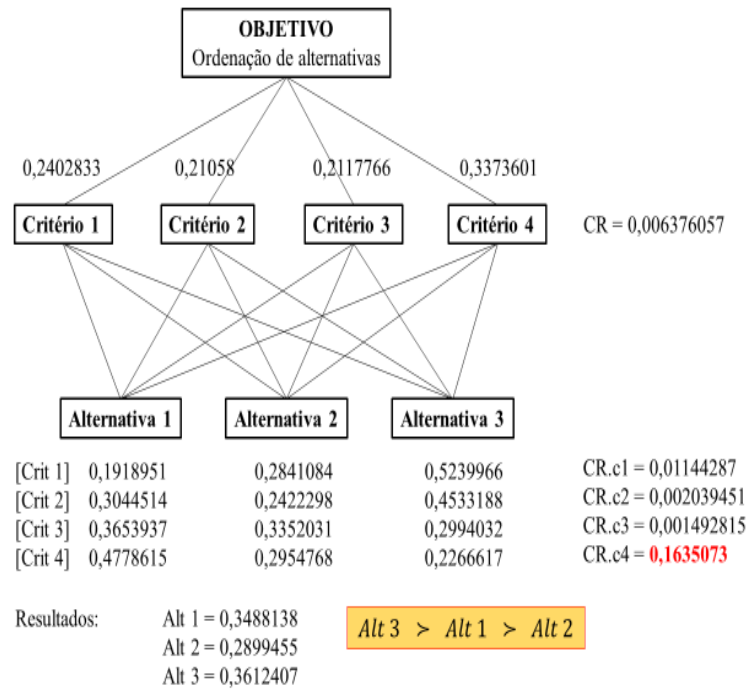


Fig. 7 Resultados do AHP por média geométrica

Em seguida, aplicou-se o MCAHP aos dados iniciais, apresentados na Fig. 5. Foram gerados mil valores aleatórios para cada a_{ij} , por especialista, com base em distribuições Beta PERT. Somente os valores das matrizes triangulares superiores foram gerados, sendo os das matrizes inferiores obtidos por inversão dos a_{ij} . De cada conjunto de matrizes de dados, foi calculado o AHP. Assim, cinco mil resultados do AHP foram plotados em histogramas, conforme descreve a Fig. 8. Cada linha apresenta os pesos das Alternativa, para cada Especialista. Cada ordem de preferência das alternativas, para os cinco mil procedimentos de cálculo, foi registrada na Fig. 9.

Os histogramas da Fig. 9 indicam a quantidade de combinações de preferências das alternativas, por especialista, conforme os números no topo das barras dos gráficos. Somados os resultados dos especialistas em cada sequência de alternativas, é possível verificar que a ordem A1-A2-A3 apresentou a maior frequência, com 1979 resultados em cinco mil simulações. Em seguida, a ordem de preferência A1-A3-A2 ocorreu 1431 vezes. Em comum, essas duas sequências apresentam a Alternativa 1 com a maior preferência. Somadas as ocorrências das duas principais ordens de preferência, é possível verificar que responderam por 68,2% dos resultados (i.e. $(1979+1431)/5000$), o que robustece a escolha pela Alternativa 1.

MC-AHP (n=1000)

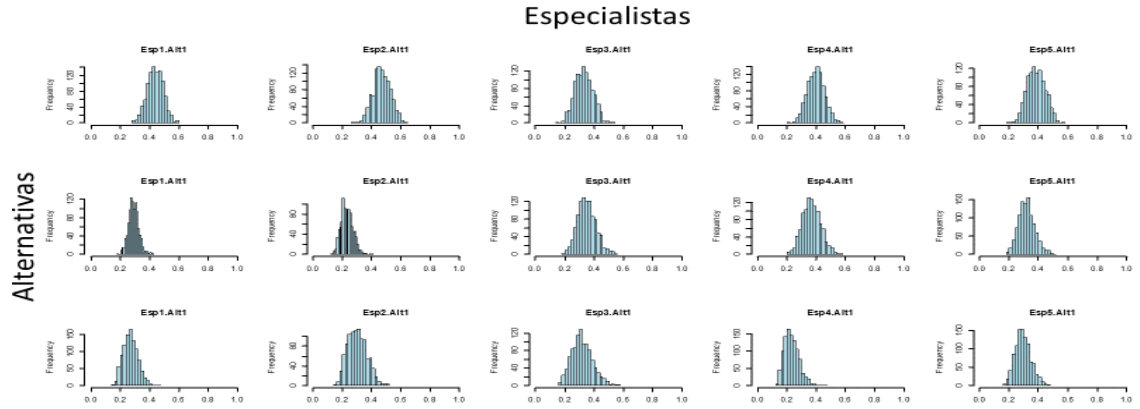


Fig. 8 Histogramas dos resultados por MCAHP

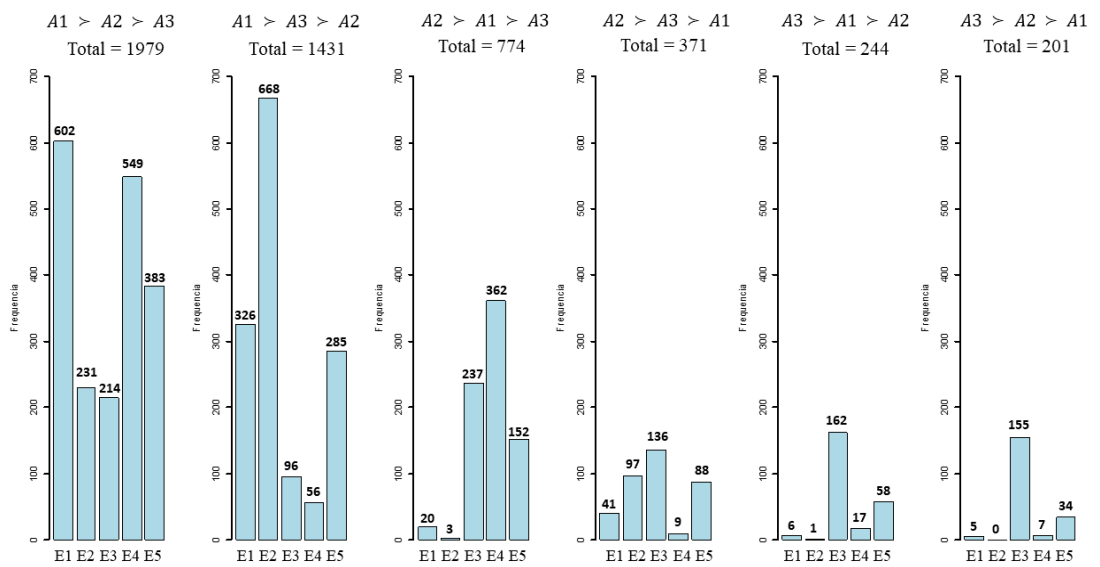


Fig. 9 Análise das combinações de resultados

A consistência das simulações dos especialistas também foi computada, considerando todas as suas avaliações, que incluíram critérios e alternativas por critério. A Fig. 10 apresenta as densidades dos resultados das razões de consistência para cada cálculo do AHP, efetuado a partir das simulações. A marcação vertical em cada gráfico indica a CR igual a 10%. Os percentuais indicados para cada especialista mostram a quantidade de simulações consistentes, indicando que o Especialista 3 foi o mais consistente, pois 53,5% de suas mil simulações produziram CR inferiores a 10%.

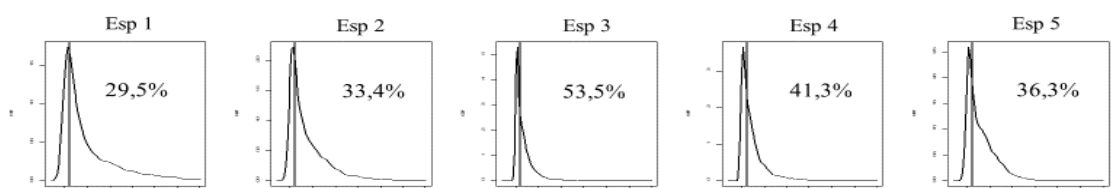


Fig. 10 Consistência dos Especialistas

Por fim, os resultados das simulações do MCAHP para cada alternativa, apresentados na Fig. 8, foram modelados com o CPP. A elevada quantidade de dados iniciais permite uma adequada ajustagem com distribuições empíricas. Com esse tipo de dados, é possível utilizar um método probabilístico, capaz de ordenar as alternativas. A matriz de decisão para a modelagem do CPP foi, então, composta por três alternativas, considerando cada especialista como um diferente critério do problema, conforme a Fig. 8.

A Tabela 3 descreve os resultados do CPP por eixo, com as probabilidades de maximizar (Prob Max) e minimizar (Prob Min) as preferências por alternativa e os rankings para cada ponto de vista de tomada de decisão. Assim, as avaliações do Especialista 1, por exemplo, indicam que a Alternativa 1 apresenta a maior probabilidade de apresentar avaliações superiores às demais e, conseqüentemente, a menor probabilidade de receber avaliações inferiores. Essas probabilidades são quantificadas e compostas para os diferentes pontos de vista PP, PO, CP e CO. Os quatro resultados do CPP coincidem com a seqüência de preferências A1-A2-A3, identificada previamente com as simulações de MCAHP.

| Prob Max | Esp 1 | Esp 2 | Esp 3 | Esp 4 | Esp 5 |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Alt 1 | 0,9758 | 0,9651 | 0,2925 | 0,6114 | 0,7344 |
| Alt 2 | 0,0122 | 0,0004 | 0,4826 | 0,3852 | 0,1778 |
| Alt 3 | 0,0120 | 0,0351 | 0,2319 | 0,0045 | 0,0912 |

| Prob Min | Esp 1 | Esp 2 | Esp 3 | Esp 4 | Esp 5 |
|----------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Alt 1 | 0,0028 | 0,0003 | 0,3468 | 0,0147 | 0,0620 |
| Alt 2 | 0,3496 | 0,7987 | 0,1914 | 0,0371 | 0,3531 |
| Alt 3 | 0,6478 | 0,2044 | 0,4682 | 0,9503 | 0,5893 |

| CPP Eixos | PP | Rank | PO | Rank | CP | Rank | CO | Rank |
|-----------|----------|------|----------|------|----------|------|----------|------|
| Alt 1 | 1,24E-01 | 1 | 1,00E+00 | 1 | 6,02E-01 | 1 | 1,00E+00 | 1 |
| Alt 2 | 1,76E-07 | 2 | 7,42E-01 | 2 | 6,59E-02 | 2 | 9,99E-01 | 2 |
| Alt 3 | 4,04E-08 | 3 | 3,38E-01 | 3 | 3,04E-03 | 3 | 9,65E-01 | 3 |

Tabela 3 Resultados do CPP-MCAHP

A comparação do AHP com os modelos MCAHP e CPP-MCAHP trouxe maior realismo à solução do problema. O uso de médias geométricas para agregar as múltiplas avaliações dos especialistas indicou um resultado diferente das abordagens estocástica e probabilística. Ao simular valores aleatórios com base nas distribuições Beta PERT, verificou-se que os modelos MCAHP lidam melhor com a imprecisão/incerteza do julgamento humano nas avaliações paritárias. A ordem de preferência A3-A1-A2 obteve 244 ocorrências de cinco mil simulações do MCAHP, o que representa 4,88%. A seqüência A1-A2-A3 foi verificada em 1979 vezes, correspondendo a 39,58% dos resultados. Esta seqüência também foi confirmada pelo CPP. Além disso, as duas seqüências com maior preferência probabilística

possuem a Alternativa 1 como prioritária, enquanto o modelo AHP a posicionou como segunda opção em caso de escolha.

Os modelos estocásticos também lidam melhor com o problema de inconsistência, ao não exigir novas rodadas com especialistas. Isto pode ser complexo no mundo real, pois exige mais tempo e desgaste de especialistas nem sempre disponíveis para realizar novas avaliações.

A simulação aqui proposta mantém a matriz triangular inferior como inversa à triangular superior, diferentemente do procedimento usual de cálculo das médias geométricas das avaliações paritárias de especialistas, que torna a matriz “irregular” ao AHP (i.e. matriz triangular inferior não é a inversa da triangular superior).

Por fim, o uso do CPP agregou valor ao modelo MCAHP, no que se refere à aplicação de um modelo de apoio à decisão multicritério, vocacionado à escolha e ordenação de alternativas a partir de dados probabilísticos. Isto evita uma parcela de críticas da literatura, que se referem ao AHP como um método mais útil à atribuição de pesos aos critérios, ao invés de aplicá-lo à escolha de alternativas (POMEROL; BARBA-ROMERO, 2012).

4 | CONCLUSÕES

Este artigo trouxe dois modelos estocásticos para uso com o AHP. As principais limitações do AHP original foram levantadas, com a finalidade de endossar as propostas de modelos. O primeiro, denominado MCAHP, utilizou a simulação de Monte Carlo para ampliar a base de dados iniciais, com a finalidade de reduzir a incerteza associada ao julgamento humano. A simulação, dessa forma, evita o uso de uma única matriz de avaliações paritárias para solucionar o problema. As distribuições Beta PERT permitiram tornar um valor mais provável em uma variável aleatória, de forma a simular mil valores. O cálculo do AHP para mil matrizes de cada especialista identificou a ordem de preferência das seis possíveis para as três alternativas.

Em seguida, foi proposto um segundo modelo estocástico ao AHP, associando-o ao CPP. Os resultados do MCAHP, ao invés de “estocados” em volumes, foram aleatorizados por distribuições empíricas e submetidos a um método MCDA probabilístico. As duas propostas de modelos estocásticos convergiram em resultados, indicando que a sequência A1-A2-A3 foi a preferencial, enquanto o AHP com agregação de avaliações dos especialistas por médias geométricas apresentou a sequência A3-A1-A2 com a preferida. A diferença de robustez dos resultados indica que os modelos estocásticos apresentaram desempenho superior ao modelo determinístico.

Alguns desdobramentos são visualizados nesta pesquisa. A aleatorização dos

resultados do MCAHP para cada nível pode também ser utilizada pelo CPP, de forma a comparar os resultados com os modelos aqui propostos. A aplicação de outros modelos MCDA probabilísticos aos resultados do MCAHP também podem trazer outros aspectos à discussão.

REFERÊNCIAS

- ACZÉL, J.; SAATY, T. L. Procedures for synthesizing ratio judgements. **Journal of Mathematical Psychology**, v. 27, n. 1, p. 93–102, 1983.
- BOENDER, C. G. E.; DE GRAAN, J. G.; LOOTSMA, F. A. Multi-criteria decision analysis with fuzzy pairwise comparisons. **Fuzzy sets and Systems**, v. 29, n. 2, p. 133–143, 1989.
- BOZÓKI, S.; RAPCSÁK, T. On Saaty's and Koczkodaj's inconsistencies of pairwise comparison matrices. **Journal of Global Optimization**, v. 42, n. 2, p. 157–175, 2008.
- BUCKLEY, J. J. Fuzzy hierarchical analysis. **Fuzzy sets and systems**, v. 17, n. 3, p. 233–247, 1985.
- D'AGOSTINO, R. B. **Goodness-of-fit-techniques**. [s.l.] Routledge, 2017.
- DELIGNETTE-MULLER, M. L.; DUTANG, C. fitdistrplus: An R package for fitting distributions. **Journal of Statistical Software**, v. 64, n. 4, p. 1–34, 2015.
- DURBACH, I.; LAHDELMA, R.; SALMINEN, P. The analytic hierarchy process with stochastic judgements. **European Journal of Operational Research**, v. 238, n. 2, p. 552–559, 2014.
- FORMAN, E. H. Facts and fictions about the analytic hierarchy process. **Mathematical and computer modelling**, v. 17, n. 4–5, p. 19–26, 1993.
- GAVIÃO, L. O.; LIMA, G. B. A. **Decision support in athlete acquisition: an application of the Composition of Probabilistic Preferences to football [in Portuguese]**. Beau Bassin: Novas Edições Acadêmicas, 2017.
- HAUSER, D.; TADIKAMALLA, P. The analytic hierarchy process in an uncertain environment: a simulation approach. **European Journal of Operational Research**, v. 91, n. 1, p. 27–37, 1996.
- HEATHCOTE, A.; POPIEL, S. J.; MEWHORT, D. J. Analysis of response time distributions: An example using the Stroop task. **Psychological Bulletin**, v. 109, n. 2, p. 340, 1991.
- KAHNEMAN, D. A perspective on judgment and choice: mapping bounded rationality. **American psychologist**, v. 58, n. 9, p. 697, 2003.
- MILLARD, S. P. **EnvStats, an R Package for Environmental Statistics**Wiley Online Library, , 2013. .
- MOMANI, A. M.; AHMED, A. A. Material handling equipment selection using hybrid Monte Carlo simulation and analytic hierarchy process. **World Academy of Science, Engineering and Technology**, v. 59, p. 953–958, 2011.
- POMEROL, J.-C.; BARBA-ROMERO, S. **Multicriterion decision in management: principles and practice**. New York: Springer, 2012.
- POUILLOT, R.; DELIGNETTE-MULLER, M. L. Evaluating variability and uncertainty separately in microbial quantitative risk assessment using two R packages. **International journal of food microbiology**, v. 142, n. 3, p. 330–340, 2010.

R-CORE-TEAM. **R: A language and environment for statistical computing.** <http://www.R-project.org> Vienna, Austria, 2019. .

ROSENBLOOM, E. S. A probabilistic interpretation of the final rankings in AHP. **European Journal of Operational Research**, v. 96, n. 2, p. 371–378, 1997.

SAATY, T. L. **The Analytic Hierarchy Process**. New York: McGraw-Hill, 1980.

SAATY, T. L. **Decision making for leaders: the analytic hierarchy process for decisions in a complex world**. [s.l.] RWS publications, 1990.

SAATY, T. L.; VARGAS, L. G. Uncertainty and rank order in the analytic hierarchy process. **European Journal of Operational Research**, v. 32, n. 1, p. 107–117, 1987.

SAATY, T. L.; VARGAS, L. G. **Models, methods, concepts & applications of the analytic hierarchy process**. [s.l.] Springer Science & Business Media, 2012. v. 175

SALO, A. A.; HÄMÄLÄINEN, R. P. Preference programming through approximate ratio comparisons. **European Journal of Operational Research**, v. 82, n. 3, p. 458–475, 1995.

SANT'ANNA, A. P. **Probabilistic Composition of Preferences, Theory and Applications**. New York: Springer, 2015.

SANT'ANNA, A. P.; GOMES, L. F. A. M.; COSTA, F. F. da; RANGEL, L. A. D.; FARIA, M. J. da S.; FERREIRA, R. G.; FILHO, R. M. M.; RIBEIRO, R. O. A.; SENNA, V. de. Análise multicritério baseada em probabilidades de preferência. In: OLIVEIRA, V. F. DE; CAVENAGHI, V.; MÁSCULO, F. S. (Ed.). **Tópicos emergentes e desafios metodológicos em Engenharia de Produção: casos, experiências e proposições - Volume V**. Rio de Janeiro: ABEPRO, 2012. p. 258.

SANT'ANNA, A. P.; SANT'ANNA, L. A. F. P. Randomization as a stage in criteria combining. In: International Conference on Industrial Engineering and Operations Management - VII ICIEOM, Salvador. **Anais...** Salvador: 2001.

VARGAS, L. G. Reciprocal matrices with random coefficients. **Mathematical modelling**, v. 3, n. 1, p. 69–81, 1982.

VOSE, D. **Risk analysis: a quantitative guide**. New York: John Wiley & Sons, 2008.

YARAGHI, N.; TABESH, P.; GUAN, P.; ZHUANG, J. Comparison of AHP and Monte Carlo AHP under different levels of uncertainty. **IEEE Transactions on Engineering Management**, v. 62, n. 1, p. 122–132, 2015.

ÍNDICE REMISSIVO

A

AHP estocástico 162

Aluminized tetra pak package 69

Análise 1, 2, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 20, 24, 25, 26, 27, 29, 37, 42, 43, 44, 45, 48, 49, 56, 57, 64, 81, 102, 109, 110, 113, 118, 122, 123, 134, 155, 156, 160, 162, 163, 173, 177, 178, 181, 182, 183, 185, 189, 190, 191, 193

Auditoria 118, 119, 121, 122, 123, 124

Auditoria interna da qualidade 118, 119, 121

B

Bim 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68

Bipartição do tanque 96

C

Campo de deformação 1, 8, 9, 10

Campo de tensão 1, 10

Carro de competição 126, 134, 141

Colunas manométricas 88, 93, 94

Comparação 49, 55, 58, 61, 64, 65, 105, 132, 148, 149, 164, 171, 174, 193

Concreto 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 27, 28, 29, 37, 47, 48, 49, 52, 56, 57, 62

Contaminação de combustível 96, 97

Controle de sistemas lineares 155, 160

Corrosão 3, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 21, 23, 24, 101

Cpp-mcahp 162, 163, 165, 166, 168, 174

D

Dados geoespaciais 38, 40

Desigualdades matriciais lineares 155, 156

Desvios de trinca 1

Drinking water 69, 70, 78, 79, 80, 86

Durabilidade 13, 14, 15, 18, 19, 22, 23

E

Edifícios de concreto armado 47, 57

Efluente 38, 39, 43, 44

Eletrodeposição 81

Envelhecimento 13, 14, 19, 22, 24

Equação de bernoulli 88, 90, 93, 95

Escherichia coli 69, 70, 71, 72, 79

Estruturas metálicas 5, 26, 32, 33, 37

Ete 38, 39, 40, 43, 44, 45

F

Fabricação artesanal 107

Foil from beverage can 69

G

Gerenciamento da produção 107

I

Instabilidade global 47, 56

Isótopos de tório 81

J

Juntas soldadas dissimilares 1, 2

L

Lmis 155

M

Microprecipitação 81

Mirror 69, 71, 72, 74, 77, 78

Monte carlo 162, 163, 164, 168, 175, 176, 177

N

Núcleos rígidos 47, 49, 51, 55, 56

O

Orçamento 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 198

Otimização de processos 107

P

Pseudomonas aeruginosa 69, 70, 71, 72, 79, 101

Q

Qgis 38, 39, 41, 42, 43, 44, 45

Qualidade 16, 23, 39, 40, 41, 45, 67, 108, 111, 118, 119, 120, 121, 122, 123, 124, 125, 126, 146, 181, 182, 186

Qualidade ambiental urbana 125, 126

Quantitativos 58, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 67, 68, 184

R

Redes de sensores sem fio 125, 126, 127, 143

Reforço estrutural 25, 26, 27, 29, 32, 37, 99

S

Sig 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 197

Sistema bola-viga 155, 156, 158, 160

Sodis 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80

Subabastecimento 96, 97

T

Tubo de venturi 88, 92, 93, 95

 **Atena**
Editora

2 0 2 0